



Universida de Vigo

Doctorado en Tecnología
Medioambiental

**MODELO Y SIMULACIÓN HIDROGEOLÓGICA
PARA LA SOSTENIBILIDAD DEL ACUÍFERO
LIBRE DE LOS MONTES TOROZOS**

Tesis Doctoral

Germán Sanz Lobón

Abril 2014



UniversidadeVigo

Doctorado en Tecnología Medioambiental



MODELO Y SIMULACIÓN HIDROGEOLÓGICA PARA LA SOSTENIBILIDAD DEL ACUÍFERO LIBRE DE LOS MONTES TOROZOS

Tesis Doctoral

Autor:

Germán Sanz Lobón

Directores:

Dr. Javier Taboada Castro

Dr. Roberto Martínez-Alegría López

Abril de 2014

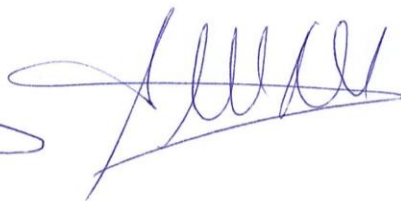
Universidade de Vigo

Los doctores D. **Javier Taboada Castro** y D. **Roberto Martínez-Alegría López** en su calidad de directores aceptan la presentación del trabajo de Tesis Doctoral, titulado: "**Modelo y simulación hidrogeológica para la sostenibilidad del acuífero libre de los Montes Torozos**", elaborado por D. **Germán Sanz Lobón**, con DNI **7150984-R**, alumno matriculado en el Programa de Doctorado en Tecnología Medioambiental por la Universidad de Vigo y por el que opta al grado de Doctor con mención internacional.

Vigo, a 7 de abril de 2014



Fdo: Javier Taboada Castro



Fdo: Roberto Martínez-Alegría López



Fdo: Germán Sanz Lobón

Agradecimientos

Con el pequeño aporte al conocimiento que pueda suponer esta tesis, es deseo del autor, indicar que se trata de un trabajo a medio camino entre la ilusión y la realidad, se trata de un mero artificio que ha permitido acercar un poco más al autor al territorio y a sí mismo. Pero en esta aproximación científica y personal se ha involucrado sin quererlo a mucha gente, sin la cual nunca se podrían haber alcanzado estas conclusiones. Que personalmente espero, que no sean más que el punto de partida de un viaje hacia un conocimiento mucho más profundo y humano (como no puede ser de otra manera) de este mundo en el que nos encontramos.

A TODAS ESAS PERSONAS MUCHAS GRACIAS, DE TODO CORAZÓN.

Pero por motivos sentimentales, no puedo, ni quiero, dejar pasar esta ocasión para hacer varios agradecimiento explícitos: primero, a mis Padres que me han atormentando para que terminara, más de lo que les he atormentado yo a ellos con mis devaneos; segundo a mis Directores de Tesis que estuvieron cuando se les necesitaba tanto en lo académico como en lo personal, su aliento e insistencia por avanzar con paso firme de dirección incierta, siempre supuso un pequeño avance, aunque fuera para saber que no era el rumbo adecuado, debo hacer una mención espacial a nuestras "muy estimadas colegas" del Instituto Politécnico de Castelo Branco, que con su desinteresada colaboración han dado a esta tesis una visión un poco más amplia; tercero, a todos aquellos docentes que supieron dejar en mí la semilla de la curiosidad, el hambre de conocimiento y la rigurosidad de la ciencia, sin denostar nunca la naturaleza humana; cuarto, no por su posición el agradecimiento es menor, quiero agradecer a mis abuelos que fueron y siguen siendo los ojos que vieron un pasado y lo han acercarlo hasta este incierto presente, que en estas líneas pervivirá su recuerdo más allá de la memoria; por fin, y quizá muy a su pesar, a todos aquellos colegas y amigos que aguantaron mis pláticas o me ayudaron para conducir a buen puerto esta nave, unos por el día en aulas y cafés, otros por la noche en bares y carpas, hasta que en cierto punto fue difícil diferenciarlos.

Finalmente, y para no recaer en el tedio, quisiera recoger como epílogo, traído a mi memoria en una discusión por Facebook y sacado de las hojas amarillas de un libro ajado por el uso:

"Caminante, son tus huellas
el camino, y nada más;
caminante, no hay camino,
se hace camino al andar.
Al andar se hace camino,
y al volver la vista atrás
se ve la senda que nunca
se ha de volver a pisar.
Caminante, no hay camino,
Sino estela en la mar."

Proverbios y Cantares. XXIX. Poesías completas. Antonio Machado. Selecciones Austral. Espasa-Calpe.

Resumen / Abstract

MODELO Y SIMULACIÓN HIDROGEOLÓGICA PARA LA SOSTENIBILIDAD DEL ACUÍFERO LIBRE DE LOS MONTES TOROZOS

Germán Sanz Lobón

Licenciado en Ciencias Ambientales por la Universidad Europea Miguel de Cervantes.

Posgraduado en Tecnologías Medioambientales por la Universidad de Vigo.

Posgraduado en Hidrología por la Universidad de Alcalá de Henares.

Directores: Dr. Javier Taboada Castro y Dr. Roberto Martínez-Alegría López

RESUMEN:

La disponibilidad de recursos hídricos en cantidad y calidad adecuada para los usos demandados, se ha convertido en una de las piedras angulares de cualquier propuesta de desarrollo económico y social. Bajo estas premisas se ha producido un cambio en la percepción y la valoración de los recursos hídricos y consecuentemente en un cambio en los paradigmas de la planificación. Este cambio social ha permitido generar nuevos escenarios para la gestión de los recursos hídricos, que incluyan el cambio climático, el estudio de los contaminantes emergentes, o incluso la cuantificación del agua virtual.

En este trabajo de investigación, una vez caracterizado hidrogeológicamente el acuífero del páramo de los Montes Torozos, a través de los parámetros hidrogeológicos clásicos: la precipitación, la evapotranspiración, la infiltración, la piezometría, la permeabilidad, la trasmisividad, la inercia de respuesta, la curva de agotamiento, el coeficiente α , las extracciones y la escorrentía superficial, se ha determinado el balance hídrico mediante el estudio de la recarga y las salidas. A partir de todas ellas se ha elaborado un modelo conceptual de funcionamiento del sistema.

Sobre el modelo conceptual, y partiendo de los parámetros de recarga y drenaje, así como de su situación espacial, se ha hecho una evaluación del volumen de los recursos y de las reservas disponibles. Mediante la caracterización ambiental del área de trabajo (medio físico, medio biótico, medio socioeconómico y medio perceptual) se han estimado las demandas presentes y futuras, cerrándose de esta manera el balance hídrico del sistema acuífero de los Montes Torozos.

La masa de agua en Monte Torozos es un acuífero que pertenece a la cuenca hidrográfica del río Duero y se extiende por las provincias de Valladolid y Palencia (Castilla y León, España), ocupando una superficie de 1.000 km². La cota del páramo varía entre los 750 y los 880 m snm, y cuenta con una población de 47.000 habitantes distribuidos por 57 términos municipales. Es una comarca con una población

envejecida, con los núcleos de población situados en su borde o en sus laderas, cerca de los manantiales o muchas veces alrededor de ellos, por lo que en ocasiones la distancia entre ellos puede ser de varios kilómetros. Respecto a los aprovechamientos del suelo, históricamente, el páramo estaba ocupado por los usos agrícolas y forestales (sobre todo de tipo mediterráneo), pero la roturación progresiva de tierras ha dado lugar a que los cultivos de secano hayan llegado a ser el uso más extendido hoy en día. Por esta razón, con el fin de asumir el contenido de la Directiva Marco del Agua de la Comunidad Europea 2000/60/CE y la Directiva sobre aguas subterráneas 2006/118/CE, se ha decidido evaluar su vulnerabilidad, como base para proponer las políticas de articulación territorial.

En este sentido, la evaluación de contaminación de las aguas subterráneas es un proceso complejo y lleno de incertidumbre a escala regional. Para lo cual, se ha desarrollado una metodología integrada de evaluación de la vulnerabilidad, que pueda servir para gestionar eficazmente y proteger una fuente de recursos naturales tan valiosa como es el agua dulce, en dicha metodología se ha tenido en cuenta la jerarquía de uso o la protección de las zonas de alto riesgo o muy sensibles

Durante el proceso de caracterización se ha generado un sistema de información geográfico (SIG), a partir del cual se ha realizado el análisis territorial de forma paralela al desarrollo de las metodologías empleadas para la construcción de los modelos hidrogeológicos y geoestadísticos (SpaceStat 4.08). El tratamiento de la información cartográfica, además, ha permitido visualizar la evolución espacio-temporal a lo largo de los últimos 50 años de las variables espaciales analizadas. Dicho análisis se ha traducido en la elaboración de cartografía temática obtenida a partir de técnicas de teledetección y fotointerpretación de imágenes de satélite, ortofotografías y fotogramas de los vuelos históricos de 1956/59 y 1977/83 apoyadas sobre la cartografía de los proyectos CORINE (Coordination of information on the environment) *Land Cover* de los años 1990, 2000 y 2006.

Geomorfológicamente, el páramo es una unidad morfoestructural, originada por los procesos sedimentarios que tuvieron lugar durante el Terciario en la cuenca del Duero. La serie estratigráfica se vio ligeramente alterada por los procesos Neotectónicos de la fase Iberomanchega.

El Páramo de los Montes Torozos se trata de un acuífero kárstico y libre, que lo hace especialmente vulnerable a la inmisión de contaminantes externos, por ello y para determinar el estado actual y evaluar objetivamente la vulnerabilidad del sistema se ha efectuado una primera caracterización de los parámetros físico-químicos más representativos, y posteriormente se han estimado los índices de vulnerabilidad y susceptibilidad empleando la metodología DRASTIC. La aplicación de estos índices, ha demostrado que es necesario elaborar un modelo de articulación territorial eficaz que evite situar en las zonas más vulnerables las actividades más peligrosas como la autovía, el aeropuerto, la cárcel o la subestación de transformación eléctrica.

Los resultados obtenidos de la caracterización permiten concluir que el acuífero libre de los Montes Torozos es una estructura hidrogeológicamente aislada, compuesta por una serie calcárea Pontense aparentemente subhorizontal, ligeramente acuñada, y con una pendiente de unas 2 milésimas hacia el suroeste. Estas características son las responsables de que del flujo preferencial en esta misma dirección y sentido.

Geológicamente, el páramo está constituido por una superficie estructural de calizas sensiblemente horizontales, que reposan sobre una capa de materiales impermeables de origen mixto detrítico evaporítico de la Facies Cuestas. Éstas constituye el substrato inferior a las calizas y está constituido por una serie de materiales blandos arcillosos margoso-yesíferos. Las calizas, por su parte, son de color gris, duras y con una estructura microcristalina, y se encuentran en bancos de espesor variable separados por intercalaciones margosas.

El acuífero se corresponde con la masa de agua superficial del Páramo de Torozos (identificador 400032), incluida en el Plan Hidrológica de la Cuenca del Duero de 2009, su espesor general es de 6 a 10 metros, aunque puntualmente puede alcanzar los 30 metros.

La recarga del sistema se efectúa preferentemente a través de la red de fisuración Finineógena. Por este motivo se ha desarrollado un sistema kárstico que en superficie está constituido por un sistema de dolinas, que se ajusta con las alineaciones de la red de fracturas, NE-SO y SE-NO de la fase Iberomanchega. Esto permite que la acción erosiva del agua dibuje una red hidrográfica que drena el páramo hacia el SO dando lugar a amplios valles paralelos en forma de artesa. Este flujo preferente es el responsable del trazado de la red fluvial y su mayor desarrollo, y por tanto consecuente a su vez con la red de fisuración. Teniendo en cuenta estos alineamientos se han introducido los parámetros de la piezometría y el drenaje del sistema dentro del modelo de flujo hidrodinámico mediante la herramienta "Visual Modflow". La red de drenaje definida y validada en este modelo tiene un carácter interactivo, lo que facilita su uso como herramienta de gestión en la planificación de la explotación de los recursos hídricos del sistema.

Pero para la elaboración de este modelo ha sido necesario recurrir a la reconstrucción geoestadística de la superficie piezométrica del páramo, lo que ha permitido diferenciar dos zonas en el acuífero. A partir de éstas, se ha determinado el régimen de extracciones y del aforo de manantiales; y se ha modelizado y simulado el comportamiento del flujo del acuífero en régimen estacionario y transitorio. Los resultados obtenidos corroboran diversas hipótesis sobre el acuífero, entre las que está el flujo dominante hacia el SO alimentando los manantiales y arroyos más caudalosos del acuífero.

Por otra parte, a pesar de la existencia de un volumen suficiente, debido su escasa calidad, la masa de agua presenta fuertes restricciones para su aprovechamiento y

gestión debido a su composición química. Es decir, puede asumirse un incremento de las extracciones sin poner en riesgo de sobreexplotación el sistema, siempre y cuando el agua no se use para consumo humano. Respecto su funcionamiento, el acuífero, presenta unas entradas, que se produce principalmente por: a) las precipitaciones, y b) los retornos de riego; y unas salidas, asociadas con: a) el drenaje perimetral, b) el drenaje difuso entre las calizas y las arcillas, y c) por las extracciones mediante pozos. Así, en base a los datos experimentales se ha determinado que la masa de agua presenta una inercia de cuatro meses y un periodo completo de renovación de los recursos de dos años.

En lo referente la vulnerabilidad, Torozos presenta una alta vulnerabilidad a la inmisión de contaminantes, principalmente los procedentes de las actividades agrícolas y ganaderas, que serían extensivas a toda la superficie del páramo, pero también las asociadas al vertido de sustancias egeantes y/o fugas de los depósitos de combustibles a lo largo de la carretera N-601. De esta forma, se justifica la existencia de parámetros fisicoquímicos del agua que superan los límites legales permitidos . Por esta razón, la mayor parte del agua no es apta para el consumo humano, sobre todo debido a las altas concentraciones de nitrato, que duplican el máximo permitido en muchos lugares.

Validados los modelos de cantidad y calidad del recurso disponible se ha estimado la sostenibilidad de los usos actuales y potenciales del sistema a partir de la determinación de los siguientes indicadores: la fiabilidad del sistema de abastecimiento de agua, la resiliencia del sistema, la vulnerabilidad y riesgos del sistema, la integridad del sistema ambiental, la equidad en la distribución del agua, y la viabilidad económica de la explotación.

Integrando todas las variables que definen la sostenibilidad de uso del acuífero, se puede concluir que esta es buena. No obstante se debe prestar especial atención a aquellas variables que se ven influenciadas por la vulnerabilidad y calidad del agua, como serían la fiabilidad del abastecimiento en calidad y la integridad asociada al uso agrícola extensivo. De esta manera las medidas que se proponen adoptar en términos de conservación se vinculan a la protección del acuífero, con medidas que minimicen los riesgos de inmisión y/o no aumenten la vulnerabilidad del sistema, mejorando de esta manera la fiabilidad del suministro, y garantizando la satisfacción todas las demandas planteadas.

Palabras clave: balance hídrico, riesgos ambientales, contaminación, potencialidades de uso, vulnerabilidad.

SIMULATED HYDROGEOLOGICAL MODEL FOR A SUSTENABLE MANAGEMENT OF MONTES TOROZOS UNCONFINED KARSTIC AQUIFER

Germán Sanz Lobón

Environmental Science Degree. Universidad Europea Miguel de Cervantes.

Environmental Technology Postgraduate. Universidad de Vigo.

Hydrology and Hydrological Resources Management Postgraduate. Universidad de Alcalá de Henares.

Directors: Dr. Javier Taboada Castro and Dr. Roberto Martínez-Alegría López

Abstract:

The availability of water resources in equal quantity and quality for the required uses, has become the target milestone of any economic or social proposal for an entrepreneurship development. Under these assumptions, there has been lately different perception experiences concerning the evaluation of water resources and therefore a variety of management paradigms. This social change has allowed to propose new management scenarios, which be able to include more and different parameters such as: climate change, emerging contaminants, or virtual water.

In this research, The Montes Torozos' aquifer has been characterized hydrogeologically, taking into account the typical parameters: precipitation, evapotranspiration, infiltration, groundwater level, permeability, transmissivity, inertia response, exhaustion curve, extractions, runoff, alpha coefficient. The recharge, inputs and outputs were summarized on a water budget. All of them contributed to the conception of an organizational model.

Facing the conceptual model design, the recharge and drainage parameters, and their spatial placement, have been employed to archive the assessment of the resources and their reserves. On the other hand, the environmental characterization of the field workspace (physical and environmental characteristics, biota, socioeconomic issues, and, finally the landscape) allowed the computation of the used hydrological balance.

The volume of water in Monte Torozos aquifer belongs to the Duero river watershed and goes through the provinces of Valladolid and Palencia (Castilla y León, Spain), occupying an area of 1000 km². It extends between levels 750 and 880 m above sea level, and has got a population that exceeds 47000 habitants distributed in 57 municipalities. It is a region with an aged population, settlements have a low density and are far from each other, usually they located on the border of moorland or its slopes, close to the water springs. The mainly land uses historically are agriculture and Mediterranean forest, but in the last 60 years agriculture is the most extended. For this

reason, it is addressed vulnerability integration, in relation to policy, specifically in risk evaluation and risk–benefit considerations focusing the requirements of the European Community's Water Framework Directive 2000/60/EC and the Groundwater Directive 2006/118/EC. Contamination of groundwater is a complex process and full of uncertainty in regional scale. In fact, has been developed of an integrated vulnerability assessment methodology, that can be useful to effectively manage (including prioritization of limited resource allocation to monitor high risk areas) and protect this valuable freshwater source.

A geographic information system (GIS) was established for the territorial analysis, together with hydrogeological and geostatistical simulation methodologies (the used software was the SpaceStat, 4.08). The results, allows their spatial analysis and visualization, as well as its evolution over the last 50 years. Land-use temporal evolution mapping was performed using a remote sensing based methodology, taking into account the aerial frames of the historical flights of 1956/59 and 1977/83 and CORINE (Coordination of information on the environment) Land Cover (1990, 2000 and 2006) as spatial information.

Geomorphologically this moorland is a morph structural unit, that was originated by sedimentary process in the center of the Duero basin during the Tertiary, with a slight influence of the Neotectonics process. Montes Torozos is a karstic unconfined aquifer. This feature turns the aquifer particularly vulnerable to the emission of external pollutants. The vulnerability assessment was the preliminary and most important, to the estimation of the system's susceptibility (extrinsic vulnerability) and vulnerability (intrinsic vulnerability). The international indices used were, for the intrinsic vulnerability assessment the DRASTIC and the susceptibility index (SI) for the specific vulnerability. The research insights suggest that the establishment of a pattern of effective governance is mandatory as the future highway, the prison and the airport are overlaying the most vulnerable areas of the aquifer and therefore provide policy makers guidance in overcoming urban water governance challenges.

The obtained results indicates that the Torozos Limestone aquifer is unconfined and a hydrogeological isolated structure. It is a Messinian (Pontiense) subhorizontal limestone, slightly wedge shaped, with a slope of about two thousandths southwest. The main stream, which is built by the aquifer's slope and thickening, has the same direction. Geologically, could be considered as a horizontal limestone strata laying on a detrital mixed formation of evaporate facies of the Facies Cuestas. The Facies Cuestas is the lower substrate formed by limestone and a series of soft clay loam-gypsum materials. The limestones are grey, hard and showing a microcrystalline structure in banks of varying thickness separated by marly intercalations. The area corresponds to a tectonic zone only modified by diagenetic fracturation, allowing the development of karst channels.

The aquifer is included in the Watershed's Management Plan 2009 like Body Water of Páramo de los Montes Torozos. Its overall thickness is approximately 6-10 meters, but can reach 30 meters promptly.

The body water recharge's system is primarily kept in line by the fracture network. A karstic fracturation system was adjusted simulating the sinkhole system alignments NE, SW and SE-NW. The alignment of the surface found on the moor allows that the water erosion and the river network drains the moor towards the SW and almost parallel and generating large valleys. Therefore, this preferential flow towards South-west has determined the course of the hydrographic network, likewise coherent by the fracture network. Direction. Drainage and piezometry parameters, together with the aquifer border conditions, have been subsequently embedded in a hydrodynamic flow model for which was used the software "Visual Modflow". The drainage network of this model is interactive, which facilitates its use as a management and planning tool in the development of a water resources system, based on an attempt/error methodology.

To estimate the model's parameters of the aquifer has been used geostatistical methodologies, namely Gaussian kriging with backtransform, allowed the reconstruction of the moor's piezometric level, smoothing the outliers and a representation in the original variable unit. It was possible to distinguish two zones with different structural behavior in the aquifer. On the other hand piezometric level, extraction system and water spring distribution, allowed the aquifer behavior simulation such as flow steady and transient state. The results validated a dominant flow towards the SO.

The hydrological budget is positive and allows to increase withdrawals without overexploitation risk. The recharged is directly due to rainfall and drawn by: a) hydrographic radial net, b) trickle drainage between limestone and clays, and c) pumping wells. The watershed shows an annual inertia of four months and a water renovation period of two years.

The aquifer environmental characteristics are defined by its intrinsic characteristics as well as the anthropogenic activities. Montes Torozos' aquifer Shows high values of intrinsic and extrinsic vulnerability. Whoever is a highly vulnerable aquifer to pollutant discharges, mostly the ones from agricultural and livestock activities along the full surface of the moor. Together with the discharges of de-icing and anti-icing substances (typically road salt) and/or leaking fuel tanks along the N-601 constitutes the main hazards to forthcoming monitoring and control. There are physical and chemical water parameters exceeding the legal allowed limits. For this reason most of this water is unfit for human consumption, mostly due to the high nitrate concentrations, twice the maximum allowed in many places.

Despite the existence of enough water volume it must be stressed its low quality since there are strong restrictions on its use and management. Being an unconfined aquifer

is extremely vulnerable to direct emission of pollutants from topical and diffuse. The sustainability of the water body is good, primarily due to its high resilience and viability management.

Validated models (quantity and quality) allow us to estimate the sustainability of current and potential uses of the system. The flow model calibration is fairly good. For this reason, model can be used for scenarios predictions for different management situations..

Sustainability has been achieved using the following indicators: the assurance of water resources available, the resilience of aquifer after pollutant episode, the vulnerability and risks of likelihood of contamination, the environmental integrity of system (legislation, evolution, cross-compliance, and spatial planning), the equity in water distribution, and the economic viability of extraction.

Should be stressed that those variables are core topics in the vulnerability assessment and water quality classification. Hence the steps proposed aims the system's conservation and special attention is needed on the monitoring of those variables related to the aquifer protection measures and risk minimization such as emission and/or others that could increase vulnerabilities therefore improving the accuracy for further feasibility solutions.

Key Words: hydrological balance, environmental risk, potential water use, vulnerability.



ÍNDICE

Índice de tablas.....	3
Índice de figuras	5
CAPÍTULO I	9
1.1 INTRODUCCIÓN	10
1.2 JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS	16
CAPÍTULO II	17
2.1 ANTECEDENTES	19
2.1.1 Estado del arte de los modelos y los sistemas	19
2.1.2 Aproximación a la zona de estudio	22
2.1.3 <i>Know how</i> de las tecnologías y técnicas de análisis espacial	23
2.1.4 Sostenibilidad	33
2.1.5 Medio natural y otras fuentes documentales	34
2.2 METODOLOGÍA	35
2.2.1 Planteamiento: revisión bibliográfica y recopilación de datos	35
2.2.2 Adquisición de nuevos datos y reconocimiento del entorno.....	42
2.2.3 Desarrollo de herramientas	47
2.2.4 Creación de modelos.....	50
2.2.5 Determinación de la sostenibilidad	60
CAPÍTULO III	63
3.1 MARCO DE TRABAJO	65
3.1.1 Torozos, toponimia y contexto histórico.....	65
3.1.2 Medio físico	65
3.1.3 Medio biótico	86
3.1.4 Medio socioeconómico	90
3.1.5 Medio perceptual.....	93
3.2 PARÁMETROS HIDROGEOLÓGICOS DEL ACUÍFERO	96
3.2.1 Cálculo de la piezometría	97
3.2.2 Cálculo de la inercia	100
3.2.3 Permeabilidad	101
3.2.4 Transmisividad	102
3.2.5 Cálculo de α	102
3.2.6 Aproximación a la curva de agotamiento	103
3.2.7 Recarga.....	105
3.2.8 Cálculo de las aportaciones:.....	105
3.2.9 Cálculo de las extracciones: drenaje y pozos	111
3.2.10 Balance hídrico.....	114



CAPÍTULO IV	117
4.1 CONSTRUCCIÓN DEL MODELO	119
4.1.1 Definición de objetivos.....	120
4.1.2 Estructura y datos del modelo	124
4.1.3 Dominio	126
4.1.4 El modelo en Visual Modflow 2012.....	126
4.2 LA VULNERABILIDAD	143
4.3 SIMULACIÓN DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES.....	163
4.3.1 Unconfined aquifer vulnerability related to topical pollution episodes.....	163
4.3.2 Vulnerabilidad del acuífero de los Montes Torozos por soluciones egeantes.....	168
CAPÍTULO V	177
5.1 LA SOSTENIBILIDAD	179
5.1.1 Fiabilidad del sistema de abastecimiento de agua.....	179
5.1.2 Resiliencia	180
5.1.3 Vulnerabilidad y riesgos	180
5.1.4 Integridad del sistema ambiental	181
5.1.5 Equidad en la distribución del agua	185
5.1.6 Viabilidad económica de la explotación	185
5.1.7 Sostenibilidad integral	185
5.2 CONCLUSIONES	187
5.3 FUTUROS DESARROLLOS	191
BIBLIOGRAFÍA	193



Índice de figuras

Fig. 1. Esquema metodológico.....	35
Fig. 2. Esquema espectro de reflectancia de la clorofila	41
Fig. 3. Ejemplos del resultado de la aplicación de las técnicas de teledetección.....	41
Fig. 4. Mapa de la cuadrícula de muestreo de 10x10 km	43
Fig. 5. Ejemplo del interior de un pozo	44
Fig. 6. Esquema de las relaciones Realidad-Modelador-Modelo.....	51
Fig. 7. Localización del páramo de los Montes Torozos	66
Fig. 8. MDET del páramo con la situación de las estaciones meteorológicas.....	67
Fig. 9. Diagrama ombrotérmico de la estación de Villanubla.....	68
Fig. 10. Diagrama de distribución de ETP y P de la estación de Villanubla.....	68
Fig. 11. Diagrama anual del balance hídrico de la estación de Villanubla.....	69
Fig. 12. Estructura geológica de la Cuenca del Duero	69
Fig. 13. Estructura del páramo.....	70
Fig. 14. Mapa geológico.....	71
Fig. 15. Resultado del MDET artificial interpolado usado como muro del acuífero	73
Fig. 16. Fotografía del contacto entre el nivel calcáreo y el nivel terrígeno margoso.....	74
Fig. 17. Mapa de localización de los piezómetros de la CHD.....	75
Fig. 18. Columnas estratigráficas de los piezómetros	75
Fig. 19. Mapa de alineamiento de las dolinas	76
Fig. 20. Mapa de la distribución de las dolinas respecto de la piezometría	77
Fig. 21. Mapa de distribución de dolinas.....	79
Fig. 22. Fotografía de valle en forma de artesa. Arroyo Valcaliente. Cigales.....	80
Fig. 23. Mapa de pendientes medias en grados.....	81
Fig. 24. Gráfico que muestra la cantidad de superficie de la masa de agua.....	82
Fig. 25. Mapa edafológico.....	85
Fig. 26. Mapa de series de vegetación.....	86
Fig. 27. Fotografía del embalse de la Santa Espina	88
Fig. 28. Fotografía de una cigüeña blanca en la Mudarra	89
Fig. 29. Evolución de los usos del suelo según CORINE.....	91
Fig. 30: Ortofotografías del núcleo urbano de Villanubla.....	91
Fig. 31. Cambios en la estructura parcelaria después de los proyectos de concentración	92
Fig. 32. Gráfico en tanto por ciento de los aprovechamientos del suelo.....	92
Fig. 33. Construcción del un parque eólico	93
Fig. 32. Fotografía de la vista desde el mirador del Castillo de Montealegre de Campos.....	94
Fig. 35. Mapa de encuadre de las Unidades Hidrogeológicas de la Cuenca del Duero.....	96
Fig. 36. Mapa de puntos muestreados usados para la piezometría.....	97
Fig. 37. Mapa y variograma resultante de la interpolación del Modelo 1 con SpaceStat.....	98
Fig. 38. Mapa y variogramas resultantes de la interpolación del Modelo 2 con SpaceStat.....	99
Fig. 39. Mapa piezométrico interpolado frente a mapa de la varianza.....	100
Fig. 40. Gráfico de relación precipitación-caudal para el aforo de Villanubla.....	100
Fig. 41. Mapa de la distancia de la fuente de Villanubla al eje hipotético del acuífero.....	101



Fig. 42. Gráfico de la curva de agotamiento de Villanubla.....	103
Fig. 43. Gráfico de la recta teórica de agotamiento de Villanubla.....	104
Fig. 44. Gráfico de la recta real de ajuste del neperiano de los caudales de Villanubla.....	104
Fig. 45. Gráfico comparativo de las evapotranspiraciones calculadas.....	107
Fig. 46. Mapa de polígonos de Thiessen con la serie larga de aportaciones superficiales	109
Fig. 47. Cambio del estado del Manantial de Castrovita.....	111
Fig. 48. Embalse de la Santa Espina, río Bajoz en agosto de 2007y en agosto de 2012	112
Fig. 49. Mapa de las fuentes y manantiales inventariados	113
Fig. 50. Mapa de extracciones subterráneas por Unidad de Demanda Agraria	114
Fig. 51. Esquema resumen del proceso de modelado	120
Fig. 52. Esquema y terminología del modelo matemático	121
Fig. 53. Diagrama de un sistema hidrogeológico.....	123
Fig. 54. Esquema resumen de la relación de los parámetros y las ecuaciones de Modflow	125
Fig. 55. Modelo conceptual del acuífero de los Montes Torozos	127
Fig. 56. Esquema de funcionamiento del programa Visual Modflow.....	130
Fig. 57. Cuadro de magnitudes del modelo.....	131
Fig. 58. Cuadro de valores iniciales de los parámetros hidráulicos	131
Fig. 59. Ventanas para establecer la discretización del sistema.....	132
Fig. 60. Imagen comparativa de las condiciones de contorno	132
Fig. 61. MDET introducido en el modelo para simular la superficie del páramo	133
Fig. 62. Mapa del muro de las calizas interpolado por Visual Modflow.....	133
Fig. 63. Mapa del muro de las calizas corregido.	134
Fig. 64. Imagen de la piezometría asignada a partir de los resultados de SapceStat.....	134
Fig. 65. Imágenes de los menús de la conductividad y el coeficiente de almacenamiento	134
Fig. 66. Imagen con la localización de los manantiales incorporados al modelo.	135
Fig. 67. Distribución espacial de los pozos y los parámetros introducidos en el modelo	135
Fig. 68. Imagen con las ventas que modifican las condiciones de recarga y ETR.....	136
Fig. 69. Imagen del modelo con los manantiales, los pozos y el perímetro importados.....	136
Fig. 70. Venta de salida gráfica del modelo.....	137
Fig. 71. Mapa de resultados de obtenidos de la piezometría de Visual Modflow	138
Fig. 72. Imagen de corte transversal realizada con Visual Modflow	138
Fig. 73. Imagen del resultado de la simulación de la trayectoria de las tres partículas	139
Fig. 74. Imagen del resultado del balance y de las entras y salidas	139
Fig. 75. Cuadro de calibración de Visual Modflow.....	140
Fig. 76. Imagen comparativa de la piezometría calculada por el modelo de 2010 y 2014	141
Fig. 77. Gráfico de sostenibilidad	185



Índice de tablas

Tabla 1. Reproyecciones y operaciones de transformación de coordenadas vectoriales.	38
Tabla 2. Reproyecciones y operaciones de transformación de coordenadas <i>raster</i>	40
Tabla 3. Leyenda CORINE de tercer nivel.	49
Tabla 4. Valores del parámetro D del DRASTIC.	55
Tabla 5. Valores del parámetro R del DRASTIC.	55
Tabla 6. Valores del parámetro A del DRASTIC.	55
Tabla 7. Valores del parámetro S del DRASTIC.	56
Tabla 8. Valores del parámetro T del DRASTIC.	56
Tabla 9. Valores del parámetro I del DRASTIC.	56
Tabla 10. Valores del parámetro C del DRASTIC.	56
Tabla 11. Valores del parámetro D del IS.	57
Tabla 12. Valores del parámetro R del IS.	57
Tabla 13. Valores del parámetro A del IS.	57
Tabla 14. Valores del parámetro S del IS.	57
Tabla 15. Valores del parámetro T del IS.	57
Tabla 16. Valores del parámetro US del IS.	58
Tabla 17. Factores de ponderación de cada parámetro de DRASTIC.	59
Tabla 18. Categorías de vulnerabilidad de DRASTIC.	59
Tabla 19. Factores de ponderación de cada parámetro de IS.	59
Tabla 20. Categorías de vulnerabilidad de IS.	59
Tabla 21. Estaciones meteorológicas empleadas y sus polígonos de Thiessen.	66
Tabla 22. Correlación de la temperatura y la precipitación.	67
Tabla 23. Valores de las propiedades de los materiales geológicos de la serie de las cuevas.	80
Tabla 24. Litológica de la IDE-Duero.	82
Tabla 25. Evolución de la superficie de usos de suelo CORINE en tanto por ciento.	90
Tabla 26. Parámetros de interpolación del Modelo 1.	98
Tabla 27. Parámetros de interpolación del Modelo 2.	99
Tabla 28. Precipitación frente a caudal.	101
Tabla 29. Precipitación frente al logaritmo de los caudales.	103
Tabla 30. Distribución de la precipitación, temperatura, ETP y ETR.	106
Tabla 31. Aportaciones superficiales estimadas para la Masa de agua DU-40032.	107
Tabla 32. Aportaciones medias estimadas para los polígonos de Thiessen.	108
Tabla 33. Distribución mensual de las aportaciones.	108
Tabla 34. Tabla de volumen total mensual.	109
Tabla 35. Lluvia útil calculada.	110
Tabla 36. Infiltración total estimada.	110
Tabla 37. Infiltración ponderada a los polígonos de Thiessen.	110
Tabla 38. Caudales medios medidos.	112
Tabla 39. Volúmenes totales extraídos por UDA.	114
Tabla 40. Valores numéricos mensuales del balance experimental.	115
Tabla 41. Precipitación y ETR anuales totales de la serie climática.	128



Abreviaturas

Agencia Estatal de Meteorología	AEMET
Asociación Española de Ecología Terrestre	AEET
Boletín Oficial del Estado	BOE
Buenas Prácticas Ambientales	BPA
Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas	CEDEX
Centro de Información Territorial de la Junta de Castilla y León	CIT
Centro Nacional de Información Geográfica	CNIG
Confederación Hidrográfica del Duero	CHD
Consejo de Europa	CE
Coordination of Information on the Environment Project	CORINE
Directiva Marco del Agua	DMA
Energía en Castilla y León	EREN
Índice D ept <i>h</i> water, R echarge, A quifer media, type of S oil, T opography, vadose zone I mpact, hydraulic C onductivity	DRASTIC
Índice de Susceptibilidad	IS
Infraestructura de Datos Espaciales	IDE
Infraestructura de Datos Espaciales del Duero (Mirame IDE Duero)	IDE-Duero
Infraestructura de Datos Espaciales de España	IDEE
Instituto Geográfico Nacional de España	IGN
Instituto Geológico y Minero de España	IGME
Instituto Nacional de Estadística (España)	INE
Instituto para la Conservación de la Naturaleza	ICONA
Instituto Tecnológico Agrario de Castilla y León	ITACYL
Modelo Digital de Elevaciones del Terreno	MDET
Mapa Geológico Nacional	MAGNA
Mapa Topográfico Nacional	MTN
Ministerio de Obras Públicas	MOPU
Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente	MAGRAMA
Organización de las Naciones Unidas para la Educación	UNESCO
Organización de las naciones unidas para la Alimentación y la Agricultura	FAO
Plan Nacional de Investigación de Aguas Subterráneas	PIAS
Plan Nacional de Ortofotografía Aérea	PNOA
Política Agraria Común	PAC
Real Academia Española	RAE
<i>Système Pour l'Observation de la Terre</i>	SPOT
Sociedad de Investigación y Explotación Minera de Castilla y León	SIEMCALSA
Unidad de Demanda Agraria	UDA
Unión Europea	UE
<i>United States Department of Agriculture</i> (Dep. de Agricultura de E.E.U.U)	USDA
<i>United States Geological Survey</i> (Servicio Geológico de de E.E.U.U)	USGS
<i>The Water Information System for Europe</i>	WISE

CAPÍTULO I:

Introducción, justificación y objetivos



1.1 INTRODUCCIÓN

En la situación socioeconómica actual, en la que parece que todo gira en torno a la economía, es fundamental aportar una visión general y holística a la hora de estudiar cualquier problemática. Este trabajo trata de aportar una visión integral a la gestión del recurso hídrico. Mientras que el "cambio climático" y el "calentamiento global" aparecen en todos los medios de comunicación, la gestión de los recursos naturales, especialmente aquellos que tradicionalmente se ha dado por sentada su disposición, como es el caso del agua, no ha suscitado un debate tan intenso, pero por efecto de la percepción de lo limitado del recurso, desde hace, relativamente pocos años existe un cambio en la conciencia social y política de la importancia de los recursos hídricos.

Sin entrar en la discusión de la existencia y las consecuencias del cambio climático, aquí se van a presentar una serie de datos climatológicos a partir de los cuales se ha realizado el balance y el modelo hidrológico, y con ellos se han establecido unas pautas para el desarrollo sostenible de la zona. A pesar de que no se han traducido los recursos inventariados en su valor monetario, ya que no es el objetivo de este trabajo, sí se ha tratado de aportar algo al conocimiento hidrogeológico, ambiental y socioeconómico, de un entorno cada vez más cambiante. Por este motivo, este trabajo pretende ser una herramienta de apoyo a una planificación de los recursos naturales donde prime el uso eficiente y la racionalidad, frente a la construcción o puesta en marcha de nuevas explotaciones.

El contexto socioeconómico y ambiental global gira en torno a tres pilares: el agua, la energía, y el territorio, todos ellos interrelacionados mediante diversos vectores condicionados por la tecnología. La aceptación del recurso hídrico como piedra angular transversal de la economía, se ha traducido en un cambio en su percepción. Hoy en día, el agua es un recurso escaso y estratégico para el desarrollo, lo que ha supuesto un cambio en los paradigmas de la planificación hidrológica. Para asumir este cambio es necesario un desarrollo de nuevas técnicas y tecnologías que permitan valorar de forma adecuada la cantidad y calidad del recurso hídrico, con el fin de establecer y optimizar sus potencialidades de uso [127, Sanz. 2010].

Históricamente, en las cuencas mediterráneas la disponibilidad de los recursos hídricos ha sido un factor limitante debido por un lado a factores ambientales, como la distribución y cuantía de las precipitaciones; y a factores de origen humano como el aumento de la demanda hídrica, procedente de los sectores agropecuario e industrial o el deterioro de la calidad de los recursos asociados a procesos de contaminación. Estos procesos de origen no natural han significado la modificación en los regímenes hídricos tanto superficiales como subterráneos [109, Morán 2012].

Las políticas hidráulicas que se articularon en el pasado se basaban en la intervención de la red fluvial o de los sistemas hidrogeológicos subterráneos mediante grandes obras de ingeniería. En muchas ocasiones sin repercutir su coste en el precio del agua, ya que su finalidad era promover el desarrollo, primero en la agricultura y posteriormente en la industria. Sin embargo en la actualidad y con la entrada en vigor de la Directiva Marco del Agua (DMA) 60/2000 del Consejo Europeo [27, Consejo Europeo 2000], las políticas de planificación hidrológica tienen que satisfacer las necesidades de la sociedad a la vez que deben buscar el "buen estado" tanto



cualitativo (químico y ecológico) como cuantitativo de las masas de agua y la recuperación de los costes asociados al uso y tratamiento de los recursos.

Las políticas hidrológicas tienen que encaminarse hacia la optimización de la gestión a lo largo de todo el ciclo del aprovechamiento de los recursos, y para ello es necesario que éstas tengan un carácter global e interdisciplinar, que abarque conocimientos propios de las ciencias experimentales, jurídicas, sociales y de la ingeniería. Todo ello con el objetivo de generar un conocimiento de base científica necesario para abordar la gestión del agua en el siglo XXI. Su fin último, el aprovechamiento racional, eficiente, de un recurso escaso, calificado como *vital* (necesario para la vida), y que en ocasiones, puede convertirse en un foco y vector de propagación de enfermedades; debe ser estudiado y garantizado mediante las mejores y más modernas tecnologías disponibles. Entre estas técnicas los modelos matemáticos, apoyados en la elaboración de índices, en los balances hídricos y los estudios multitemporales de evolución del territorio se están conformando como herramientas únicas, que además de describir el funcionamiento del área de estudio, y ayudar a la toma de decisiones, son capaces de simular posibles escenarios futuros sobre los cuales se pueden realizar inferencias de carácter predictivo. Esta capacidad de generar escenarios futuros, se antoja aun más útil en el actual periodo de incertidumbre climática donde el cambio de las variables climáticas supone una alteración del ciclo hidrológico y por tanto de la disponibilidad de los recursos.

El Diccionario de la Lengua Española [117, Real Academia Española 2010] define el término “modelo” como: “un esquema teórico, generalmente en forma matemática, de un sistema o de una realidad compleja, que se elabora para facilitar su comprensión y el estudio de su comportamiento”. Esta labor de idealización requiere una fuerte base teórica que otorgue fiabilidad a los resultados. Para realizar el análisis integrado ha sido necesaria la valoración de diversos aspectos relativos a la toma de decisiones tales como: la tipología de los distintos modelos, su requerimiento de datos; su estructura; y el tipo y formato de los resultados aportados.

Con respecto a los índices, la vulnerabilidad y el riesgo, su definición científica en aguas subterráneas data de finales de los años 60 del pasado siglo. Pero por cuestiones técnicas y formales a lo largo de estos últimos 50 años, se han desarrollado innumerables definiciones y metodologías, en ocasiones contradictorias [6, Auge 2004]. Para el desarrollo de este trabajo y con el fin de evitar una discusión de difícil resolución, se ha optado por asumir tanto la definición como las metodologías desarrolladas en los trabajos de Silva [134, Silva et al. 2008], Albuquerque [3, Albuquerque et al. 2013] y Sanz [129, Sanz et al. 2014] (cuyo texto completo se incluye en el epígrafe 4.2 de esta memoria).

Pero los índices de vulnerabilidad intrínseca y extrínseca, se revelan aun más útiles al combinarlos con estudios multitemporales de evolución espacial. A pesar de que en ambos casos se trata de técnicas ya muy trabajadas desde el punto de vista de la teledetección, los análisis mediante la combinación de coberturas en sistemas de información geográfica (SIG), o incluso desde la simple superposición de mapas, como demuestran los trabajos de: Kreigler [82, Kreigler et al. 1969]; Slater [135, Slater 1975]; Schowengerdt [133, Schowengerdt 1983]; o Carper [19, Carper 1984]. Estos trabajos dieron lugar a la realización de estudios multitemporales



comparativos mucho más recientes como los realizados por: Fraser [50, Fraser et al. 2003]; Wang & Zhao [153, Wang & Zhao 2009]; o Hassan Akhtar [64, Hassan 2012].

El carácter integrador que pretende tener este trabajo sí se puede clasificar como novedoso, ya que ha servido, además de como síntesis metodológica, como una primera interpretación conjunta de los resultados obtenidos a partir de cada uno de las distintas técnicas empleadas: teledetección, fotointerpretación, evolución multitemporal, cálculo de índices de vulnerabilidad y modelos hidrogeológicos y análisis de sostenibilidad.

Para que la metodología planteada y desarrollada fuera lo suficientemente robusta se ha decidido comparar los resultados del análisis espacial, con el índice de vegetación NDVI calculado a partir de las escenas del satélite SPOT (*Système Pour l'Observation de la Terre*) de 2005 y 2008, técnica de amplio reconocimiento y aceptación científica tanto en publicaciones actuales como pasadas, entre las que cabe destacar: Crippen [29, Crippen 1990]; Bradley [14, Bradley et al. 2007]; o Barroso [9, Barroso & Monteiro 2010].

Respecto a la descripción del acuífero de los Montes Torozos, se han analizado sus características cualitativas y cuantitativas. Sin embargo, conocer esas características no ha sido suficiente, ya que dicha información solo es válida para un tiempo y un contexto específico. Por este motivo ha sido necesario además, establecer la dinámica de su comportamiento, su evolución y sus cambios ante diversas situaciones.

Aparte de la determinación precisa de la geometría del acuífero (espesores, disposición y límites) y de sus propiedades hidrogeológicas (conductividad, transmisividad y permeabilidad), la base de la caracterización del acuífero es el balance hídrico, a partir de él, se han determinado las entradas (aportaciones) y las salidas (extracciones), que condicionan el régimen del acuífero, los volúmenes de recursos y las reservas disponibles.

Las salidas presentan una doble componente, por un lado las naturales, como los manantiales; y por otro las artificiales, como los pozos de bombeo. Este tipo de extracciones presenta problemas asociados a la explotación de las aguas subterráneas y requiere la implementación de medidas y acciones, tanto administrativas como técnicas, que permitan aprovechar de forma sostenible en el tiempo los recursos hídricos. En la península Ibérica pocas regiones han escapado a esta situación, es decir, las causas y los efectos han sido similares en todas las cuencas, especialmente en lo referente a la sobreexplotación, y en el deterioro de la calidad de las aguas [90, López-Geta et al. 2005].

La correcta gestión de las aguas subterráneas requiere un preciso conocimiento del flujo y de las inercias en los niveles de agua subterránea ante distintas acciones exteriores (la recarga natural, las extracciones, el drenaje natural, el efecto de ciertas obras, etc.). Los principios teóricos fundamentales que rigen todos estos fenómenos son: la teoría elemental del flujo de agua en los medios porosos (Ley Darcy), y la Hidráulica de Captaciones [33, Custodio & Llamas 2001].



La aplicación de estos principios no supondría mayor problema si no fuera porque los acuíferos presentan una fuerte variabilidad espacial y temporal. Las complejas relaciones entre los límites de los acuíferos, el complejo sistema de recarga y descarga, así como las variaciones estacionales y anuales de las aportaciones, suponen un aumento de complejidad a la hora de estudiar la unidad hidrogeológica. Por este motivo el uso de ecuaciones, o métodos simples de cálculo, no es más que una primera aproximación, que en muchos casos y debido a la falta de datos puede ser inaceptable. A pesar de ello los modelos matemáticos aplicados a la hidrogeología son una potente herramienta de trabajo que permite manejar eficazmente situaciones complejas y tratar al sistema acuífero como un todo, partiendo de unas simplificaciones arbitrarias. Ya en el siglo XVI, Galileo afirmaba que "el universo está escrito en lenguaje matemático" y cuatro siglos más tarde, Dirac sostiene que "toda ley física se ha de poder expresar en términos matemáticos bellos", así a lo largo de la historia de la civilización, pocas cosas ha habido tan permanentes como el uso de técnicas matemáticas para describir los fenómenos de la naturaleza [126, Sanz 2008].

La herramienta de modelado utilizada es la aplicación informática "Visual Modflow 2012". El modelado se reduce al medio saturado, y únicamente se considerará el problema directo, es decir, conocido el acuífero, simular sus respuestas ante acciones externas [33, Custodio & Llamas 2001].

Los modelos de aguas subterráneas son, en general, de concepción relativamente reciente. Los primeros modelos de simulación aparecieron en el primer cuarto del siglo XX y eran principalmente de arena, o verticales de fluido viscoso, y su finalidad se reducía a estudios de laboratorio. Durante el segundo cuarto del siglo, se continuó con la misma tónica y sólo a partir de 1950 y especialmente a partir de 1960, es cuando empieza un vertiginoso desarrollo, basado en las mallas de capacidades y resistencias (modelos eléctricos), y en el uso de ordenadores cada vez más potentes y técnicas de cálculo de gran eficacia. Finalmente, en los últimos años, la evolución ha sido muy rápida y es difícil prever los logros futuros.

Además de los modelos cuantitativos, en la actualidad se están desarrollando modelos para determinar la composición química del agua subterránea, o para conocer los movimientos y la dispersión de fluidos miscibles, o de la distribución espacial de los posibles contaminantes. Pero debido a su estado incipiente y las limitaciones impuestas por los datos disponibles, combinar ambos modelos es una tarea inabordable por el momento. Y es en este campo en el que posiblemente se producirá un desarrollo más espectacular en los próximos años, siempre que se consigan superar las dificultades actuales de definición del problema, de toma de datos y de falta de conocimientos básicos.

El proyecto trata de aplicar las técnicas propias de los modelos hidrológicos y de la geoestadística para la caracterización, gestión y determinación de la sostenibilidad del acuífero 02.07 de los Montes Torozos (masa número 400032) de la Cuenca del Duero [26, Confederación Hidrográfica del Duero 2013]. Además se busca establecer relaciones causa-efecto entre los niveles de contaminación detectados y las actividades antrópicas desarrolladas en la zona de estudio, ya que la intensa explotación de las aguas subterráneas, llevada a cabo especialmente durante la



segunda parte del pasado siglo XX, y la falta de una planificación hídrica ha dado lugar a una serie de problemas relacionados con el aprovechamiento de los recursos.

Este trabajo tratará de simplificar la realidad en un modelo, primero conceptual y luego numérico, pormenorizando a lo largo del siguiente contenido: 1) Introducción; 2) Justificación y Objetivos; 3) Antecedentes; 4) Metodología; 5) Descripción del Marco de Trabajo; 6) Caracterización Hidrogeológica; 7) Construcción del Modelo; 8) Cálculo de la Vulnerabilidad; 9) Simulaciones; 10) Determinación de la Sostenibilidad; 11) Conclusiones.



1.2 JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS

Este trabajo pretende aportar un conocimiento más profundo de las características y del comportamiento hidrogeológico del acuífero calcáreo libre de los Montes Torozos. Con este fin, y el de satisfacer la demanda social de la responsabilidad ambiental y el desarrollo sostenible, se han planteado las siguientes metas:

1. Caracterizar de forma integral la masa de agua y el entorno de afección del acuífero.
2. Cartografiar aquellas estructuras geológicas de modelado kárstico, como dolinas y/o uvalas que pudieran tener incidencia sobre los mecanismos de recarga y/o drenaje del acuífero.
3. Valorar la cantidad de recursos hídricos y sus propiedades físico-químicas para determinar el cualitativo y cuantitativo de la masa de agua.
4. Analizar la validez de las muestras recogidas hasta la fecha, para su posterior aplicación de técnicas geoestadísticas, con el fin de establecer un mapa de vulnerabilidad intrínseca y extrínseca valorando los riesgos existentes, respecto de los focos de contaminación puntual y difusa identificados en el análisis ambiental de la unidad acuífera.
5. Analizar espacio-temporalmente la evolución del área de trabajo.
6. Estimar la recarga del sistema a partir de los datos meteorológicos de precipitación captada, para una serie temporal superior a 30 años.
7. Elaborar un modelo conceptual, que permita comprender el funcionamiento hidrogeológico de la unidad.
8. Establecer un balance hídrico.
9. Modelar la geometría del acuífero y los parámetros geohidráulicos mediante el uso de los soportes lógicos (software) adecuados, con el fin de construir un modelo de flujo subterráneo interactivo válido como herramienta de apoyo para la gestión sostenible del recurso hídrico.
10. Calibrar y validar el modelo en régimen estacionario y transitorio para poder plantear diferentes escenarios.
11. Determinar la sostenibilidad actual y futura del acuífero, mediante el estudio de las potencialidades de uso que presenta esta unidad.

CAPÍTULO II:

Antecedentes y metodología



2.1 ANTECEDENTES

El carácter multidisciplinar de esta investigación ha obligado a diferenciar tres grandes bloques de estado del conocimiento actual: por un lado los modelos, por otro el vinculado con la caracterización hidrogeológica de la zona de afección sobre la que se ha realizado la investigación, y un tercer ámbito asociado a las técnicas y/o tecnologías relacionadas con los análisis espaciales (geoestadísticos, numéricos, hidrogeológicos, vulnerabilidad - riesgo y evolución multitemporal).

El método de documentación, se ha realizado mediante la recopilación de libros, revistas, artículos científicos, publicaciones digitales, blogs, enlaces *web*, o cualquier otra forma de difusión del conocimiento científico accesible, pero sin perseguir, por las características de este texto, elaborar una recopilación exhaustiva de todas las referencias bibliográficas existentes de las distintas materias.

Se puede afirmar que como punto de partida se ha utilizado el proyecto fin de carrera titulado "Caracterización y Sostenibilidad del acuífero Libre de los Montes Torozos" [125, Sanz 2007] y los proyectos fin de máster "Valoración de Modelos Matemáticos de Flujo Subterráneo como Herramientas de Gestión Integral de Recursos Hídricos" [126, Sanz 2008] y "Modelo Hidrogeológico para la Gestión Sostenible del Acuífero Superficial Calcáreo de los Montes Torozos" [127, Sanz 2010]. A pesar de su cita obligada, estos trabajos por su escaso impacto no deben considerarse como referentes para la elaboración de esta tesis.

2.1.1 Estado del arte de los modelos y los sistemas

Cuando se observa y describe algún objeto, se analizan las diversas características presentes en él (color, forma, textura, ...), algunas de ellas se perciben directamente, pero otras requieren instrumentos de medida (peso, densidad, temperatura, etc.) para una aproximación más precisa. Pero conocer todas esas características no permite describir de manera adecuada a ese objeto, ya que dicha información se toma en un tiempo específico y bajo alguna situación o contexto determinado. Por lo que en muchos casos, se precisa además describir el comportamiento del objeto a lo largo del espacio y del tiempo, lo que implica adicionalmente estudiar y expresar su evolución frente a distintas situaciones.

Al referirse al "objeto", se debe hacer de la manera más general posible, ya que se puede aplicar el concepto tanto a objetos materiales, como inmateriales, fenómenos o procesos; los cuales por su propia naturaleza poseen cualidades muy diferentes específicas a cada clase [53, García-Franchini 2005].

Incluso se puede hacer referencia a un conjunto complejo de elementos funcionales directa o indirectamente relacionados entre sí en una red causal denominado sistema. Si existe alguna influencia entre los componentes del sistema y su entorno exterior, se habla de sistemas abiertos; por el contrario, cuando estos componentes no tienen ningún tipo de relación con el entorno, el sistema se denomina cerrado.



La definición de modelo, a pesar de su sencillez (un modelo es un objeto que sustituye o representa a otro para estudiarlo en una situación diferente) posee infinidad de connotaciones que hacen del proceso de construcción de modelos (modelar o modelizar) una tarea compleja que a pesar de su marcado carácter científico tiene su parte artística [130, Sanz 2007]. De esta definición se desprende que la acción básica de un modelo es representar o sustituir a un objeto dado, sin que exista ningún tipo de limitación en cuanto a las características del modelo para que éste represente al objeto. Luego la cualidad de representación es una condición convencional entre las personas que estudian el objeto; sin embargo ese acuerdo nunca es tácito y resulta importante que el modelo posea alguna de las cualidades del objeto que representa, de tal manera que se puedan observar en él los cambios que un proceso realiza sobre el modelo e inferir que esto mismo, en la adecuada proporción o adecuación, le ocurrirá al objeto en una situación similar.

Son los modelos que evolucionan los que han centrado nuestro interés, ya que no solo permiten predecir de qué manera se va a comportar el objeto modelado, sino que además la variación de las condiciones de contorno va a permitir hacer pronósticos y diseñar diferentes escenarios. En estos casos las ecuaciones matemáticas y las gráficas son herramientas de modelado muy útiles, capaces de mediar entre el mundo (los hechos) y la teoría (la explicación del comportamiento).

La definición más general de modelo se corresponde con “construcciones teóricas que representan elementos y procesos físicos, biológicos o sociales, con un conjunto de variables y un conjunto de relaciones lógicas entre ellos”. En particular se dice que se trata de “un modelo matemático si emplea el lenguaje matemático para describir el comportamiento de un sistema”. Para Smith en su obra “*Fundamental Principles of Modeling and Simulation*” [138, Smith 1999], un modelo incluye “Un sistema de postulados, datos e inferencias presentadas como una descripción matemática de una entidad” o bien “una abstracción que representa el estado o comportamiento de un sistema en cierto grado”, este grado de certeza, según aclara, describe exactamente un mundo virtual, ya que representa objetos y eventos en ese mundo, pero su grado de detalle puede variar enormemente con respecto a los hechos reales que trata de representar. Entonces, el modelo es algo que sustituye a lo modelado, para manipularlo y enseñar al mundo como “es”; es decir, el modelo de un fenómeno es una herramienta que se usa para describirlo, interpretarlo, predecir comportamiento en diferentes situaciones específicas, validar hipótesis y elaborar estrategias para la intervención.

Sin embargo, aplicar las leyes científicas básicas para describir fenómenos concretos requiere idealizaciones, de-idealizaciones, aproximaciones, simplificaciones y soluciones de compromiso *ad-hoc*; pero las propias teorías científicas no dan reglas sobre cómo se debe realizar esta tarea de generalización. Estas actividades adicionales al desarrollo de los modelos implican correcciones, normalizaciones, uso de modelos intermedios y otros ajustes que no se pueden deducir de las leyes físicas, por lo que son una parte importante de la resolución de las hipótesis planteadas.



Existen tantas clasificaciones de modelos como objetivos para los que se planteen:

- Con base a la información disponible, los modelos se clasifican como modelos de caja-negra o de caja-blanca (o caja de vidrio). En un modelo de caja negra no hay información previa disponible, mientras que en un modelo de caja blanca, toda la información necesaria se encuentra disponible. Por lo general, los modelos típicos se encuentran en una posición intermedia entre ambos tipos, y siempre es preferible usar la mayor cantidad de información posible para hacer el modelo más exacto.
- En función del tipo de información de entrada: existen modelos heurísticos, aquellos basados en las explicaciones sobre las causas o mecanismos naturales que dan lugar al fenómeno estudiado; o modelos empíricos, los que utilizan las observaciones directas o los resultados de experimentos del fenómeno estudiado.
- Según el tipo de representación se distinguen: Modelos cualitativos, que se contentan con predecir la tendencia y la magnitud de la evolución del sistema; y modelos cuantitativos (numéricos), aquellos que usan números para representar las variables y fórmulas o algoritmos matemáticos (más o menos complejos) que relacionan los valores numéricos.
- De acuerdo con la aleatoriedad del sistema a modelar se diferencian: el determinista, si tanto los datos de partida como el resultado son completamente conocidos o están determinados, y por tanto no existe incertidumbre; los estocásticos - probabilísticos, aquellos que tiene como resultado la probabilidad de ocurrencia de un suceso y por tanto existe incertidumbre.
- Otra clasificación hace referencia a su aplicabilidad y su uso: a) los **determinísticos**, basados en las ecuaciones de flujo y transporte de contaminantes en aguas subterráneas, asumen una única solución correcta para cada situación; b) los **estocásticos**, sustentados en la teoría de las probabilidades, parten de que cada solución es igualmente probable en función de los parámetros; c) los **analíticos**, usan formulas simples con solución exacta para un punto de cálculo, no admiten heterogeneidades; y d) los **numéricos**, fundamentados en la discretización espacial y temporal, su solución es aproximada, admiten heterogeneidades.

Otras clasificaciones hacen referencia a su formulación o los diferentes niveles de modelación:

- Los diagramáticos: llamados así porque generalmente implican diagramas, gráficas o esquemas, y sirven para la representación causal del fenómeno en cuestión.
- Los matemáticos: se concentran en una descripción matemática del comportamiento o dinámica del fenómeno físico; el cual es representado mediante parámetros físicos relacionados entre sí a través del conjunto de leyes físicas (formuladas matemáticamente) que rijan el sistema.
- Los experimentales: requieren la construcción de artefactos tecnológicos que reproduzcan el fenómeno objeto de la modelización; construir este tipo de modelos requiere el conocimiento previo de cómo otros fenómenos físicos afectan al fenómeno estudiado. De esta forma relaciones entre los parámetros físicos se representan mediante magnitudes que puedan ser medidas y manipuladas con el fin de examinar las estructuras y/o las capacidades del sistema.



A partir de estas premisas nuestra hipótesis de partida es un modelo conceptual con formulación matemática que permita la simulación de unos resultados empíricos y deterministas. El modelo se basa en un sistema hidrogeológico abierto (posee entradas y salidas) de tipo caja blanca, para el cual se ha planteado un balance hídrico neutro (igual a cero, que transforma al sistema en cerrado).

A pesar de toda la teoría sobre modelos hidrogeológicos descrita minuciosamente por Custodio y Llamas [33, Custodio & Llamas 2001], o de cualquier otra clase aplicaciones como en biología y ecología recogidas por Maynard [97, Maynard 1968], o el avance que supuso el uso de los modelos analógicos y computacionales para la gestión de los recursos [106, Ministerio de Obras Públicas 1972], el modelo creado responde únicamente la percepción de acuerdo la formación y la información con la que cuenta el modelador.

2.1.2 Aproximación a la zona de estudio

Para la caracterización socioeconómica y demográfica de la comarca de los páramos, se ha recurrido primero a la información disponible en Instituto Nacional de Estadística [75, Instituto Nacional de Estadística 2013], y ha sido completada con datos procedentes de los Estudios de Datos Económicos y Sociales de Caja España [17, Caja España 2009]. Esta aproximación a la geografía humana se completado con el trabajo de Guerra [59, Guerra 2000], que en su tesis doctoral vincula el paisaje y su estructura biogeográfica con las actividades humanas y el aprovechamiento de los suelos de todo el entorno de los Montes Torozos. Este último autor ha publicado también un artículo titulado "La Acción Humana, el Paisaje Vegetal y el Estudio Biogeográfico" [60, Guerra 2001] en el que presenta las conclusiones obtenidas del análisis evolutivo de la ocupación del suelo y sus consecuencias, presentando especial interés al uso forestal del entorno.

Otras referencias más antiguas, que describen de forma exhaustiva el Páramo de los Montes Torozos y su contexto geográfico son la obra de Brita Paja [15, Brita Paja 1991] y el capítulo dedicado a los Páramos de Valladolid incluido en la Delimitación de Unidades y Estructuras Territoriales de la Provincia de Valladolid, incluido en la colección de Descripción del Medio Físico de Castilla y León de EPYPSA 1988 [54, García-Merino 1988]. Este acercamiento histórico, junto con otras aproximaciones más literarias y poéticas, han aportado una componente histórica, dando lugar a un sentimiento de proximidad hacia las los habitantes del entorno y sus motivaciones, la cuales en ocasiones justifican algunas de las actuaciones y de las actividades más controvertidas desarrolladas en la zona. La obra de Corral Castanedo [28, Corral Castanedo 1999] y algunos textos de Godofredo Garabito, son los que han aportado la visión localista casi artística de la zona, entre las obras poéticas cabe destacar "Castilla: hisotia de surco y versos" o la biografía de D. Antolín Gutiérrez Cuñado ("Roble en Torozos ").



2.1.3 Know how de las tecnologías y técnicas de análisis espacial

2.1.3.1 Las técnicas estadísticas

2.1.3.1.1 Hidrometeorología

El balance hidrológico se ha calculado a partir de las precipitaciones medias mensuales acumuladas y de la temperatura media mensual, calculadas a partir de los valores horarios proporcionados por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) para la serie temporal 1937 - 2011 (Datos de la Sección de Climatología de la Delegación Territorial de Castilla y León de la Agencia Estatal de Meteorología, 2012), de las 8 estaciones existente en el páramo. De estas estaciones se ha usado la estación de Valladolid Villanubla (nº 2539) como estación de referencia, debido a su continuidad y fiabilidad de los datos registrados.

La evapotranspiración real (ETR) se ha calculado siguiendo la metodología propuesta por Turc [144, Turc 1961] y se ha verificado comparándola con los resultados obtenidos con la evapotranspiración potencial (ETP) de Thornthwaite [143, Thornthwaite 1948], y la corrección en función a las horas de sol elaborada por Doorenbos y Pruitt [38, Doorenbos & Pruitt 1977].

Los resultados medios obtenidos han sido aplicados diferencialmente a la superficie de influencia correspondiente con cada estación, utilizando polígonos Thiessen. Los datos obtenidos han sido comparados con los Diagramas Bioclimáticos del Instituto Nacional para la Conservación de la Naturaleza [107, Montero de Burgos & González Rebollar 1983]; y el *Iberian Climate Atlas* [1, Agencia Estatal de Meteorología de España & Departamento de Meteorología e Clima, Instituto de Meteorología de Portugal 2011].

2.1.3.1.2 Geoestadística

La geoestadística es una herramienta muy útil para analizar los patrones de distribución espacial de variables ambientales a través de un área de interés. Uno de los procedimientos de estimación geoestadística más conocido es el *kriging*, que permite la realización interpolaciones de valores de variables discretas a lo largo de un área continua.

Esta técnica es capaz de predecir los valores en aquellos lugares donde no se conoce la magnitud del atributo investigado. A partir de esta información, y utilizando herramientas SIG, se pueden realizar series cartográficas temáticas de distribución de una variable dentro de un área experimental. Pero a pesar de que la introducción de la geoestadística en las herramientas SIG ha supuesto una mejora considerable en la representación gráfica y en la visualización de parámetros espaciales [108, Moral 2004], existen muchos condicionantes tanto para su uso como para su interpretación, ya que sin un control adecuado de los parámetros de estas técnicas, se puede llegar a resultados o conclusiones erróneas.

El conjunto de técnicas geoestadísticas permite procesar datos de carácter espacial a lo largo del tiempo, es decir, dan una idea de la evolución espaciotemporal de la variable analizada. A partir de su evolución, se podrá determinar la incertidumbre espacial y temporal de dicha variable, mediante la creación de modelos de aproximación sucesiva (gaussianos, logarítmicos, etc.).



Por tanto, se puede decir que esta disciplina, en primer lugar proporciona herramientas descriptivas como variogramas y otros estadísticos (la media, la mediana, la varianza, etc.) que permiten caracterizar espacialmente un continuo mediante alguno de sus atributos. Pero son las diferentes técnicas de interpolación, incluido el *kriging*, las herramientas capaces de establecer correlaciones espaciotemporales entre las observaciones y las predicciones realizadas, a través del uso de uno o más atributos.

Pero la contribución más importante de la geoestadística es la evaluación de la incertidumbre de parámetros no muestreados, los cuales normalmente se representan en mapas de probabilidad, dentro de un intervalo de confianza. Dicha evaluación puede ser combinada con el conocimiento de expertos para su aplicación directa sobre otros modelos o para ayudar a la toma de decisiones en muy variados ámbitos, desde la delimitación de zonas contaminadas, hasta la elaboración de planes de emergencia, o control de la propagación de epidemias, o estudios de distribución de especies, o incluso en la gestión de recursos naturales [57, Goovaerts 1997].

Por otra parte, estas simulaciones estocásticas permiten generar imágenes y modelos de la distribución espacial de los valores de los atributos [84, Lemke et al. 2004], pero su robustez en todo caso, al igual que el resto de modelos, estará en función de la información de partida. Este tipo de modelos estocásticos, y al igual que otros modelos predictivos y el resto de las técnicas geoestadísticas, permite plantear distintos escenarios de incertidumbre y respuesta [56, Goovaerts et al. 1993]. Así la evolución de las técnicas geoestadísticas se ha centrado en plantear modelos cada vez más robustos y completos que permitan: la cuantificación de los contaminantes [86, Li et al. 2007]; la determinación de la variabilidad de su distribución espacial [58, Goovaerts et al. 2005]; o establezcan las correlaciones existentes entre la variable de estudio y las propiedades hidrológicas del medio [85, Lemke et al. 2004].

2.1.3.2 La hidrogeología

2.1.3.2.1 Geología

Los conocimientos básicos sobre los procesos geomorfológicos proceden de la obra de Gutiérrez Elorza [62, Gutiérrez 2008], de ella se han obtenido los principios sedimentológicos de las cuencas terciarias y los procesos kársticos. El modelo sedimentológico conceptual y sus controles geotectónicos cuyo resultado es la geometría estratigráfica de la zona se extrae del trabajo de Mediavilla [101, Mediavilla & Dabrio 1988]. La litología pormenorizada se ha obtenido de los trabajos de SIEMCALSA [139, Sociedad de Investigación y Explotación Minera de Castilla y León S.A. 1997]. Finalmente para la tectónica y el detallado de los elementos geológicos y geomorfológicos de la unidad hidrogeológica se han usado las memorias de los mapas de la serie MAGNA 1:50.000 del Instituto Geológico y Minero de España [72, Instituto Geológico y Minero de España 2012].

Además se han consultado otras fuentes de internet como: la página *Web* oficial de la aplicación informática de Schlumberger; la *web* The United States Geological Survey [145, United States Geological Survey 2010], desarrollador de Modflow; la *web* del Sistema de Información Europea



del Agua [156, Water Information System for Europe 2013]; y la Infraestructura de Datos Espaciales de Castilla y León. [79, Junta de Castilla y León 2013].

2.1.3.2.2 Hidrología e hidrogeología

Probablemente de todos los temas que se tratan en este trabajo la hidrogeología, junto con la geología y la climatología, son los que mejor están descritos, y por tanto, de los que se dispone de más información de forma general. La falta de datos hidrogeológicos (permeabilidad, transmisividad, etc.) sólo se pone de manifiesto al restringir la zona de estudio al Páramo de los Torozos, teniendo que recurrir a los valores medios experimentales de Custodio y Llamas [33, Custodio & Llamas 2001] y de la Infraestructura de Datos Espaciales (IDE) MIRAME, de la Confederación Hidrográfica del Duero [26, Confederación Hidrográfica del Duero. 2013], así como las estimaciones realizadas a partir de las variaciones de caudal en los manantiales.

En 1981 la Secretaria de la Energía y Recursos Mineros, del Ministerio de Industria y Energía, publicó el estudio titulado "Aguas Subterráneas" [71, Instituto Geológico y Minero de España 1981], en el que se establecían cuáles son los principales acuíferos, su balance hídrico aproximado, y la situación de la red de Vigilancia.

Poco tiempo después aparece el único estudio de carácter hidrogeológico propiamente dicho, realizado sobre el acuífero libre del Páramo de los Torozos. Fue realizado por Ballester [8, Ballester et al. 1983], dentro del Plan de Investigación de Aguas Subterráneas (PIAS) desarrollado por el Instituto Geológico Minero de España para caracterizar el potencial hidrogeológico del territorio español, y más concretamente de este acuífero. Esta publicación fue completada con el trabajo de López-Geta [90, López-Geta et al. 2005] sobre la explotación de aguas subterráneas en la cuenca del Duero, trabajo que han supuesto el marco de partida para el desarrollo de este estudio.

Más recientemente, Morán da un paso más allá y determina los impactos derivados del cambio de aprovechamiento de los recursos hídricos [109, Moran 2012]. A pesar de que su enfoque se limita a las aguas superficiales de las grandes subcuencas, en el caso de Torozos, debido a la relación directa entre los manantiales y el acuífero, se pueden tomar como válidas algunas de las reflexiones que hace sobre el análisis de las tendencias genéricas en la cuenca del Duero. Sin embargo y a la luz de los resultados obtenidos, no se puede validar sus resultados sobre el aumento de temperatura o la disminución de aportaciones, ya que se trata de un estudio con un ámbito geográfico no comparable.

Los principios teóricos fundamentales que rigen todos los procesos hidrogeológicos son: la teoría elemental del flujo de agua en los medios porosos (Ley Darcy), la Hidráulica de Captaciones y ley de Conservación de Masas. La aplicación de estos principios no supondría un problema de forma general en medios homogéneos e ideales. Pero en realidad, por lo general, los acuíferos presentan una fuerte variabilidad espacial y temporal, unas complejas relaciones entre ellos, unos límites poco definidos, sistemas de recarga y descarga poco precisos, y grandes variaciones estacionales y anuales; que suponen un aumento de complejidad a la hora de resolver las ecuaciones matemáticas de las leyes físicas, aumentando la dificultad a la hora de estudiar la



unidad hidrogeológica. Por este motivo el uso de ecuaciones, o métodos simples de cálculo, no es más que una primera aproximación, que en muchos casos y debido a la falta de datos puede ser inaceptable.

Los fundamentos teóricos de hidrogeología han sido obtenidos del libro "Hidrología Subterránea" [33, Custodio & Llamas 2001]. Esta obra, cuya primera edición data de 1983 y su última revisión de 2001, es considerada en España como de referencia a la hora de trabajar con aguas. Pero ha sido necesaria su contextualización en el ámbito internacional para adecuar sus contenidos a la siempre dinámica y polémica gestión de los recursos hídricos subterráneos. Para ello se ha usado referencias como: "Fundamentos básicos de los modelos de flujo de agua subterránea" [122, Sánchez 2010]; "*Ground-Water Hydrology and Hydraulics*" [100, McWhorter & Sunada 1997]; "*Handbook of Hydrology*" [92, Maidment 1993]; y referencias más actuales a artículos de revistas internacionales tales como "*Spatial analysis of water quality trends in the Han River basin, South Korea*" [65, Heejun Chang 2008], o "*Freshwater in flux*" [24, Cole 2013].

Respecto a los conceptos necesarios de hidrología superficial, a parte del ya citado "Custodio", y a modo de comparativa, se han usado las obras de Viessman [149, Viessman & Lewis 2003] y Chow [23, Chow et al. 1993]. A partir de ellas se han determinado los métodos de aforo de los manantiales perimetrales que drenan el páramo.

De forma complementaria, ha sido necesario la consulta de los textos de otros autores, en ocasiones más generalistas, sencillos y en algunos temas más actualizados que la obra de referencia. Esta revisión ha permitido observar el cambio en la evolución del pensamiento en el aprovechamiento y la gestión de los recursos hídricos subterráneos entre la obras de Fitts [48, Fitts 2002] y Freeze [51, Freeze & Cherry 1979]. En ese lapso de tiempo se produce un cambio de mentalidad hacia un uso responsable que evite la degradación de los recursos hidrogeológicos, y también se ve recogido en el Curso Internacional de Hidrología subterránea de 2009.

Finalmente, otra fuente de información clave ha sido el material de la página *web* de Sánchez San Román del Departamento de Geología de la Universidad de Salamanca [122, Sánchez 2010], donde pone a disposición de todos los interesados una versión completa, sintética y clara de toda la hidrología. De su *web* se han obtenido bibliografía, metodologías para cálculos y estimaciones, fundamentos teóricos acerca de modelos, etc. A estos documentos hay que añadir una lista interminable de artículos científicos entre los que cabe destacar los de la revista *Nature Geoscience* por su actualidad, y alguna de las publicaciones de la Agencia Europea del Medio Ambiente (EEA) a través de su *web Water Management*, ya que en ambas se puede observar una tendencia hacia la conservación y la mejora en eficiencia en la gestión de los recursos subterráneos.

2.1.3.2.3 Modelos hidrogeológicos

Los primeros modelos hidrogeológicos fueron desarrollados por la industria petrolífera para la explotación de las reservas de hidrocarburos. Su aplicación se generalizó y actualmente se emplean profusamente extendiéndose a otros recursos mineros, pero dado el carácter de esta industria de grandes inversiones previas y de una notable competencia comercial, muchos de los



recientes logros se mantienen en secreto con fines especulativos [33, Custodio & Llamas 2001] y son objeto del ámbito de la "Inteligencia Competitiva", popularmente conocida como espionaje industrial.

A pesar de toda la bibliografía, la mejor manera de aprender a construir modelos es crearlos uno mismo. Por este motivo, se ha tratado de recurrir a otros modelos solo en caso de no obtener los resultados esperados. De ellos se han extraído conocimientos prácticos a la hora de resolver las limitaciones impuestas por la complejidad de los sistemas, con el fin de minimizar los errores a la hora de construir el modelo. Además de la solución bibliográfica, para tratar de superar las limitaciones de información ha sido necesario la elaboración de procedimientos imaginativos y soluciones de compromiso que permitieran aproximar el modelo a la realidad. Así por ejemplo, para aumentar la fiabilidad del modelo geoestadístico de la piezometría se han usado los manantiales como si fueran pozos a la hora de calcular las isopiezas.

Por su parte, el desarrollo tecnológico actual ha facilitado la tarea de modelar. Su avance exponencial tanto en usuarios como en equipos ha conducido a una proliferación masiva de herramientas y aplicaciones informáticas para su construcción. Además, su gran versatilidad se ha traducido en la aparición de una infinidad de programas informáticos que permiten resolver de forma rápida las funciones matemáticas y visualizar los resultados no sólo como listas interminables de puntos, sino como salidas gráficas superponibles a la cartografía. Algunas de estas herramientas informáticas son [35, Díaz Lezcano 2007]:

- MINIMEF: programa francés que computa mediante elementos finitos estructuras en 2 y 3 dimensiones.
- FE3DGW: de 1987 programado en FORTRAN (*Formula Translating System*), responde a las siglas inglesas de Elementos finitos en aguas subterráneas en 3D; analiza el flujo multicapa en sistemas hidrogeológicos en régimen permanente
- MODFLOW: aunque data de 1988, su última versión es de 2005; es un programa desarrollado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), capaz de simular regímenes laminares y turbulentos de agua subterránea, programado en lenguaje FORTRAN para trabajar con diferencias finitas.
- NEWSAM: creado en 1993, basado en álgebra de mapas, permite evaluar el transporte de solutos.
- USGS *Groundwater Flow, Transport, and Geochemical Reactions, including Groundwater/Surface-Water Interactions*. Desde 1996 el Servicio Geológico de los EE.UU desarrolla modelos hidrológicos para distintos sistemas operativos y con distintas funcionalidades.
- FEFLOW: pertenece a DHI, su primera versión data de 1979 pero se ha ido actualizando hasta la versión 6.1 de 2012, se trata de un programa de elementos finitos, que permite la simulación de flujo y transporte en medios saturados y no saturados.
- Visual MODFLOW: es la versión gráfica y comercial de MODFLOW desarrollada por Schlumberger Water Services.
- PMWIN: *Processing Modflow for Windows Version 5.3*. Versión gráfica gratuita de MODFLOW, cuya primera versión data de 1995 y su última actualización es de 2011, posee características similares al Visual-Modflow pero con limitaciones de tamaño.



El uso de estos programas ha llevado a distintos autores a la realización de numerosas aproximaciones a la simulación y modelado hidrogeológico, desde las que son únicamente de tipo informático, programadas en casi todos los lenguajes [87, Liangping 2009], hasta los módulos desarrollados específicamente para herramientas de información geográfica (*Hydrology de Spatial Analyst Tools* de ArcGis o las extensiones de Sextante de gvSIG). Por citar algunos ejemplos desde 1978 hasta la actualidad, los trabajos más relevantes son:

- *Numerical Simulation of Steady State Three-Dimensional Groundwater Flow Near Lakes* [157, Winter 1978]).
- *Modeling Three-Dimensional Groundwater Flows by the Body-Fitted Coordinate (BFC) Method: I. Stationary Boundary Problems* [81, Koo & Leap 1998].
- *On mobilization of lead and arsenic in groundwater in response to CO₂ leakage from deep geological storage* [160, Zheng et al. 2009].
- *Flux-limiting techniques for simulation of pollutant transport in porous media: Application to groundwater management* [136, Smaoui et al. 2008].
- *Modelling groundwater flow and advective contaminant transport in the Bou-Areg unconfined aquifer (NE Morocco)* [39, El Yaouti et al. 2008].
- *Modelling of hydrodispersive processes in the fissured media by flux limiters schemes (Chalk aquifer, France)* [161, Zouhri et al. 2009].
- *Modelling the effect of forest cover in mitigating nitrate contamination of groundwater: A case study of the Sherwood Sandstone aquifer in the East Midlands* [159, Zhang & Hiscock 2011].
- *Unsaturated properties for non-Darcian water flow in clay* [88, Liu et al. 2012].
- *Hydrologic and geochemical modeling of a karstic Mediterranean watershed* [110, Nikolaidis et al. 2013].
- *Evaluation of the impact of an uncontrolled landfill on surrounding groundwater quality, Zhoukou, China* [63, Han et al. 2013].
- *Solute transport modeling of the groundwater for quaternary aquifer quality management in Middle Delta, Egypt* [55, Ghoraba et al. 2013].

Pero para reinterpretar y adaptar toda la información obtenida de estas fuentes a nuestra zona de estudio y las herramientas disponibles, ha sido necesario utilizar los manuales usuario de Modflow 2005 [145, United States Geological Survey 2014] y Visual Modflow 2011 [131, Schlumberger Water Services 2011].

2.1.3.3 Índices de vulnerabilidad y riesgo

2.1.3.3.1 Vulnerabilidad

El estudio de la vulnerabilidad intrínseca y extrínseca se ha realizado a partir del índice DRASTIC y el Índice de Susceptibilidad (IS) respectivamente. Las metodologías empleadas en los Montes Torozos son las descritas por Albuquerque [3, Albuquerque et al. 2013], y los resultados se muestran en el epígrafe 4.2 del presente trabajo.



DRASCTIC se basa en parámetros intrínsecos asociados a las características hidrológicas e hidrogeológicas de la masa de agua. Por su parte el IS trata de analizar la vulnerabilidad específica teniendo en cuenta la vocación del terreno en función de las diferentes actividades antrópicas en él desarrolladas, es decir, se introduce un nuevo atributo, los usos del suelo.

El estado del arte de los métodos de determinación de la vulnerabilidad se remonta a los años 80 del pasado siglo cuando Aller publicó el método DRASTIC por primera vez [4, Aller et al. 1987]. Desde esa fecha hasta la actualidad se ha aplicado este método en muy diversas zonas, formaciones geológicas y masas de agua, distribuidas a lo largo de todo el globo terrestre. Las publicaciones más recientes, además, tienen como principales zonas de interés los países en vías de desarrollo, como lo demuestran algunos de los trabajos publicados en China [154, Wang et al. 2012], Túnez [102, Mekki et al. 2013], Irán [47, Fijani et al. 2013] etc. Todos ellos tratan de evaluar la vulnerabilidad de diferentes áreas y ver la capacidad de diferentes impactos en modificar dichos cálculos, con el fin de gestionar de forma eficiente y sostenible los recursos hidrogeológicos de las zonas de trabajo.

Pero el método DRASTIC no es la única forma de determinar la vulnerabilidad. Existen multitud de aproximaciones, algunas de las metodologías más utilizadas son: la lógica de *Fuzzy* [83, Kyung-Soo et al. 2013]; el método geoestadístico del *kriging* [22, Chica-Olmo et al. 2014]; los modelos de regresión [13, Boy-Roura, M et al. 2013] y regresión logística [93, Mair et al. 2013]; los estudios de redes [114, Pizzo et al. 2013]; las herramientas GIS con análisis geoespaciales [118, Rebelo et al. 2011]; o incluso la combinación de algunas de los métodos anteriores [115, Raj Pathak & Hiratsuka 2011]. Como ejemplo: la introducción de *Fuzzy* en los SIG; o el uso de las redes para crear mapas de vulnerabilidad y propone medidas para la monitorización de calidad de las aguas subterráneas [7, Baalousha 2010]. Todas estas metodologías tienen sus ventajas e inconvenientes, por lo que en ocasiones es necesario recurrir a análisis de tipo DAFO (Debilidades, Amenazas, Fortalezas y Oportunidades) o paneles de expertos tipo DELPHI [140, Soon 2012] para hacer una elección acorde con el objeto de estudio.

En España, respecto del IS, la primera referencia encontrada ha sido por Albuquerque [3, Albuquerque et al. 2013] en la cuenca del río Águeda (afluente del río Duero, que sirve de frontera natural entre España y Portugal).

Respecto al método DRASTIC, ha sido aplicado con frecuencia a lo largo de muy diversas áreas con diferente éxito en función con el tipo de masa de agua estudiada. Algunos autores han tratado de adaptar los parámetros del DRASTIC a las condiciones locales de cada zona, de esta forma Fernando-Pacheco propuso una nueva estructura estadística multivariable [44, Fernando-Pacheco & Sanches 2013]; o You-Hailin que tratará por su parte de mejorar el método cambiando los parámetros y sus pesos relativos del algoritmo original [158, You-Hailin et al. 2011].

Pero a pesar de la controversia del concepto de vulnerabilidad, el índice DRASTIC y el índice de Susceptibilidad para este trabajo han sido calculados según el trabajo de Albuquerque [3, Albuquerque et al. 2013]. De esta forma, y siguiendo lo planteado en el trabajo anterior, se ha considerado separar por un lado: una vulnerabilidad intrínseca, calculada a partir del método



DRASTIC original [4, Aller et al. 1987]; y por otra parte, se ha determinado la vulnerabilidad extrínseca a partir del Índice de Susceptibilidad (IS) según las tablas y valores que aparecen en el trabajo de Ribeiro [120, Ribeiro et al. 2003].

Las dos metodologías seleccionadas son de uso generalizado entre la comunidad científica por lo que se ha detectado la existencia de una gran cantidad de variantes de carácter local o regional. Esto se traduce en la existencia de una larga lista de referencias bibliográficas tales como Lobo-Ferreira [89, Lobo-Ferreira & Oliveira 1993]. En este trabajo, no se ha introducido ni aplicado ninguna modificación del algoritmo o sus parámetros, ya que la masa de agua se ha considerado isótropa y con características homogéneas que se adaptan muy bien a la aproximación metodológica seleccionada.

2.1.3.3.2 Contaminación de aguas subterráneas

Uno de los potenciales futuros desarrollos de esta tesis, podría ser un análisis detallado de las presiones que sufre el acuífero, sobre todo las vinculadas con la degradación de la calidad de las aguas por nitratos, ya que se han detectado preocupantes niveles de nitratos (NO_3^-) en varias de las muestras recogidas.

Para el estudio de este tipo de proceso químico, tanto de su componente natural como antrópica, ha sido necesaria una revisión de los principios de la química ambiental que se ha realizado a partir de la obra "Química Medioambiental" [141, Spiro & Stigliani 2003]. Este trabajo se limita a describir los procesos que dentro del medio ambiente, sin establecer relaciones causa-efecto ni determinar la dosimetría umbral para la salud humana. En este sentido, ha sido necesaria una pequeña introducción en el mundo de la toxicología y la epidemiología que permita establecer unos criterios básicos para asegurar la calidad del recurso hídrico con el fin traducir la sostenibilidad en términos realistas y materializables.

Así, en lo tocante al comportamiento de las distintas formas del nitrógeno en el medio hidrogeológico, su ciclo biogeoquímico y las patologías humanas asociadas con el uso para el consumo de aguas con elevadas concentraciones de nitratos, los trabajos de: Camargo [18, Camargo & Alonso 2006]; Fernández [43, Fernández et al 2012]; o Ward [155, Ward et al 2005], han marcado las pautas para evaluar la toxicidad potencial de los compuestos nitrogenados y sus patologías sobre la salud humana.

2.1.3.3.3 Riesgo

La consecuencia directa de la existencia de estos posibles episodios de contaminación difusa asociada a la agricultura y de contaminación puntual asociada a la red de carreteras u otros focos de carácter local, como vertidos relacionados con actividades industriales, es presumible asumir la existencia de un riesgo. Para eludir la polémica sobre la concepción del término y la metodología de cálculo del riesgo, se ha adoptado de forma arbitraria, a falta de un estudio más detallado, del método y concepto propuesto por Martínez-Alegría [94, Martínez-Alegría et al. 2003]. Según estos autores el riesgo es el daño potencial producible por un fenómeno potencialmente dañino que puede ser cuantificado en términos económicos y/o sociales o evaluado cualitativamente mediante una función matemática. De acuerdo a esta expresión, si el valor se expresa en términos



económicos, el tipo de riesgo considerado será de pérdidas económicas, mientras que si el bien expuesto es la vida humana, será un riesgo social.

Desde el punto de vista ambiental, el riesgo se puede plantear como la probabilidad de ocurrencia de un episodio de contaminación, cuyos efectos sobre diversos elementos expuestos del medio ambiente pongan en peligro la habitabilidad, o alteren las condiciones naturales de evolución de dicho medio, a corto, medio o largo plazo.

Otra aproximación a la evaluación de los riesgos es la de Santini, que al igual que Martínez-Alegría, plantea una metodología para evaluar y gestionar el riesgo de la forma integral a través de la utilización de herramientas SIG [124, Santini et al. 2010].

Este enfoque integral se ve recogido también por la Directiva Marco del Agua [27, Consejo Europeo. 2001] y el trabajo de Vishnu [151, Vishnu et al. 2011], que plantean y definen la sostenibilidad desde el punto más generalista posible, primero determinando la calidad cuantitativa y cualitativa de los recursos para luego definir el "Buen Estado" y las medidas para su conservación y mejora.

Todos estos antecedentes, sugieren que la susceptibilidad, la vulnerabilidad, el riesgo y el balance tienen que ser evaluados para poder determinar el "Buen Estado" de una masa de agua, y a partir de él, determinar las líneas de actuación a seguir para la consecución de los objetivos eficiencia y uso racional de los recursos, tal como recoge el Plan de la Cuenca del Duero 2009-2015, en fase de elaboración. Sin embargo, en dicho plan, al igual que en el anterior, se recogen una serie de excepciones y ampliaciones de los plazos para la consecución del objetivo de alcanzar el buen estado potencial. A partir del concepto de buen estado, se abren dos líneas de trabajo: la primera, referida a su cuantificación, mediante programas informáticos capaces de analizar las alteraciones en los regímenes de flujo asociados a la gran variabilidad natural [43, Fernández et al. 2012]; y la segunda, vinculada con el seguimiento, que propone una metodología para la monitorización y valoración de la sostenibilidad de los recursos hídricos a partir de la Directiva Marco del Agua [151, Vishnu et al. 2011].

2.1.3.4 Sistemas de información geográfica y análisis multitemporales

2.1.3.4.1 Sistemas de información geográfica (SIG)

Al tratarse de uno de los pilares de esta tesis y al no ser un tema cuyas fuentes son convencionales, ya que la mayoría proceden de *internet*, y su disposición y acceso está vinculado a licencias de uso, este apartado no puede tratarse de igual modo que los anteriores, por los que se ha recurrido a hacer una lista de los lugares de los que se han obtenido los datos y cuáles han sido esos datos.

Las fuentes de datos para elaborar un sistema de información geográfico coherente, continuo, homogéneo e interoperable son:



- Los indicios mineros y la geología fue obtenida del libro del Mapa Geológico y Minero de Castilla y León a escala 1:400.000 [139, Sociedad de Investigación y Explotación Minera de Castilla y León, S.A. 1997].
- El Catálogo Nacional de Inundaciones de 2011 [37, Dirección General de Protección Civil y Emergencias. 2006]
- Los datos climatológicos se obtuvieron del servidor FTP de la Agencia Estatal de Meteorología (actualmente deshabilitado), del Atlas Climático Digital de la Península Ibérica. Metodología y aplicaciones en bioclimatología y geobotánica [111, Ninyerola et al 2005], y del Atlas del territorio de Castilla y León [116, Ramírez & Reguera 1995], actualizado en Atlas Agroclimático de Castilla y León [78, Instituto tecnológico Agrario de Castilla y León. 2014].
- Para completar el conocimiento hidrogeológico se ha utilizado la información en formato *shape* de las hojas MAGNA disponibles en la *web* del IGME [72, Instituto Geológico y Minero de España. 2012].
- Para la estructura y operaciones con cartografía *raster*, se ha utilizado la obra de Ordóñez, y Martínez-Alegría [112, Ordóñez & Martínez-Alegría 2002].
- La cartografía de detalle a escalas 1:5.000 y 1:10.000, así como el Mapa Digital de Elevaciones del Terreno (MDET) de detalle de 0,5m se ha obtenido del Centro de Información Territorial de la Junta de Castilla y León (CIT), a través de solicitud previa.
- La cartografía general (MTN 1:25.000; MTN 1:50.000; MDT 5m; Sistema de Información y Ocupación de Suelo de España (SIOSE), etc.) se ha obtenido bajo licencia de uso no comercial, del Centro de Descargas, del Centro Nacional de Información Geográfica [21, Centro Nacional de Información Geográfica. 2013].
- Los fotogramas aéreos y las ortofotografías se han obtenido del Instituto de Tecnológico Agrario de Castilla y León (ITACYL) a través de su protocolo de transferencia de archivos [77, Instituto Tecnológico Agrario de Castilla y León. 2013].
- De la CHD a través de la IDE-Duero, se ha obtenido toda la cartografía temática relativa a los recursos hídricos y sus presiones [26, Confederación Hidrográfica del Duero. 2013].
- Para la obtención de la cartografía de usos del suelo CORINE, se ha recurrido a la Agencia Europea de Medio Ambiente [41, European Environment Agency. 2012].
- Los límites administrativos y la información relativa a la los espacios naturales protegidos bajo la Red Natura 2000 se ha obtenido de la *Web* de la Comisión Europea [42, Eurostat. 2012].
- Finalmente los datos relativos a la planificación hidrológica y a la caracterización de las masas de agua proceden del Plan Hidrográfico de la Cuenca del Duero de 2009 [25, Confederación Hidrográfica del Duero. 2009].

De forma complementaria, durante la elaboración y edición de la cartografía vectorial se ha recurrido a numerosos servicios cartográficos de mapas, catálogos y de fenómenos.

El reconocimiento espacial de la masa de agua del Páramo de los Montes Torozos se fundamenta en la delimitación de la estructura geomorfológica y la discretización de los diferentes usos de suelo, en el periodo comprendido entre 1959 y 2009. En esta fase, se ha recogido información



espacial de toda la unidad hidrogeológica, a través de: 1) los fotogramas aéreos del vuelo americano de la serie B datada entre 1956 y 1959, 2) las ortofotografías aéreas de los distintos planes del IGN de ortofotografía, que desde 1998 hasta la actualidad pertenecen al PNOA; 3) las series del 2005 y 2008 del Satélite SPOT.

Para la elaboración y construcción del Sistema de Información Geográfica (SIG) se ha empleado gvSIG y ArcGIS y las extensiones del gestor de geoprocetos, Sextante y las correspondientes a teledetección y fotointerpretación. Además y de forma complementaria para el manejo de los datos climáticos, proporcionados por el Atlas Climático Digital de la Península Ibérica [111, Ninyerola et al 2005], se ha empleado el programa MiraMon.

Finalmente, y en lo referente a la teledetección la bibliografía básica ha sido el libro "*Comparative Analysis of MODIS, SPOT 5 and WorldView-2 during Wheat Growing Season*", donde se hace un completo recorrido a través de las técnicas y algoritmos usados para la correcta manipulación y análisis de imágenes remotas (procedentes de satélites) [64, Hassan 2012].

2.1.4 Sostenibilidad

El rango de campos que abarca la sostenibilidad es inmenso, desde la huella ecológica, hasta el cambio cultural, pasando por la educación, la ciencia, el progreso tecnológico, o la "eco-condicionalidad". Esta cuestión ha conducido a plantear, y a restringir el concepto de sostenibilidad, como un balance entre los recursos existentes (aprovechables) y las necesidades existentes, en este caso de agua.

Para plantear una alternativa sostenible se ha recurrido al concepto de eco-condicionalidad introducido por la Unión Europea con el fin de incentivar las buenas prácticas agrarias y ganaderas, de forma que mediante ellas se pueda conseguir una articulación territorial equilibrada en esta comarca eminentemente agropecuaria. La eco-condicionalidad es la herramienta usada para la concesión de cualquier tipo de ayuda, su gestión debe cumplir las normas de "Condicionabilidad", desarrolladas en el Reglamento (CE) Nº 768/2004.

En este sentido la publicación del Programa de Ordenación de Acuíferos Sobreexplotados [146, Varela & Fernández 1998] fue pionera, ya que no solo identifica los acuíferos en ese estado, sino que además profundiza en las causas y propone medidas tanto para su recuperación como para su conservación. Un poco más adelante, en 2006, se revisaron los resultados de este programa para los grandes acuíferos de la cuenca del Duero, estimando un balance aproximado, muy útil para conocer los recursos y plantear una gestión integrada y sostenible [122, Sánchez 2006].

En muchos casos el concepto de sostenibilidad, se asocia al concepto de desarrollo sostenible. En este trabajo se ha tratado de evitar esta asociación, ya que el concepto de Desarrollo Sostenible en ocasiones se usa indiscriminada e inadecuadamente, por lo que se ha visto abocado a una pérdida de significado. Este es el motivo por el que se ha recurrido al Libro Blanco del Agua [105, Ministerio de Medio Ambiente 2000] y a los trabajos de Pandey [113, Pandey et al. 2011] sobre la Directiva Marco y su aplicación a la sostenibilidad hidrogeológica, que han servido de marco a la



hora de formular los criterios de eco-condicionalidad, ajustándose, a las directrices de la DMA [27, Consejo Europeo. 2000]. Además y con el fin de determinar una sostenibilidad integral, es decir que englobe todos y cada uno de los parámetros analizados a lo largo de este trabajo de investigación, se ha adaptado a la zona de estudio las metodologías propuestas por Vishnu [151, Vishnu et al. 2011], Loukcs [91, Loukcs & Gladwell 1999] y Cai [16, Cai et al. 2003].

2.1.5 Medio natural y otras fuentes documentales

La bibliografía existente sobre el medio natural de la zona es bastante escasa, y las referencias existentes tienen, muchas veces un carácter más literario que científico. Las publicaciones más completas y relevantes en este sentido, coinciden con las mismas que las de la descripción del medio Brita Paja [15, Brita Paja 1991] y García-Merino [54, García-Merino 1988], a las que se debe añadir los datos de la ficha de solicitud del Lugar de Interés Comunitario del Páramo de los Montes Torozos Torquemada y Astudillo [119, Red Natura 2000 2014].

Debido a que la región de estudio aparece en numerosos escritos de muy variada temática (documentos históricos, guías para viajeros, libros de arqueología, y otros libros de carácter etnográfico, cultural o didáctico), y dada la naturaleza técnica de esta memoria, no se ha recogido en la bibliografía ninguno de ellos.



2.2 METODOLOGÍA

La caracterización de todas las variables ambientales que permitan obtener una visión holística a partir de la cual se pueda estimar la sostenibilidad de usos en los Montes Torozos, y más concretamente la del recurso hídrico, como soporte esencial de cualquier uso, ha obligado a plantear un método de trabajo pluridisciplinar, basado en un proceso continuo de obtención y análisis de datos que permita la creación de un modelo válido. Para ello, se ha desarrollado el siguiente esquema metodológico (Fig. 1).

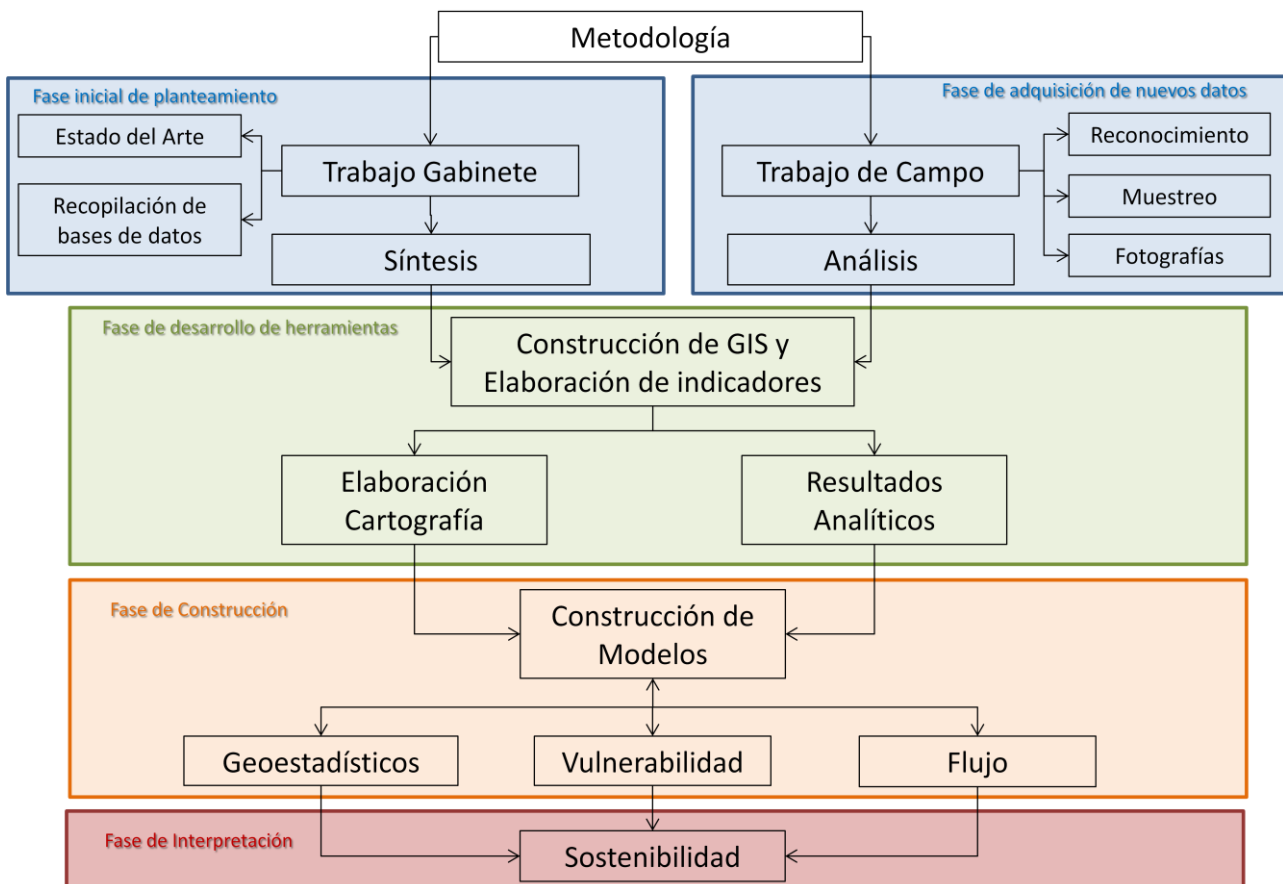


Fig. 1. Esquema metodológico

La metodología se ha dividido en 5 grupos de actividades organizados de forma jerárquica: planteamiento, adquisición de nuevos datos, desarrollo de herramientas de análisis, construcción de modelos, e interpretación para la determinación de la sostenibilidad.

2.2.1 Planteamiento: revisión bibliográfica y recopilación de datos

Se ha recogido, seleccionado y clasificado la información según su temática, trascendencia y grado de actualización, con el fin de evitar el uso de datos obsoletos, reiterativos, inconsistentes o de fuentes poco fiables.

Para ello se ha realizado una búsqueda selectiva y ordenada de las siguientes fuentes:

1. Manuales y libros de referencia disponibles en bibliotecas.



2. Búsqueda de artículos científicos en *Science Direct* de los últimos 10 años. Todos aquellos publicados en revistas indexadas según el *Journal Citation Report* (JCR), bajo las palabras clave: *sustainability*, *vulnerability*, *hydrogeologic model*, *unconfined aquifer* and *water resources*. También se realizó una búsqueda en *PudMed* con los términos: *nitrate*.
3. Recopilación de la información cartográfica disponible.
 - a. Documentos cartográficos en formato digital de las hojas 1:50.000 del Mapa Topográfico Nacional números: 273, 310, 311, 341, 342, 370, 371 y 372.
 - b. Cartografía temática (climatológica, edáfica, geológica, etc.) de atlas en formato papel o digital sin georreferenciar.
4. Adquisición de las bases de datos alfanuméricas, bases de datos espaciales, e imágenes de satélite y aéreas del marco definido por las coordenadas: mínimas 312011, 4600175; y máximas 373620, 4653250 en ETRS 89 UTM huso 30 N

Una vez recopilada la información, para la obtención de datos significativos ha sido necesario su procesado. De esta forma se puede diferenciar: el tratamiento estadístico de los datos numéricos (climáticos, hidrometeorológicos, hidrogeológicos, etc.), el análisis de la información geográfica vectorial, y el procesado de la información geográfica tipo *raster*.

2.2.1.1 Tratamiento estadístico de los datos numéricos

Los datos obtenidos de la AEMET, el INE, y la CHD se han sometido a procesos de análisis estadístico con la finalidad de: a) completar series temporales para hacerlas más coherentes y homogéneas, b) obtener resultados sintéticos relevantes y significativos, c) aproximar los datos obtenidos con la realidad modelada a partir de aproximaciones sucesivas o la adopción de soluciones de compromiso.

Los principales estadísticos y técnicas utilizadas han sido: la media, la varianza, la desviación típica, la mediana, las correlaciones y regresiones lineales, los variogramas y semi-variogramas, y los polígonos de Thiessen.

Para el manejo y representación de los datos y para los cálculos realizados se ha optado por usar hojas de cálculo, debido a que poseen suficiente capacidad de procesado y se trata una herramienta versátil, de extendido uso y con salidas gráficas de fácil comprensión.

Una vez estandarizados y homogenizados los datos, se ha procedido al cálculo de las siguientes variables físicas y parámetros (los resultados obtenidos, así como una descripción más detallada de cada una de las operaciones se realizará en el apartado de construcción del modelo):

- Precipitación: se ha determinado la precipitación media mensual acumulada y la media anual acumulada de la serie 1976-2006. Por otra parte, para la creación del modelo se ha tenido que recurrir a datos de precipitación más reciente que permitieran relacionar los datos de campo medidos con la precipitación registrada. A tal efecto se han utilizado datos pluviométricos de 2006 a 2013.



- Temperatura media: se ha calculado la temperatura media anual y mensual desde 1976 hasta 2006. Sólo en la estación de Villanubla, por ser la de referencia, se ha optado por ampliar la serie temporal y utilizar todos los años disponibles desde 1936 hasta 2013.
- Evapotranspiración media (ET): para la estimación de la Evapotranspiración real (ETR), potencial (ETP) y de referencia (ETO) se han empleado los métodos de Turc y Thornwaite teniendo en consideración las superficies cultivadas y las horas de sol Pruitt.
- Lluvia útil: ha sido calculada restando las precipitaciones totales menos las pérdidas causadas por la ETR.
- Aportaciones superficiales: son los valores medios obtenidos del Apéndice 3 "Series de aportaciones por masa" del Anejo 2 "Inventario de Recursos hídricos" del Plan hidrológico del Duero de 2009 [25, Confederación Hidrográfica del Duero 2009] y del visor de la IDE-Duero [26, Confederación Hidrográfica del Duero 2013].
- Correlación entre las variables climatológicas (precipitación y temperatura) entre las estaciones meteorológicas. Se ha realizado mediante una ecuación lineal para cada una de las variables y se ha comparado cada estación con la de referencia y con cada una de las vecinas.
- Correlaciones entre precipitación y caudal medido. Se han establecido patrones similares de distribución anual e inter anual entre ambas variables a través de gráficos de distribución y correlaciones lineales. Se han establecido correlaciones significativas directas entre el logaritmo neperiano del caudal y la precipitación [103, Mendes 2006].
- Se han calculado la varianza, desviación típica, media, mediana y los variogramas y semi-variogramas para la interpolación de la piezometría inicial a partir de los resultados de la campaña de muestreo [57, Goovaerts, P. 1997].
- Para la determinación de los caudales extraídos de los pozos y el drenaje perimetral, se han aproximado y ajustado los volúmenes nominales establecidos en el proyecto Alberca de la CHD con la demanda distribuida a lo largo del año de las unidades de demanda subterráneas [26, Confederación Hidrográfica del Duero 2013].

2.2.1.2 Procesado de los datos espaciales

Desde el punto de vista técnico más estricto, el procesado de los datos espaciales, tanto vectoriales como *raster*, debe responder a un modelo de datos que asuma las pautas de interoperabilidad de las Infraestructuras de Datos Espaciales (IDEs). Pero debido al carácter local y la no distribución directa de las bases de datos, se ha optado por no desarrollar un modelo de datos completo, y proporcionar sólo la información necesaria para su correcta visualización e interpretación. Por este motivo, aunque no se puede hablar formalmente de modelo de datos, se ha desarrollado una estructura para la organización, manejo y consulta de los datos a la que se va a referir como modelo de datos.

2.2.1.2.1 Modelo de datos

El modelo de datos planteado está formado por ficheros vectoriales (de tipo punto o línea o polígono) con formato *shape* y en archivos de tipo *raster* con formato *geo-tiff* (imágenes georreferenciadas en formato *tiff*), organizados en carpetas temáticas.



No se ha creado un fichero de tipo proyecto debido a su elevado tamaño y a su falta de operatividad al guardar sólo rutas.

Para las coberturas con leyendas predefinidas se han incluido los archivos que permitan replicar la información gráfica presentada en el proyecto, ya sea a través de colores o de tramas.

Para la coherencia espacial de las bases de datos alfanuméricas espaciales se ha seleccionado el sistema de Coordenadas ETRS-89 (*European Terrestrial Referente System* 1989) con proyección UTM 30 Norte, basado en el elipsoide SGR80. La adopción de este sistema de referencia se ha hecho conforme al Reglamento (UE) nº 1089/2010 de la Comisión de 23 de noviembre de 2010 por el que se aplica la Directiva 2007/2/CE del Parlamento Europeo y del Consejo en lo que se refiere a la interoperabilidad de los conjuntos y los servicios de datos espaciales, cuyo contenido se ha traspuesto al marco jurídico español a través de la Ley 14/2010, de 5 de julio, sobre las infraestructuras y los servicios de información geográfica en España.

Con este datum el Servicio de Rotación de la Tierra (IERS) es capaz de mantener unas coordenadas razonablemente estables para Europa, a pesar del movimiento de la corteza terrestre, ya que desde 1989 las coordenadas ETRS89 ajustadas con relación a la Placa Europea, han modificado sus valores con respecto a los expresados en Sistema de Referencia Terrestre Internacional. Sin embargo, esta modificación es bien conocida, controlada por los organismos responsables, lo que posibilita las transformaciones entre unas y otras.

Respecto al sistema de coordenadas proyectadas, se ha seleccionado el *Universal Transverse Mercator* (UTM) tangente al meridiano 30.

Para el empleo de las herramientas SIG, el ETRS-89 UTM huso 30 se corresponde con el código 25830 EPSG, una formalización realizada por el *European Petroleum Survey Group* que quiso dar un código específico a cada sistema de referencia.

Procesado de la información geográfica de tipo vectorial

a) Homogenización del Sistema de referencia: reproyección

La información cartográfica digital disponible en origen carece de sistema de referencia o se encuentra en diferentes proyecciones tales como European Datum 1950 (ED 50), el ETRS-89 huso 30 extendido, o el ETRS_1989_LAEA_L52_M10 (Tabla 1). Por este motivo ha sido necesaria su transformación mediante el uso de los algoritmos y rejillas de reproyección existentes en las herramientas informáticas usadas para la construcción del SIG.

Capa	Sist. Coord. Originales	Operación	Sist. Coord. Final
BCN 1:200.000	UTM 30N, GCS-ETRS89		
Magna 1:50.000	ED_50 UTM 30		
CORINE 1990	ETRS_1989_LAEA_L52_M10	Reproyección de sistemas de coordenadas	ETRS 89 UTM 30N
CORINE 2000	ETRS_1989_LAEA_L52_M10		
CORINE 2006	ETRS_1989_LAEA_L52_M10		

Tabla 1. Reproyecciones y operaciones de transformación de coordenadas en capas vectoriales.



- b) *Edición y ajuste cartográfico y topológico: recorte, extracción, selección por atributo, intersecciones, edición, unión, etc.*

A partir de la cartografía de referencia 1:50.000 de la CHD y la 1:25.000 del IGN, y con ayuda de las ortofotografías del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea, así como un modelo de elevaciones (MDET) con *pixel* de 25 metros, se han corregido las coberturas digitales hasta alcanzar una precisión adecuada a la escala de trabajo seleccionada (1:10.000).

De forma genérica la metodología desarrollada ha sido la siguiente:

1. Obtener en un formato *shape* todas las bases de datos alfanuméricas del área.
2. Reproyectar las capas originales al sistema de coordenadas común.
3. Unir las capas que se hayan descargado por hojas.
4. Recortar las capas de acuerdo con un marco de referencia (con las siguientes coordenadas: mínimas 312011, 4600175; y máximas 373620, 4653250 en ETRS 89 huso 30 N).
5. Asignar una leyenda común a cada uno de los atributos de las bases de datos.

Para realizar todas estas operaciones se han utilizado los algoritmos propios de las herramientas SIG, basados en el álgebra de Boole.

- c) *Operaciones de análisis espaciales: adquisición de coordenadas (x,y,z), cálculo de superficies, interpolaciones, dibujo de contornos, etc.*

Finalmente, en lo que respecta a operaciones *vectoriales*, se han utilizado algoritmos para obtener coordenadas y cotas, calcular el área de los polígonos, dibujar isólinas y crear interpolaciones provisionales.

Procesado de la información geográfica de tipo raster

A la hora de trabajar con información de tipo *raster*, los procesos realizados han sido:

- a) *Digitalizaciones a partir de imágenes*

La selección del área se ha realizado usando la distribución de hojas 1:50.000 del IGN. La zona de interés se encuentra distribuida por las hojas número: 273, 310, 311, 341, 342, 343, 371 y 372.

Se han escaneado todos los fotogramas disponibles en el Centro de Información Territorial de la Junta de Castilla y León de los años 1959 y 1984. Se ha utilizado un "Scanner Epson Expression 10000XL 0000XL A3" con una resolución máxima de 600ppp x 1.200ppp (horizontal x vertical). El escaneo se ha realizado a partir de los positivos, ajustando la escala de grises y el histograma de distribución de frecuencias.

Además se han digitalizado mapas e imágenes que contuvieran información relevante de varias fuentes bibliográficas, usando el mismo procedimiento.

- a) *Georreferenciación*

Para el estudio multitemporal se han georreferenciado los positivos de los fotogramas de los vuelos de las décadas de los años 70 y 80 del siglo XX. Para la georreferenciación se ha utilizado el software gvSIG 1.11 y se han generado aproximadamente 9 puntos de control entre el Fotograma y la ortofotografía de referencia de 2009 del PNOA.

- b) *Reproyección*

La información cartográfica digital disponible en origen carece de sistema de referencia o se encuentra en ETRS-89 huso 30 extendido (EPSG 23030). Por este motivo ha sido



necesaria su transformación mediante el uso de los algoritmos y rejillas de reproyección existentes en las herramientas informáticas usadas para la construcción del SIG (Tabla 2).

Capa	Sist. Coord. Originales	Operación	Sist. Coord. Final
Vuelo americano 1956/59	Relativas del scanner	Transformación polinómica	ETRS 89 UTM 30N
Vuelo 1984 IGN	Relativas del scanner		
SLOT 2005, 4 bandas	UTM 30N, GCS-ETRS89	Reproyección de sistemas de coordenadas	ETRS 89 UTM 30N
SLOT 2008, 4 bandas	UTM 30N, ETRS 89	NINGUNA	ETRS 89 UTM 30N

Tabla 2. Reproyecciones y operaciones de transformación de coordenadas en capas *raster*.

c) *Ajustes de histogramas*

Sobre las imágenes escaneadas, y a efectos de reducir los efectos de dispersión atmosférica de la luz que se produce principalmente en las bandas del visible, Azul y Verde principalmente [135, Slater 1975] y mejorar su visualización a partir de ajustes en el histograma de frecuencias tanto multiespectral como pancromático.

d) *Algebra de mapas*

Para los análisis espaciales en ocasiones se ha recurrido a la utilización de los algoritmos comprendidos en las herramientas SIG. Las operaciones más utilizadas han sido las operaciones algebraicas más comunes: la suma y la resta de mapas.

e) *Realces y composición de colores*

Otra opción que poseen las herramientas SIG es la de realizar modificación en la composición de las bandas en imágenes multiespectrales [133, Schowengerdt, 1983]. De esta forma se puede modificar el color, el realce, y el contraste de las imágenes para resaltar fenómenos de interés.

Para mejorar la capacidad de discriminación de los usos del suelo de algunas zonas se emplearon imágenes multiespectrales de SPOT 5, ya que tienen una resolución de *pixel* de 10 m, mucho más precisa que los 30 m de las imágenes Landsat 7 ETM para las bandas 1 a 5 y 7, por lo que se consideraron más adecuadas para los objetivos propuestos [153, Wang & Zhao 2009].

Se elaboraron composiciones de falso color con las bandas RGB 321 (*Red, Green, Blue*) del visible e infrarrojo cercano, y con un posterior realce.

f) *Cálculos de índices de vegetación mediante teledetección*

Los marcados contrastes de reflectividad de la clorofila en el tramo de longitudes de onda comprendido entre la banda roja del visible (R) 0,645 μm y el infrarrojo próximo (NIR) 0,780 μm conocido como el "*Red Edge*" (Fig. 2) son la base del Índice de Vegetación de Diferencias Normalizadas NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) [82, Kreigler et al. 1969]. Este índice ha sido extensamente utilizado en la teledetección multiespectral [80, Kauth & Thomas 1976] para discriminar los diferentes tipos y estados de la vegetación.

Por esta razón en áreas reforestadas con dificultad para discriminar las zonas repobladas, con brotes jóvenes del bosque más antiguo, se ha recurrido a la determinación del índice de vegetación NDVI de las bandas roja del visible (VIS.R) e infrarroja cercana (NIR) de las imágenes SPOT según el algoritmo.

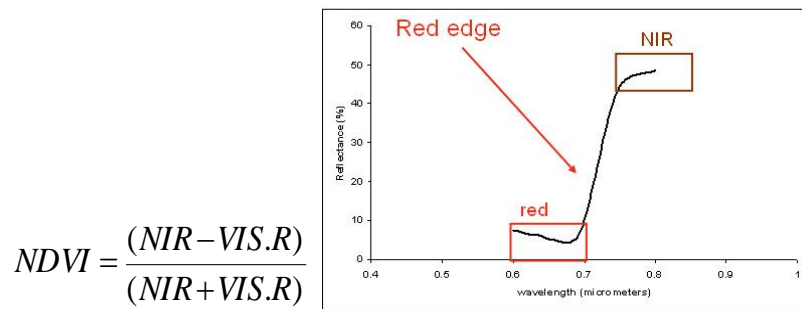


Fig. 2. Esquema Espectro de reflectancia de la clorofila en la zona de transición entre las longitudes de onda del visible (R-VIS) y del infrarrojo cercano (NIR), el “Red Edge” [9, Barroso & Monteiro 2010].

Los mayores valores del NDVI, próximos a 1 y con colores más claros, corresponden a las zonas de mayor reflectancia, por efecto de una mayor actividad clorofílica, asimilable a zonas repobladas y/o a vegetación de ribera fresca, tal y como se observa en la Fig. 3 que recoge como ejemplo los resultados de las técnicas de teledetección utilizadas.

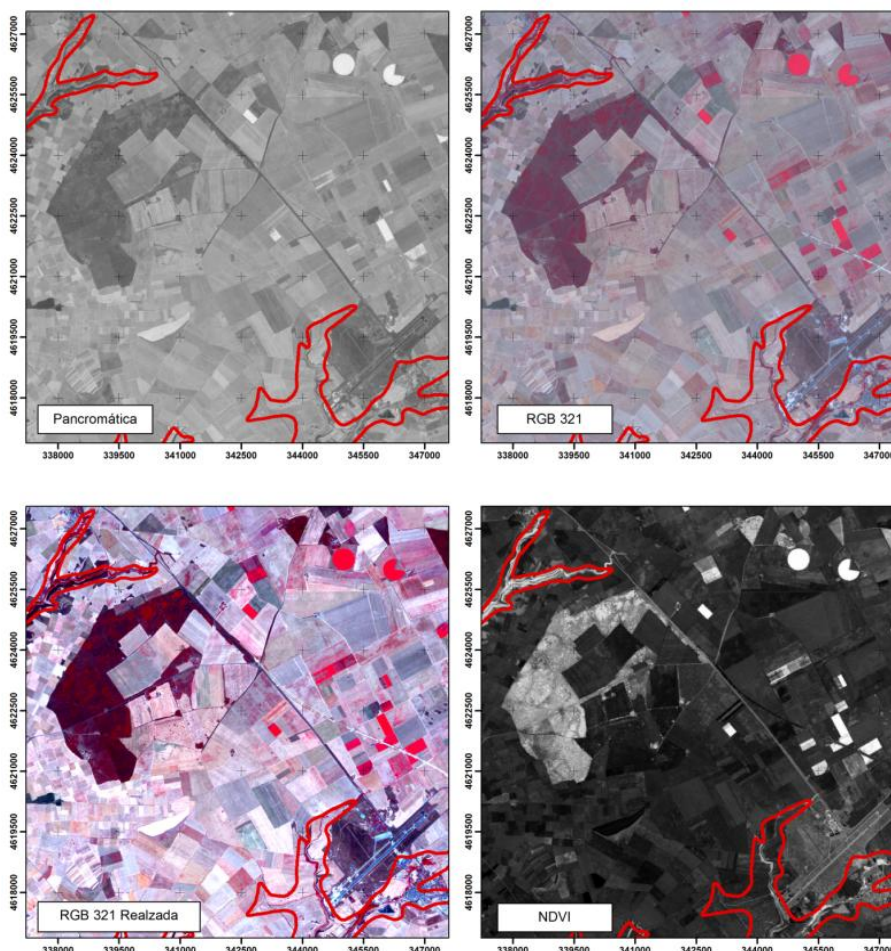


Fig. 3. Ejemplos del resultado de la aplicación de las técnicas de teledetección

La discriminación de las zonas de vegetación de ribera y las repobladas jóvenes se realizaría por interpretación de las morfologías, las primeras con aspecto filiforme, adaptado a los fondos de valle fluviales, mientras que las repoblaciones forestales tienen morfologías más compactas. Las zonas agrícolas de regadío se diferenciarían por sus características texturas de mosaico y la intensidad de su color [153, Wang & Zhao 2009].



Las imágenes así tratadas, junto con las técnicas de clasificación de suelos basadas en aspectos colorimétricos y texturales, y el reconocimiento visual directo de las imágenes (fotointerpretación) han conducido a un análisis detallado de los usos de suelo [152, Von Bandat 1962].

Posteriormente se procedió a una vectorialización de los polígonos de usos así reconocidos en el “vuelo americano” de acuerdo a la leyenda de tercer nivel del proyecto CORINE *Land Cover*. Las bases cartográficas de CORINE correspondientes a la serie de 2006 se han retocado a partir de los resultados obtenidos de la fotointerpretación de las imágenes SPOT en las composiciones de falso color y NDVI.

Por último se han comparado los resultados de clasificación de usos así obtenidos con las cartografías CORINE en las series temporales consideradas. En aquellas zonas en las que se detectaban cambios importantes, entre los usos de 1957 y los de 1990 y a efectos de acotarlos temporalmente, se empleaban como herramienta de apoyo las imágenes del vuelo del IGN 1986 y 1977.

Las cartografías así generadas y las originales del proyecto CORINE en formatos vectorial, se han *rasterizado* con una resolución única de *pixel* de 25 m.

2.2.1.2.2 Uso de Servicios Web

Durante la elaboración y edición de la cartografía vectorial se ha recurrido a numerosos servicios cartográficos de mapas (WMS), catálogos (CSW) y de fenómenos (WFS). Como este proyecto articula todo el SIG en ETRS-89 huso 30, se planea la necesidad de transformar dichos servicios, ya que sólo unos pocos se encuentran en dicho sistema de coordenadas. Esta tarea se ve dificultada al no poder aplicar directamente los algoritmos de reproyección cartográfica de las herramientas SIG, ya que los servicios son de acceso remoto. De esta forma se ha recurrido a la reproyección automática del servicio que ofrezcan por defecto las herramientas utilizadas. En el caso de que las transformaciones no generaran un resultado satisfactorio, se han realizado las operaciones necesarias en el huso original del servicio y posteriormente se ha transformado los resultados al sistema de referencia seleccionado.

2.2.2 Adquisición de nuevos datos y reconocimiento del entorno

La formulación y desarrollo de nuestra hipótesis de partida, es decir establecer el balance hídrico, ha requerido de una serie de labores de campo planificadas, que permitan conocer la zona y obtener los datos necesarios para fundamentar unas conclusiones sólidas. La planificación de la adquisición de los datos de campo se ha fundamentado en tres pilares: el año hidrológico, la disposición de los recursos, y la distribución espacial de los elementos de interés (fuentes, manantiales, y pozos).

Teniendo en cuenta estas tres limitaciones, se ha realizado un planteamiento de muestreos sucesivos, tratando de aproximarnos cada vez más a la realidad objeto del modelo. Para realizar

el muestreo se trazó una cuadrícula de 10x10 km (Fig 4) con base las coordenadas proyectadas UTM huso 30 en ETRS-89.

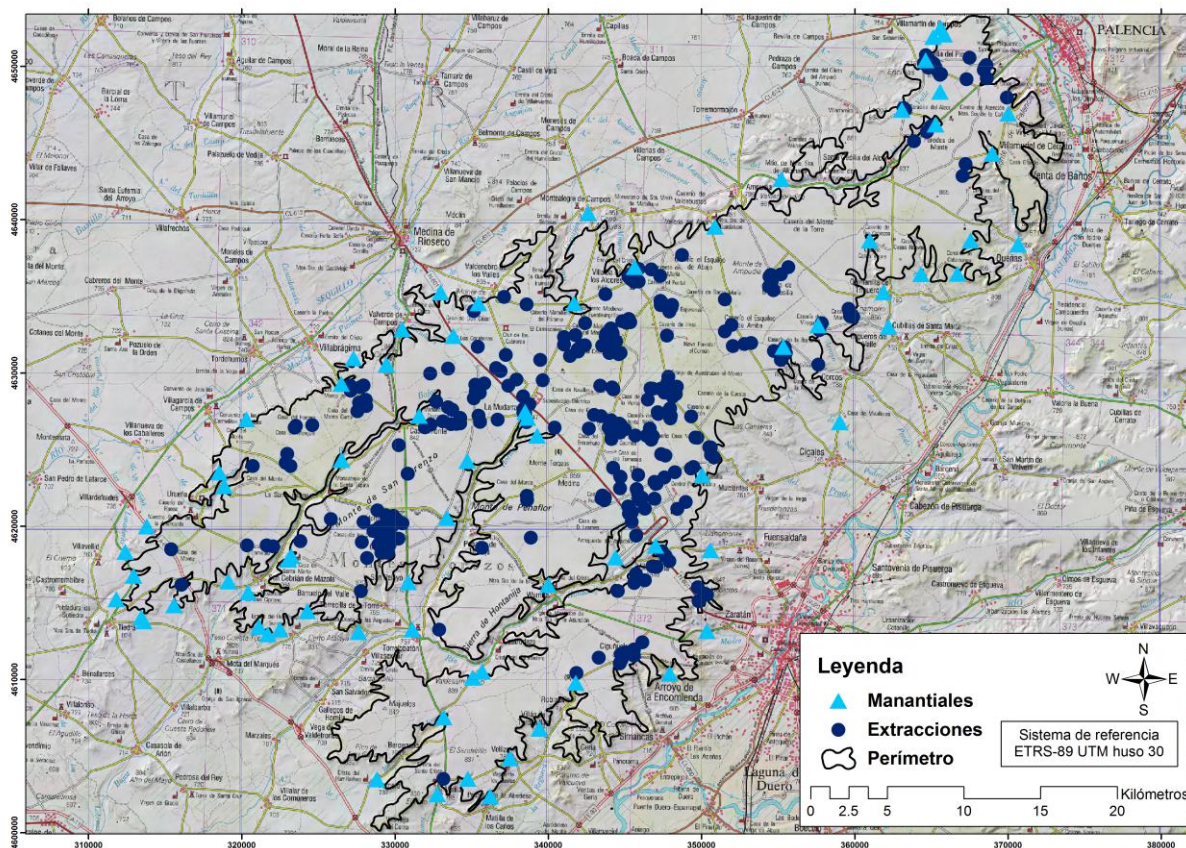


Fig. 4. Mapa de la cuadrícula de muestreo de 10 por 10 km con el inventario de pozos y manantiales

A partir de la cuadrícula de muestreo se trató de localizar y acceder a cada uno de los pozos y manantiales. Pero debido a la naturaleza privada de los primeros y al carácter estacional y su vulnerabilidad frente a las modificaciones topográficas de los segundos, no ha sido posible acceder o no se han podido obtener muestras de muchos ellos, impidiendo la medición del nivel freático o del caudal respectivamente. A pesar de ello, se ha procurado medir dos pozos por cuadrícula e identificar y aforar los principales manantiales.

2.2.2.1 Material utilizado

Una vez identificados y localizados los puntos que van a formar parte de la red de muestreo, se han realizado los análisis pertinentes para determinar las siguientes variables: caudal [l/s], nivel freático [m], pH, la conductividad eléctrica [$\mu\text{s}/\text{cm}$], oxígeno disuelto [mg/l] y concentración de nitratos [mg/l] y nitritos (presencia o ausencia); y la caracterización edafológica del suelo.

- Para la medición de dichos parámetros se ha empleado los siguientes materiales:
- Conductímetro portátil CM 35+ Crison® [30, CRISON 2010].
- Medidor de pH portátil Crison® [31, CRISON 2010].
- Oxímetro portátil OXI 45+ Crison® [32, CRISON 2010].

- Test de Nitratos 1.10020.0001 1.10020.0002 nitrat-test Merckoquant. [104, Merckoquant 2013].
- Equipo de Análisis de Suelos de la casa Tecnología y Equipos Diagnósticos S.A.
- Sonda piezométrica
- Cronómetro
- Recipiente aforado
- Cloruro Sódico
- Cinta métrica
- Botes para la recogida de muestras de agua para su análisis en el laboratorio.
- Molinete JDC Instruments. Flowatch. Air or liquid flow. Measurement Instrument.
- Cámara fotográfica
- Termómetro de campo

2.2.2.2 Reconocimiento del entorno

La aproximación a la zona de estudio se ha realizado mediante reconocimiento sobre el terreno de cada uno de los elementos significativos que lo componen.

A lo largo de todo el periodo de trabajo se han realizado diversos reconocimientos *in situ* del área de estudio durante las distintas épocas del año. Además de las salidas de muestreo planificadas espacio-temporalmente, se han realizado otras muchas visitas no programadas.

Durante los reconocimientos del terreno y la toma de muestras, se realizaron varias tomas fotográficas: del emplazamiento de los lugares muestreados, de los perfiles de suelo estudiados, de las fuentes inventariadas, y de cualquier otro elemento relevante para este estudio (Fig. 5).



Fig. 5. Ejemplo del interior de un pozo, donde se puede apreciar el nivel freático y el paquete de calizas.



Las labores llevadas a cabo durante las distintas salidas han sido: aforo de fuentes y manantiales, mediante técnicas físicas y químicas; medición *in situ* de variables físico-químicas del agua; adquisición de muestras de agua y suelo, para su posterior análisis en el laboratorio; toma de fotografías de la zona; y recopilación de información perceptual de sus pobladores y visitantes.

La recogida de muestras se ha realizado teniendo en cuenta la caracterización de la zona de estudio. Se han seleccionado las 5 fuentes (o manantiales) más relevantes, y varios emplazamientos de suelo de forma aleatoria. Las muestras de suelo se recogieron siguiendo las especificaciones establecidas en la obra “Técnicas de Análisis de Suelos” [61, Guitián & Carballas 1976]. Respecto a las de agua, se siguió el método descrito en la legislación nacional vigente [12, Boletín Oficial del Estado 1982].

2.2.2.3 Análisis de suelos

Los análisis de suelo han sido realizados con un Equipo de Análisis de Suelos de la casa Tecnología y Equipos Diagnósticos S.A. Se trata de un equipo de análisis cualitativo de las características del suelo, que permite determinar textura, color, pH, nitratos y amonio, fósforo, calcio, sulfatos y cloruros.

La determinación de la textura se realizó siguiendo el Método semicuantitativo de Tames, este método consiste en comprobar la intensidad de la plasticidad que presenta el suelo, mediante formación de filamentos de suelo de un determinado diámetro y con unas condiciones de humedad características.

La estimación del color se realizó por comparación con las tablas de color existentes en el manual del equipo de análisis.

Además se ha estudiado de forma complementaria el riesgo asociado al uso de sustancias egelantes en las carreteras. Se han documentado los posibles impactos ambientales que puede suponer el empleo de sustancias salinas egelantes, cloruro sódico y cloruro cálcico principalmente, en el mantenimiento de las condiciones de adherencia y seguridad de la red de carreteras. Estos compuestos salinos se utilizan tradicionalmente para reducir la temperatura de congelación del agua y evitar así la formación de placas de hielo sobre la superficie asfaltada de las carreteras. Este uso tan extendido y localizado en el tiempo, sobre todo en invierno, puede suponer una fuente de inmisión de contaminantes sobre los suelos y el acuífero estudiado en este proyecto. El estudio se efectuó en áreas colindantes a la carretera N-601 de la red Nacional del Estado, siguiendo los procedimientos analíticos de suelos [61, Guitián & Carballas 1976]. Es conocido el impacto de estas soluciones egelantes sobre los suelos edáficos, modificando su contenido en iones solubles y afectando a la conductividad de las aguas subterráneas [128, Sanz 2011] (cuyo texto completo se recoge en el epígrafe 4.3.2 de esta memoria).

Tanto a los extractos de suelo del estudio de los cloruros, como a las fuentes aforadas para la realización del modelo, se les ha realizado una prueba para la determinación de los nitratos y nitritos con los reactivos del test de Nitratos Merckoquant.



2.2.2.4 Análisis de aguas

Los análisis del agua se han realizado en su mayoría *in situ* con sondas portátiles de campo de la casa comercial CRISON. Se han medido los parámetros: pH, conductividad eléctrica, temperatura, sólidos totales, salinidad y oxígeno disuelto. La medición en campo, de estos parámetros impide el deterioro y la alteración de las muestras.

De forma complementaria se realizaron análisis de laboratorio para la cuantificación de la alcalinidad, de los cloruros y de los nitratos. Estos análisis se justifican por el uso generalizado del recurso hídrico subterráneo para el consumo humano. Por ello, para su determinación se ha recurrido a los métodos oficiales de análisis de aguas, aceites y grasas, carne y productos cárnicos etc. recogidos en la legislación vigente [11, Boletín Oficial del Estado. 1982]. Pero al tratarse de aguas de potencial consumo humano, se ha recurrido a la Orden de 1 de julio de 1987, que recoge los procedimientos experimentales necesarios para el análisis físico-químico del agua [12, Boletín Oficial del Estado 1987]. Los citados BOEs contienen las Órdenes que determinan los siguientes métodos analíticos: 1) para los cloruros, el método de Mohr; 2) para los nitratos el método de la absorbancia de luz ultravioleta a 220 y 275nm; 3) para la alcalinidad, volumetría complexométrica con EDTA. Como en las respectivas Órdenes no se describen los métodos, para el desarrollo analítico experimental se ha recurrido a los protocolos del Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico del Agua [20, Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico del Agua. 2013].

Estas técnicas de laboratorio han servido para corroborar los resultados medidos *in situ* mediante determinaciones colorimétricas (tiras de nitratos). Se trata de una medida menos precisa, pero más rápida y sencilla, que resulta muy útil para hacerse una idea del rango de concentraciones existentes o de la presencia o ausencia de la presencia de los aniones $(\text{NO}_3)^-$ y $(\text{NO}_2)^{2-}$, resultados suficientes para los objetivos propuestos.

2.2.2.5 Aforos

Los aforos se han realizados usando tres técnicas:

1. Aforo con molinete: medida directa de la velocidad del agua que al multiplicarlo por una sección da un caudal.
2. Aforo físico: se ha determinado el caudal midiendo el tiempo necesario para llenar recipiente aforado.
3. Aforos químicos: se ha obtenido midiendo la velocidad del agua, mediante la variación de la concentración de una sustancia indicadora, en este caso cloruro sódico convencional.

De los 72 manantiales identificados en la cartografía, únicamente se ha tenido acceso a 32 de ellos, de los que solo 5 han podido ser monitorizados, ya que son los únicos que reúnen las condiciones de acceso y las características necesarias para poder realizar un seguimiento con los medios disponibles. Además se puede afirmar que se trata de los principales puntos, ya que son los mismos que ha identificado la CHD en su inventario de manantiales permanentes.



Los puntos de aforo y toma de muestras de agua son:

- La Fuente de los Ángeles, Villanubla, Valladolid.
- Una fuente situada en el km 18 de la carretera Vp 5501, Peñafior de Hornija, Valladolid.
- El aliviadero del Embalse de la Santa Espina, Castromonte, Valladolid
- Las Fuentes La Mudarra, Valladolid: San Antonio, Porras y el Caño
- Fuente de Montealegre, Valladolid

2.2.3 Desarrollo de herramientas

2.2.3.1 Construcción de un SIG

El SIG se ha elaborado en un solo nivel de información, aunque se ha diferenciado por un lado la cartografía generada de la cartografía sólo transformada directamente de las fuentes documentales. En ocasiones se ha podido sobrepasar el ámbito del área de estudio por motivos de visualización gráfica, o por la comodidad a la hora de operar con capas con un marco regular con un número fijo de filas y columnas.

En el SIG se ha compilado toda la cartografía en formato *shape* y *Geo-Tiff* que se ha utilizado para llevar a cabo tanto los modelos de vulnerabilidad e hidrogeológico, como los análisis espaciales. Además para el estudio de la evolución espacial y temporal de la zona ha sido necesaria la construcción de leyendas comunes para poder realizar comparaciones.

El proceso de unificación de grafismos se ha centrado en las coberturas de CORINE y en las ortofotografías, a partir de los cuales se han hecho los cálculos de la evolución de los aprovechamientos del suelo, usando la leyenda de tercer nivel. A la hora de ver la evolución se agruparon las clases con el fin de cuantificar de forma clara y precisa los cambios detectados.

Por otra parte, con todas las entidades generadas y homogenizadas, se ha usado la herramienta SIG para construir el modelo de vulnerabilidad, cuya metodología y resultados se presenta de forma detallada en el epígrafe 4.2 de este trabajo de investigación, pero que de forma general responde al esquema siguiente.

1. Preparación y *rasterización* de las capas que intervienen en los índices
2. Asignación de los parámetros de acuerdo con las categorías tabuladas
3. Cálculo de índices: DRASTIC e IS.

Finalmente para garantizar la interoperabilidad y correcto uso y manejo del SIG se ha dotado de metadatos a toda la cartografía elaborada. Esta tarea evita la pérdida de información y proporciona el marco suficiente para realizar una lectura adecuada de los datos dentro del contexto de este trabajo.

2.2.3.2 Elaboración de indicadores de evolución espaciotemporal

Para establecer el modelo de comportamiento y poder realizar inferencias sobre la tendencia que tienen las actividades socioeconómicas vinculadas al desarrollo sostenible y la vulnerabilidad de la



masa acuífera, se han discretizado los usos del suelo y su evolución temporal (desde 1957 hasta la actualidad), empleando diversas técnicas de teledetección y fotointerpretación.

Se parte de la cartografía de referencia publicada en la *web* de la EEA [41, European Environment Agency 2012]. Todos los datos de partida pertenecen a las tres series temporales del proyecto CORINE: 1990, 2000 y 2006.

Los usos del suelo anteriores a 1990 se han extraído de las dos series de aerofotogramas estereoscópicos y pancromáticos en soporte físico digitalizados y georreferenciados. Ambas series poseen resoluciones, y características en cuanto a esquema y fechas de vuelo diferentes.

El vuelo del 1956-59, que forma parte de un ambicioso proyecto destinado a realizar un levantamiento cartográfico de Europa occidental, que en España es conocido popularmente como “vuelo americano” [95, Martínez-Alegría 2012], presenta una alta calidad en las imágenes al haberse minimizado en la medida de lo posible los efectos de las sombras volando prioritariamente en las horas centrales del día, durante días despejados de verano.

Las características técnicas de este vuelo, realizado en el marco de los acuerdos bilaterales España - Estados Unidos y Portugal EE.UU. [148, Vera et al. 2011] son las siguientes:

Vuelo Americano - 153 fotogramas

- Fechas de vuelo 1956/59
- Recubrimiento estereoscópico (60% longitudinal / 30% transversal)
- Escala media 1:33.000, altura 5.500 m
- Pancromático (blanco y negro)
- Soporte papel

Vuelo del IGN - 288 fotogramas

- Fecha de vuelo 1984
- Recubrimiento estereoscópico lateral 33% y 20 % superior e inferior
- Escala media 1:30.000
- Pancromático (blanco y negro)
- Soporte papel

La información de los vuelos fotogramétricos se ha completado con: el Modelo Digital de Elevaciones del Terreno (MDET) de 5x5m; las series de ortofotografías de los años 1997-98, 2002, 2005, 2009 y 2011 del PNOA; y las imágenes del satélite SPOT de los años 2005 y 2008 en 4 bandas (rojo, verde, azul e infrarroja).

Para el estudio de la evolución de los usos del suelo se ha utilizado CORINE *Land Cover* de tercer nivel, que se muestra en la Tabla 3, adjunta a continuación:



Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	COD
Superficies Artificiales	Zonas Urbanas	Tejido urbano continuo	111
		Tejido urbano discontinuo	112
	Zonas Industriales, comerciales e infraestructuras de comunicación	Zonas industriales o comerciales	121
		Infraestructuras variadas y terrenos asociados	122
		Zonas portuarias	123
		Aeropuertos	124
	Zonas de Extracción Minera, Vertederos y de Construcción	Zonas de extracción minera	131
		Presas, escombreras y vertederos	132
		Zonas de construcción	133
	Zonas Verdes y Espacios de Recreo	Zonas verdes urbanas	141
Equipamientos deportivos y zonas de ocio		142	
Áreas agrícolas	Tierras Labradas	Cultivos de secano	211
		Cultivos de regadío permanente	212
		Arrozales	213
	Cultivos Permanentes	Viñedos	221
		Frutales de secano	222
		Olivares	223
	Praderas	Praderas	231
	Zonas Agrícolas Heterogéneas	Cultivos anuales asociados a cultivos permanentes	241
		Mosaico de cultivos	242
		Cultivos anuales o permanentes vegetación natural	243
Sistemas agroforestales		244	
Bosques y áreas semi-naturales	Bosques	Frondosas	311
		Coníferas	312
		Bosques y formaciones arboladas mixtas	313
	Espacios de Vegetación Arbustiva y/o Herbácea	Pastizales	321
		Laderas y matorrales templados	322
		Matorrales xerófilos y mesófilos	323
		Matorral arbolado	324
	Espacios Abiertos con Poca o Sin Vegetación	Playas, dunas y arenales	331
		Roquedo y suelo desnudo	332
		Espacios con vegetación escasa	333
	Zonas incendiadas	334	
	Glaciares y nieves permanentes	335	
Humedal	Zonas Húmedas Continentales	Humedales y zonas pantanosas	411
		Turberas	412
	Zonas Húmedas Litorales	Marismas	421
		Salinas y zonas de cultivos marinos	422
	Zonas intermareales	423	
Masas de agua	Aguas Continentales	Cursos de agua	511
		Láminas de agua	512
	Aguas Marinas	Lagunas y litorales	521
		Estuarios y esteros	522
		Mares y océanos	523

Tabla 3. Leyenda CORINE de tercer nivel.

Para su representación se ha utilizado el código de colores RGB elaborado por la EEA y proporcionado en su página *web* [41, European Environment Agency 2012].

En cuanto a los usos de los suelos de los años 1959 y 1984, se ha partido del CORINE 1990 y se ha modificado los elementos y los atributos utilizando técnicas de fotointerpretación. Se ha modificado la geometría, los atributos y se ha adaptado la leyenda de cada una de las series de tal forma que se pudiera comparar los resultados obtenidos.



2.2.4 Creación del modelos

Los modelos matemáticos aplicados a la hidrogeología son una potente herramienta de trabajo que permite manejar eficazmente situaciones complejas y tratar al sistema acuífero como un todo, partiendo de unas simplificaciones arbitrarias. Pero estas simplificaciones cada vez serán menores, ya que la utilización de ordenadores de gran capacidad y técnicas de cálculo más eficaces harán a estas herramientas más precisas y de uso más generalizado [126, Sanz 2008].

Como el conocimiento hidrogeológico es la otra piedra angular de la tesis, partiendo del SIG se ha generado un modelo hidrogeológico de la masa de agua subterránea del Páramo de los Montes Torozos (DU-400032). Como todo modelo, su construcción ha exigido la elaboración de distintas aproximaciones sucesivas hasta llegar al modelo definitivo. El modelo hidrogeológico se ha completado con un modelo de vulnerabilidad basado en los índices DRASTIC e IS calculados mediante herramientas SIG.

Pero la descripción del comportamiento del agua mediante la modelación matemática, pueden realizarse desde infinidad de modelos para el mismo fenómeno esencialmente diferentes, dependiendo de los requerimientos establecidos por el diseñador y de las decisiones que toma durante el proceso de diseño. Así, el problema más difícil es cómo trasladar un fenómeno físico a un conjunto de ecuaciones que lo describan. Normalmente resulta imposible describir al fenómeno totalmente, por lo que se debe hacer de forma aproximada, y adecuada a los intereses para los que ha sido diseñado.

Debido a las condiciones cambiantes de los fenómenos naturales, y a la necesidad de la reducción en los grados de libertad del sistema para modelarlo, la idealización permite crear modelos más simples que el fenómeno original. A su vez los modelos simplificados son más rápidos y fáciles de manejar, de esta manera, el proceso inverso de la idealización, no consiste simplemente en derivar soluciones de las leyes ideales en condiciones específicas, sino que requiere adicionalmente de elementos no teóricos, tales como las correcciones, normalizaciones y ajustes, entre otros. Y en este caso, al igual que en la idealización no existen reglas generales conocidas que provengan de la teoría.

En las ciencias exactas existe una gran cantidad de leyes hipotéticas de semejanza, como el de la continuidad de la materia o la isotropía, así, todas las leyes que se refieren a estas propiedades se expresan en forma de Ecuaciones Diferenciales. Es un error considerar a la solución de la ecuación diferencial como la “ley”, ya que la ecuación puede poseer distintas soluciones bajo condiciones iniciales diferentes.

Cualquier modelo es una simplificación de una situación real que se conoce sólo puntualmente a través de un número limitado de datos. Si se conociese exactamente la situación real, no sería operativo ni posible reproducirla exactamente en el modelo planteado. El modelo es una simplificación, y su validez dependerá del objetivo que se pretende conseguir con el modelo.



Finalmente, como el objetivo de todo modelo es la representación idealizada de un objeto, la construcción del modelo del acuífero libre de los Montes Torozos, se ha realizado en función de las experiencias previas y de los datos disponibles. Por este motivo se ha optado por usar el programa Visual Modflow en su versión 2012.2. Se trata de programa de diferencias finitas, que permite elaborar tanto modelos conceptuales como numéricos de sistemas hidrogeológicos en régimen estacionario y transitorio, que en un futuro y a través de su herramienta Flex permitirá realizar simulaciones de transporte de solutos cuando se disponga de datos suficientes [67,Hill et al. 2000].

2.2.4.1 Modelo de hidrogeológico

El modelo hidrogeológico parte de una imagen abstracta del acuífero, y se construye apoyándose en los conocimientos previos sobre él. Su perfeccionamiento se produce mediante un ciclo iterativo de mejora continuada (observación, representación, comprobación). Durante el proceso, el modelador [147, Vela 2008], y el modelo están estrechamente relacionados entre sí (Fig.6).

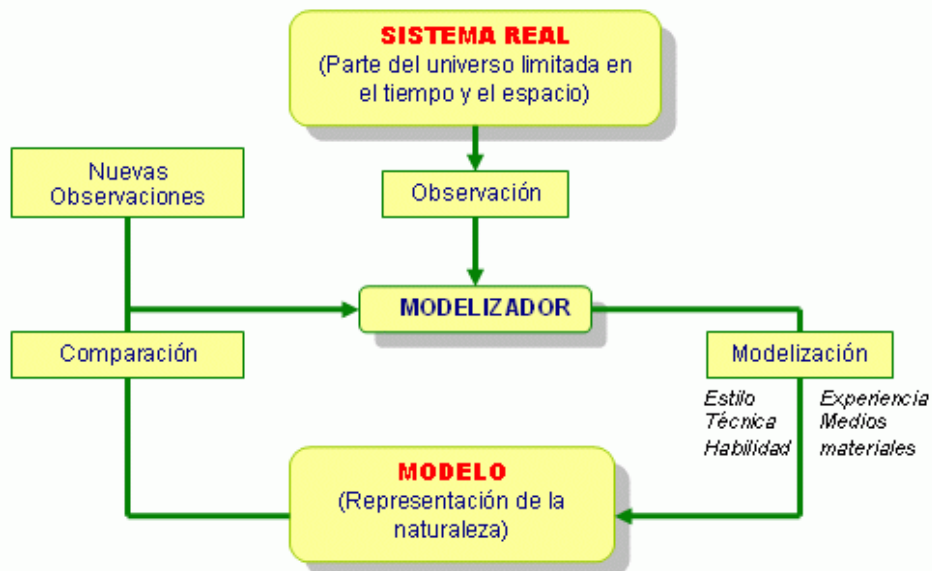


Fig. 6. Esquema de las relaciones Realidad-Modelador-Modelo en el proceso de mejora.

El modelo planteado trata de ser una entidad que medie entre la teoría (la explicación del comportamiento) y la realidad (los hechos), y se ha construido *ex profeso* para tratar de determinar la sostenibilidad hídrica y establecer un balance de entradas y salidas.

Antes de crear el modelo ha sido preciso establecer su estructura. La estructura de todo sistema físico, y por consecuencia la de los modelos que las representan, comprende tres niveles con sus correspondientes componentes internos y externos:

1. Estructura sistémica
 - 1.1. Composición: partes internas del sistema
 - 1.2. Entorno: agentes externos al sistema
 - 1.3. Conexiones: relaciones internas - externas



2. Estructura geométrica
 - 2.1. Posición
 - 2.2. Configuración: relación geométrica
3. Estructura temporal

En esencia, “los modelos no tienen valor inherente por sí mismos. Su valor está basado totalmente sobre el grado en que resuelve problemas del mundo real” [138, Smith 1999]. Dicho autor denomina a esta afirmación “la regla de oro del modelado”, a la que posteriormente propuso una serie de corolarios:

- Los modelos no son universalmente útiles, porque son diseñados para propósitos específicos.
- Un gran modelo de un problema equivocado es inútil.
- Aprender a modelar es mejor que aprender acerca de modelos.

Aunque sus propuestas están encaminadas hacia el ámbito de los diseños computacionales en video-juegos y aplicaciones bélicas, Smith plantea “*The 10 Commandments of Modeling*” (Las 10 reglas del modelado):

1. Simplifique, simplifique.
2. Aprenda del pasado.
3. Cree un modelo conceptual adecuado.
4. Construya un prototipo, que le permita clarificar la estructura y las capacidades del sistema.
5. Prevea las condiciones en que el modelo es inútil, localice el dominio de las variables y parámetros.
6. Base su modelo en características conocidas y reales del sistema bajo estudio. Es necesario identificar qué datos existen y cuáles son totalmente inaccesibles. Además hay que tener en cuenta que: no siempre se pueden obtener todos los datos que necesitas; no se pueden usar todos los datos que se tienen, ya que representan información fuera de tu interés o resultan inconsistentes; y toda la información debe ser tratada.
7. Los modelos generales son preferibles a los específicos, esto permite a los usuarios resolver situaciones específicas sin reconstruirlo.
8. Puesto que no existen reglas específicas para la idealización, confíe en sus propios juicios y socialícelos.
9. Fije restricciones universales y no específicas a los datos obtenidos de la medición.
10. Aprenda de sus propios modelos.

Por lo tanto para trasladar un proceso real a un modelo es necesario:

1. Adquirir la información y conocimientos previos sobre el sistema. En esta fase es importante la identificación de los componentes internos y externos del sistema y las relaciones entre ellos. Para realizar esta tarea es necesario asumir entidades y condiciones físicas más simples que aquellas que se estudian en la naturaleza.
2. Reconocimiento de las características del entorno que afectan al sistema y delimitación del intervalo de valores de éstas dentro del cual puede operar el modelo.



3. Especificación del objeto y alcance del modelo: identificación del problema y delimitación del marco espacial y temporal.
4. Asignación de los elementos modelo que caracterizan el estado del sistema.
5. Descripción matemática de la estructura del modelo. En definitiva, el modelo no es más que un conjunto de reglas que permitan predecir el estado futuro de un sistema a partir del conocimiento de su estado actual. Básicamente la estructura matemática del modelo está constituida por el conjunto de ecuaciones que relacionan los diferentes elementos del modelo, reproduciendo las interacciones observadas entre los componentes del sistema.
6. Verificación del modelo, ajuste a las mediciones preliminares de que se dispone y estimación de parámetros. En este punto se consideran dos tipos diferentes de datos, los datos de ensayo y los datos de verificación. Los datos de ensayo son empleados para estimar los parámetros del modelo, mientras que los de verificación son empleados para probar la validez del modelo. Si los resultados coinciden, se puede afirmar que el modelo describe adecuadamente al sistema.

Por lo general, el conocimiento de todos estos datos no es exhaustivo, y existe un amplio margen de error, al que hay que añadir la dificultad para determinar los límites (pueden no ser constantes ni en tiempo ni espacio). Estas limitaciones llevan a que el primer modelo que se construya sea sólo una aproximación muy pobre a la realidad que necesite gran cantidad de retoques y modificaciones. Por este motivo, el proceso de comprobación y ajuste tiene como finalidad ver que el modelo responda de forma adecuada a las acciones externas. En caso de que difiera de la realidad, se debe proceder a su modificación. Por su parte, la validación y calibración del modelo es un proceso complejo y delicado, que se sustenta en la confianza de los datos disponibles. Esta afirmación lleva a caer en la trivialidad de que unos datos parciales e imprecisos pueden tener como resultado un valor verdadero o ajustar el modelo, pero en este caso el modelo no sería útil.

Para realizar un modelo es fundamental hacer un inventario de los datos que van a ser necesarios. Este inventario requiere de una fase de documentación y búsqueda bibliográfica, una segunda fase de obtención de información sobre el terreno, y por último una fase de elaboración tratamiento y síntesis de los datos. Además de la obtención de los datos, es importante obtener series históricas suficientemente largas para que los efectos de las acciones puedan ser comprobados.

Para esta tarea es necesario seleccionar los intervalos de tiempo del inventario que se utilizarán en cada fase del modelado. La selección será en función del número de datos disponibles, una parte de los datos servirán para ajustar y calibrar el modelo, otra servirá para comprobar los resultados obtenidos en una simulación de la cual se disponga de datos reales. Si los resultados obtenidos no divergen, o lo hacen en una medida aceptable, se obtendrá el modelo en condiciones de uso [33, Custodio & Llamas 2001]. Es decir, la consecución de una adecuada caracterización y descripción, está en función de los procesos de abstracción e idealización, de los requerimientos establecidos por el diseñador, y de las decisiones que toma durante el proceso de diseño. Toda la estructura, parámetros y proceso de construcción del modelo están detallados en el capítulo 4.2.



2.2.4.2 Modelo de vulnerabilidad

La concepción y construcción de este modelo no ha seguido el proceso completo de modelado, ya que en origen no se planteó como un modelo en sí, sino como una simple herramienta complementaria para definir los usos potenciales de los recursos y la capacidad de acogida del medio de determinadas actividades. Sin embargo, una posterior revisión de los resultados en su conjunto, ha conducido al desarrollo de una metodología pormenorizada para este modelo parcial.

Partiendo de la información elaborada del SIG, y de los resultados incipientes de los primeros modelos hidrogeológicos, se plantea este modelo como aplicación directa de las metodologías descritas para el río Águeda [3, Albuquerque et al. 2013], que se fundamentan en el uso directo del álgebra de mapas de las herramientas SIG, como se describe a continuación.

2.2.4.2.1 Decisiones previas y adecuación de la información

Se ha definido un marco de trabajo rectangular que incluya todo el perímetro de la masa de agua. Como los cálculos de los índices se realizan todos con herramientas SIG, antes de comenzar es necesario adoptar determinadas decisiones en relación a las condiciones de contorno empleadas. Este proceso de decisión es el verdadero punto de partida de nuestro modelo de vulnerabilidad, ya que tanto la identificación del problema, como el modelo conceptual se han derivado de los concebidos previamente para el modelo hidrogeológico.

La primera decisión es determinar qué superficie se desea modelar (calcular), por limitaciones de los datos y por el carácter aislado de la unidad. Ya que se trata de un acuífero colgado, se decidió únicamente limitar el área de cálculo a la superficie comprendida por el perímetro de la masa de agua.

Posteriormente, para la creación del modelo de vulnerabilidad se parte de la discretización del área de interés en un SIG. Usando las experiencias anteriores se adoptó una resolución de *pixel* de 50x50 m. Esta decisión es de carácter arbitrario, pero tratándose de una superficie aproximada de 1000 km², en un contexto regional, la pérdida de información por generalización es asumible.

Sabiendo que se va a modelar sólo la masa de agua y que se va a trabajar con capas de tipo *raster*, se hace necesario preparar y transformar toda la información vectorial del SIG. Para llevar a cabo esta tarea, y partiendo de una cartografía básica, se procede a la elaboración de otro SIG propio para el modelo que contenga todas las capas de cálculo en formato *raster* junto con alguna cobertura básica de referencia, que contextualice geográficamente los resultados.

Las transformaciones necesarias para poder aplicar las herramientas de cálculo de los programas informáticos son:

- 1) un recorte homogéneo para todas las capas;
- 2) si la información de origen se encuentra en formato vectorial, es necesario *rasterizar* la cobertura de acuerdo al atributo objetivo usando como tamaño de *pixel* el definido anteriormente;



- 3) si la capa es tipo *raster*, será preciso comprobar que posee la citada resolución; en caso contrario sería necesario atribuírsela para evitar futuros errores; para ello basta con generar un nuevo *raster* con el tamaño de *pixel* cambiado;
- 4) una vez que todas las coberturas de cálculo están *rasterizadas* y con un valor de *pixel* homogéneo, es necesario parametrizar, mediante reclasificaciones, los valores de las coberturas temáticas de acuerdo a los valores tabulados para los diferentes parámetros usando las tablas 4 a 16.

Parámetros para DRASTIC:

Parámetro D _ Profundidad de la zona no saturada

Profundidad (m)	Índice
<1,5	10
1,5-4,6	9
4,6-9,1	7
9,1-15,2	5
15,2-22,9	3
22,9-30,5	2
>30,5	1

Tabla 4. Valores del parámetro D del DRASTIC.

Parámetro R _ Recarga Profunda del acuíferos

Recarga (mm/año)	Índice
<51	1
51-102	3
102-178	6
178-254	8
>254	9

Tabla 5. Valores del parámetro R del DRASTIC.

Parámetro A _ Material del acuífero

Naturaleza del acuífero	Índice	Índice típico
Esquisto arcilloso, arcillas metamorizadas	1-3	2
Rocas metamórficas e ígneas	2-5	3
Rocas metamórficas e ígnea alteradas o fracturadas	3-5	4
Arenisca, Calizas y Arcillas estratificadas	5-9	6
Areniscas macizas	4-9	6
Calizas macizas	4-9	6
Arenas y basaltos	4-9	8
Basaltos	2-10	9
Calizas karstificadas	9-10	10

Tabla 6. Valores del parámetro A del DRASTIC.



Parámetro S _ Tipo de suelo

Suelo	Índice
Fino o ausente	10
Gravas	10
Arenas	9
Turba	8
Arcilla agregada y-o expansible	7
Franco Arenoso	6
Franco	5
Franco limoso	4
Franco Arcilloso	3
Limoso	2
Arcilla no agregada y no expansible	1

Tabla 7. Valores del parámetro S del DRASTIC.

Parámetro T _ Topografía

Pendiente (%)	Índice
<2	10
2-6	9
6-12	5
12-18	3
>18	1

Tabla 8. Valores del parámetro T del DRASTIC.

Parámetro I _ Impacto de la zona no saturada

Zona no saturada	Índice	Índice típico
Capa confinante	1	1
Arcilla/Limo	2-6	3
Esquisto arcilloso, Lutitas	2-5	3
Calcáreo	2-7	6
Arenisca	4-8	6
Areniscas, calizas y lutitas estratificadas	4-8	6
Arena e gravas con porcentajes significativos en limo y arcilla	4-8	6
Rocas metamórficas/ígneas	4-8	4
Arenas y gravas	4-8	8
Basalto	2-10	9
Calizas karstificadas	8-10	10

Tabla 9. Valores del parámetro I del DRASTIC.

Parámetro C _ Conductividad hidráulica

Conduc. hidráulica (m/d)	Conduc hidráulica (m/s)	Índice
<4,1	<4,74E-05	1
4,1-12,2	4,74E-05 - 1,41E-04	2
12,2-28,5	1,41E-04 - 3,30E-04	4
28,5-40,7	3,30E-04 - 4,71E-04	6
40,7-81,5	4,71E-04 - 9,43E-04	8
>81,5	>9,43E-04	10

Tabla 10. Valores del parámetro C del DRASTIC.



Parámetros para el Índice de Vulnerabilidad

Parámetro D _ Profundidad da zona no saturada

Profundidad (m)	Índice
<1,5	100
1,5-4,6	90
4,6-9,1	70
9,1-15,2	50
15,2-22,9	30
22,9-30,5	20
>30,5	10

Tabla 11. Valores del parámetro D del IS.

Parámetro R _ Recarga Profunda del acuífero

Recarga (mm/año)	Índice
<51	10
51-102	30
102-178	60
178-254	80
>254	90

Tabla 12. Valores del parámetro R del IS.

Parámetro A _ Material del acuífero

Naturaleza del acuífero	Índice	Índice típico
Esquisto arcilloso, arcillas metamorizadas	10-30	20
Rocas metamórficas e ígneas	20-50	30
Rocas metamórficas e ígnea alteradas o fracturadas	30-50	40
Arenisca, Calizas y Arcillas estratificadas	50-90	60
Areniscas macizas	40-90	60
Calizas macizas	40-90	60
Arenas y basaltos	40-90	80
Basaltos	20-100	90
Calizas karstificadas	90-100	100

Tabla 13. Valores del parámetro A del IS.

Parámetro T _ Topografía

Pendiente (%)	Índice
<2	100
2-6	90
6-12	50
12-18	30
>18	10

Tabla 14. Valores del parámetro T del IS.

Parámetro S _ Tipo de suelo

Suelo	Índice
Fino o ausente	100
Gravas	100
Arenas	90
Turba	80
Arcilla agregada y-o expansible	70
Franco Arenoso	60
Franco	50
Franco limoso	40
Franco Arcilloso	30
Limoso	20
Arcilla no agregada y no expandible	10

Tabla 15. Valores del parámetro S del IS.



Parámetro US _ Usos de suelo (en art. CORINE)

Código CORINE	Leyenda tercer nivel	Índice
111	Artificial Urbana Continua	75
112	Artificial Urbana Discontinua	70
121	Artificial Industrial-comercial	75
122	Artificial Industrial de transporte	75
123	Artificial Industrial Puertos	75
124	Artificial Industrial Aeropuertos	75
131	Artificial Minas Extracción Mineral	80
132	Artificial Minas Presas	100
133	Artificial Minas Construcciones	80
141	Artificial No-agrícola Zonas verdes urbanas	75
142	Artificial No-agrícola Instalaciones deportivas	75
211	Agrícola Arable de Secano	90
212	Agrícola Arable Regadío Permanente	90
213	Agrícola Arable Arroz	90
221	Agrícola Permanente Viñedo	70
222	Agrícola Permanente Frutales	70
223	Agrícola Permanente Olivar	70
231	Agrícola Pasto Pasto	50
241	Agrícola Heterogéneo anuales asociados a permanentes	50
242	Agrícola Heterogéneo Mosaico	50
243	Agrícola Heterogéneo pral. ocupación agrícola	50
244	Agrícola Heterogéneo Forestal	50
311	Seminatural Forestal Frondosas	0
312	Seminatural Forestal Coníferas	0
313	Seminatural Forestal Mixto	0
321	Seminatural Herbáceo Pastizal Natural	0
322	Seminatural Herbáceo Laderas y matorrales	0
323	Seminatural Herbáceo Esclerófila	0
324	Seminatural Herbáceo Matorral boscoso transición	0
331	Seminatural Espacio Abierto Playas	0
332	Seminatural Espacio Abierto Roquedo	0
333	Seminatural Espacio Abierto Vegetación escasa	0
334	Seminatural Espacio Abierto Quemado	0
335	Semiantural Espacio Abierto Glaciares	0
411	Humedales Humedales Zonas pantanosas	50
412	Humedales Humedales Turberas	50
421	Humedales Costas Marismas	50
422	Humedales Costas Salinas	50
423	Humedales Costas Intermareales	50
511	Masas Agua Continentales Cursos	0
512	Masas Agua Continentales Lagos	0

Tabla 16. Valores del parámetro US del IS.

2.2.4.2.2 Cálculo de índices

El cálculo se realiza con la calculadora de mapas disponibles en las herramientas SIG, que tienen como fundamento teórico el álgebra de Boole. Las operaciones, factores de ponderación y categorías resultantes se muestran en las tablas 17 a 20:



DRASTIC: fórmula, factores de ponderación y categorías

$$DRASTIC = D_i \times D_p + R_i \times R_p + A_i \times A_p + S_i \times S_p + T_i \times T_p + I_i \times I_p + C_i \times C_p +$$

Letra	Significado	Factor de Ponderación
D	Profundidad Zona No Saturada	5
R	Recarga del acuífero	4
A	Material del acuífero	3
S	Tipo de suelo	2
T	Topografía	1
I	Impacto de la Zona No Saturada	5
C	Conductividad Hidráulica	3

Tabla 17. Factores de ponderación de cada parámetro de DRASTIC.

Clases de vulnerabilidad según DRASTIC

Vulnerabilidad	Índice DRASTIC	Color	RGB
Baja	<79	Violeta	153-051-255
	80-99	Añil	051-051-153
	100-119	Azul	000-000-255
Media	120-139	Verde oscuro	000-102-000
	140-159	Verde claro	000-204-000
Alta	160-179	Amarillo	255-255-000
	180-199	Naranja	255-153-000
Muy Alta	>200	Rojo	255-000-000

Tabla 18. Categorías de vulnerabilidad de DRASTIC.

IS: fórmula, factores de ponderación y categorías

$$IS = D_i \times D_p + R_i \times R_p + A_i \times A_p + T_i \times T_p + US_i \times US_p$$

Letra	Factor de Ponderación
D	0.186
R	0.212
A	0.259
T	0.121
US	0.222

Tabla 19. Factores de ponderación de cada parámetro de IS.

Clases según el método del Índice de Susceptibilidad (IS) (in Luis Ribeiro)

Vulnerabilidad	Índice IS	Color	RGB
Extremadamente Baja	<30	Violeta	153-051-255
Muy Baja	30-40	Añil	051-051-153
Baja	40-50	Azul	000-000-255
Moderadamente Baja	50-60	Verde oscuro	000-102-000
Moderadamente Alta	60-70	Verde claro	000-204-000
Alta	70-80	Amarillo	255-255-000
Muy Alta	80-90	Naranja	255-153-000
Extremadamente vulnerable	>90	Rojo	255-000-000

Tabla 20. Categorías de vulnerabilidad de IS.



2.2.5 Determinación de la sostenibilidad

En el sentido más estricto de la sostenibilidad, ésta sólo se puede plantear si existe un recurso con un determinado valor. Dicho valor debe incluir, no sólo el económico, sino cualquier otro aspecto que pueda ser importante y evaluable desde el punto de vista ambiental, ecológico, social y/o económico.

Desde el punto de vista metodológico la determinación de la sostenibilidad se ha apoyado en la integración de cada uno de los fenómenos estudiados, de forma que se han seleccionado los indicadores de sostenibilidad más significativos para los sistemas hídricos, y a partir de ellos se ha realizado una valoración *ad hoc* de cada uno para la masa de agua de los Montes Torozos. La valoración en cada caso está en función de la forma en que se ha determinado el indicador [16, Cai et al. 2003].

Los indicadores seleccionados para determinar la sostenibilidad integral del acuífero son:

1. Fiabilidad del sistema de abastecimiento de agua
2. Resiliencia
3. Vulnerabilidad y riesgos
 - 3.1. Vulnerabilidad intrínseca
 - 3.2. Vulnerabilidad extrínseca
 - 3.3. Riesgos
4. Integridad del sistema ambiental
 - 4.1. Marco regulatorio
 - 4.2. Evolución multitemporal
 - 4.3. Eco-condicionalidad
 - 4.4. Ordenación Territorial
5. Equidad en la distribución del agua
6. Viabilidad económica de la explotación

Así por ejemplo, la fiabilidad va a estar determinada, de acuerdo con el Plan Hidrológico de la Cuenca de 2009 [25, Confederación Hidrográfica del Duero de 2009] y teniendo en cuenta el nuevo plan de 2015, a partir de la definición del "Buen estado" tanto cuantitativo como cualitativo. Tarea para la cual se ha recurrido a los valores obtenidos del modelo matemático y los análisis físico-químicos. Este tipo de valoración se ha realizado para cada uno de los seis indicadores analizados

Los indicadores valorados entre 1 y 10 (siendo 1 el valor más bajo y por consiguiente menos sostenible y 10 el máximo valor y por tanto el óptimo desde el punto de vista de la sostenibilidad) se han representado en un gráfico radial, a través del cual se ha determinado la sostenibilidad integrada del acuífero. Esta metodología ha sido desarrollada a partir de los trabajos de Cai [16, Cai et al. 2003] y Vishnu [151, Vishnu et al 2011].

El resultado obtenido es un polígono que muestra de un modo sintético el estado de cada uno de los indicadores y una visión comparativa del conjunto. A partir del diagnóstico del estado general



del acuífero es más fácil proponer medidas de uso racional y eficiente de los recursos de forma que mejoren la valoración de cada uno de los indicadores, principalmente aquellos que presenten un mayor impacto negativo, sin olvidar tratar de mantener aquellos indicadores que hasta la fecha presentan valores de sostenibilidad más elevados y manifiesten un buen estado del acuífero en el aspecto considerado.

CAPÍTULO III:

Caracterización de la zona de estudio



3.1 MARCO DE TRABAJO

En lo que respecta al contexto geográfico el estudio incluye todos los términos municipales que posean una parte de su superficie sobre el páramo, a pesar de que muchos de ellos carezcan de población sobre él. Se ha adoptado este marco para evitar dejar huecos a la hora de generar las salidas gráficas (mapas y planos), poder establecer relaciones espaciales y poder elaborar una cartografía continua.

3.1.1 Torozos, toponimia y contexto histórico

Hay distintas teorías sobre el significativo de la toponimia de la zona, pero ninguna satisface a lugareños y estudiosos. Algunos autores dicen que su nombre proviene de su proximidad a la ciudad de Toro, otros postulan que el nombre proviene de su altura, pero parece ser que la hipótesis más verosímil sitúa el origen de la toponimia en la cobertura vegetal y uso del suelo.

El Páramo de los Montes Torozos, junto con Los altos de La Muela, son las únicas elevaciones representativas de la provincia de Valladolid. La unidad geomorfológica del páramo está rodeada por una cadena de cerros testigos. Se trata de relictos aislados del páramo por efecto de los procesos erosivos, por lo que a efectos hidráulicos carecen de continuidad y no han sido considerados en este estudio.

Históricamente, entre los siglos X a XVII hay que resaltar la riqueza forestal y cinegética de la zona. Principalmente predominaban las especies mediterráneas como el quejigo, la encina y pequeños matorrales como la jara, la retama o el espino. Esta riqueza, junto con la importancia estratégica, como frontera natural, y posteriormente militar han dado lugar a que este promontorio se jalonara de fortalezas, torreones y castillos, actualmente muchos abandonados y en ruinas. Estas edificaciones se levantaban sobre pequeños cerros o al borde del páramo, lo que les otorgaba fama de inhóspitos. El clima seco y extremo, así como las dificultades causadas por la elevación, han contribuido a que la población sea escasa, y se caracterice por asentamientos pequeños y compactos, con casas de adobe o piedra con pocos balcones y galerías. Por este motivo los abrevaderos y fuentes que se conservan responden a auténticas necesidades, y siempre están localizadas en el borde del páramo, en los incipientes valles.

3.1.2 Medio físico

3.1.2.1 Localización geográfica

El páramo se sitúa en la zona central de la denominada Meseta Norte peninsular o Depresión del Duero, entre el Pisuega (al este), Tierra de Campos (por el norte y oeste) y el valle del Duero y la Campiña de Villalar (por el sur). Ocupa el noroeste de la provincia de Valladolid y suroeste de Palencia con una superficie aproximada de 980 km², en su parte más elevada y de 1550 en su base [26, Confederación Hidrográfica del Duero 2013]. Simplificando al máximo su forma, se podría asemejar a un triángulo invertido, que se extiende entre las coordenadas UTM mínimas 312011, 4600175 y máximas 373620, 4653250 en ETRS 89 huso 30 N (Fig. 7). Está comprendido

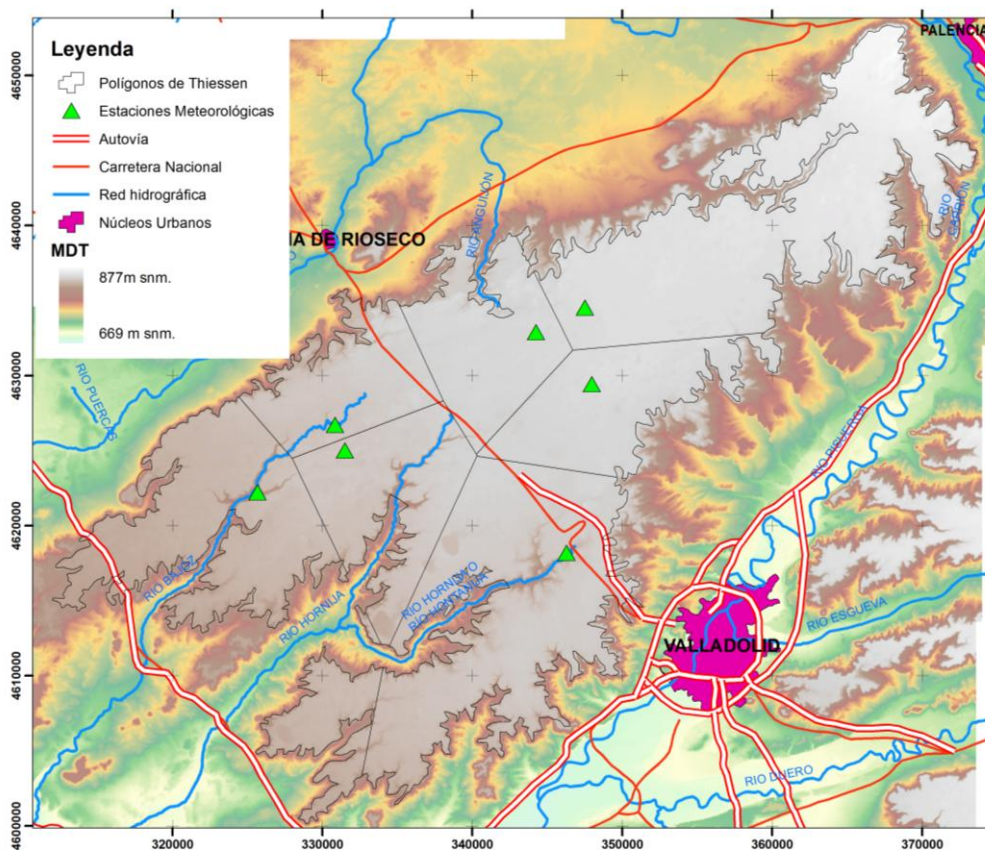


Fig. 8. MDET del páramo con la situación de las estaciones meteorológicas y sus polígonos de Thiessen.

Se ha usado la estación de Villanubla (nº 2539) como estación de referencia, debido a su continuidad temporal y fiabilidad de los datos registrados. Al objeto de validar la representatividad del resto de las estaciones, con series temporales más cortas, se ha efectuado una la correlación estadística de temperatura y precipitación existentes con la estación de referencia, cuyos resultados se muestran en la tabla 22.

	Precipitación	Temperatura
2539-2532	0,96	1,00
2539-2533	0,98	1,00
2539-2536U	0,73	0,99
2539-2538	0,85	1,00
2539-26001	0,75	0,99
2539-26071	0,80	1,00

Tabla 22. Correlación de la temperatura y la precipitación de las estaciones respecto a la de referencia.

Los coeficientes de correlación obtenidos permiten validar la representatividad de los cálculos meteorológicos desarrollados para la estación de 2359 pudiendo aplicarse a todo el páramo, ya que además no existe ninguna barrera o elemento geográfico capaz de modificar las condiciones climáticas en la superficie del páramo.

Por tanto, para la estimación de los valores meteorológicos totales medios se han utilizado polígonos de Thiessen definidos a partir de la ubicación de las estaciones de medida y se les ha



asignado a cada uno de ellos los valores medios correspondientes a cada estación. La red de polígonos se expone en la Fig. 8.

Los valores medios de los parámetros meteorológicos medios son:

- Pluviometría (P) de 456 mm/año
- Temperatura (T) de 11,14° C
- Evapotranspiración Potencial (ETP) Thornthwaite sin corregir de 593 mm/año
- Evapotranspiración Potencial (ETP) Thornthwaite corregida de 655 mm/año
- Evapotranspiración Real (ETR) por Turc de 312 mm/año
- Vientos dominantes son de componente Norte-Este

Con la distribución mensual de los datos P y T se elabora el diagrama ombrotérmico de la Fig. 9 y el diagrama de del balance del la Fig. 10, muy similar al de Ballester [8, Ballester et al. 1983].

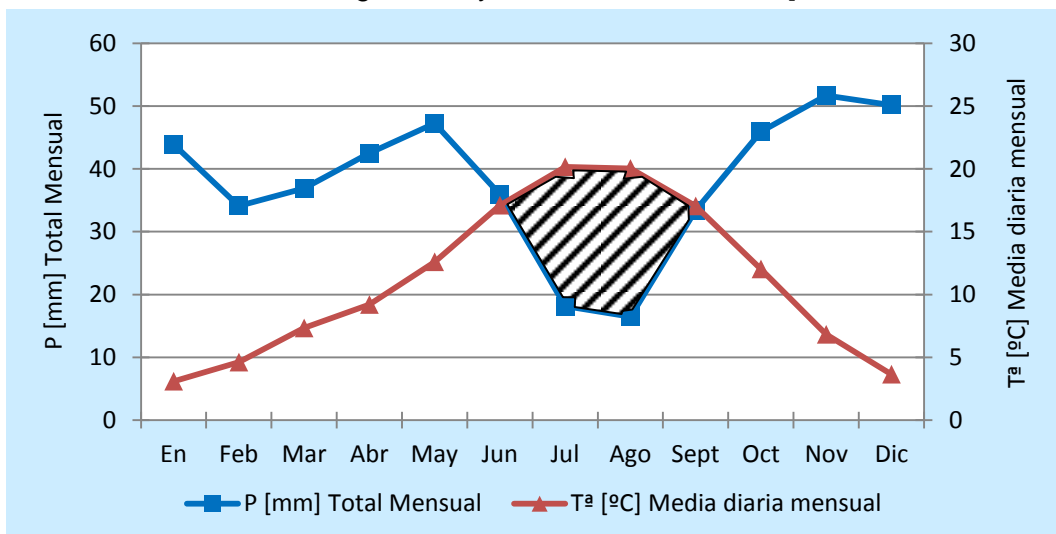


Fig. 9. Diagrama ombrotérmico de la estación de Villanubla.

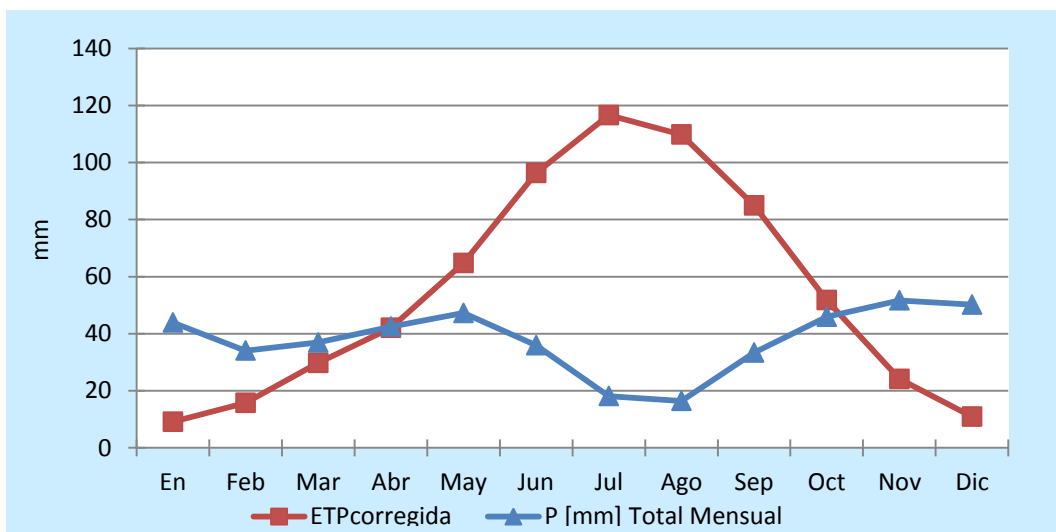


Fig. 10. Diagrama de distribución de ETP y P de la estación de Villanubla.



Relacionando la ETP y las P mensuales se obtiene una gráfica en la que se observa con claridad los meses de recarga y los de estiaje, válidos para la definición de los límites temporales de las curvas de agotamiento.

La lluvia útil media (P-ETR) es de 134 mm/año, y su distribución a lo largo del año se muestra en la Fig. 11.

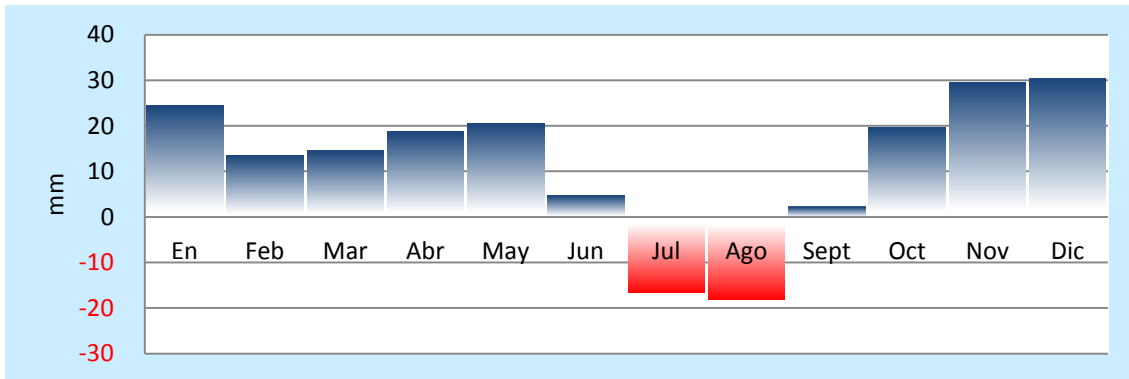


Fig. 11. Diagrama anual del balance hídrico de la estación de Villanubla.

Los resultados obtenidos del análisis de las variables climáticas permiten clasificar el clima como mediterráneo con influencia continental y no continental, como suele considerarse a la cuenca del Duero. Esta clasificación se corrobora con la clasificación Köppen del Iberian Atlas [1, Agencia Estatal de Meteorología de España & Departamento de Meteorología e Clima 2011], que clasifica el clima como templado, con un periodo marcadamente seco y caluroso en verano.

3.1.2.3 Contexto geológico

La cuenca sedimentaria terciaria del Duero actuaría al final del Terciario como un mar interior en régimen endorreico, rodeado de cordilleras conformadas por materiales paleozoicos y mesozoicos más antiguos, y elevados por efecto de los paroxismos hercínicos y alpínicos, tal y como se observa en la Fig. 12.

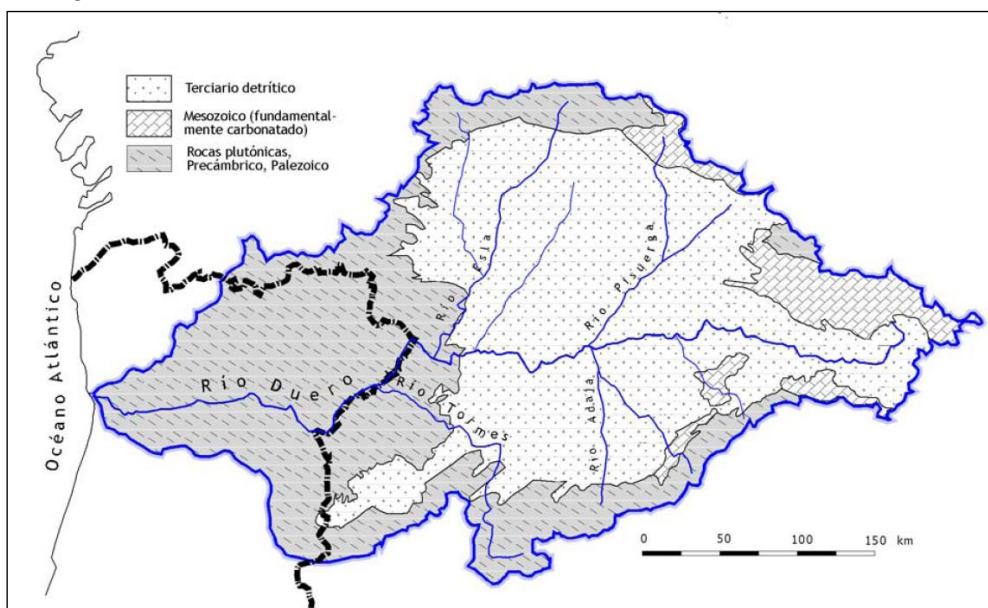


Fig. 12. Estructura geológica de la Cuenca del Duero [122, Sánchez 2006].



3.1.2.3.1 Estratigrafía

En la zona de estudio afloran materiales pertenecientes al Neógeno Mioceno y al Cuaternario que han sido depositados en régimen continental. El Mioceno ocupa la totalidad de la zona y está parcialmente recubierto por materiales Pliocenos y Cuaternarios aluviales y coluviales de variada naturaleza.

Mioceno

Estratigráficamente los materiales de la zona de estudio corresponden a los términos de colmatación miocena de la serie sedimentaria de la cuenca Terciaria del Duero, y está constituida por sedimentos generados en un medio muy salino y de muy baja energía, depositados en el Pontiense.

Están representados los tres tramos clásicos de Mioceno castellano en la zona central de la cuenca, expuestos en la Fig. 13 en el entorno de Cigales (Valladolid), y definidos por Hernández-Pacheco [66, Hernández-Pacheco 1915], que de muro a techo son:

- Facies Tierra de Campos
- Facies de las Cuestas
- Calizas de los Páramos

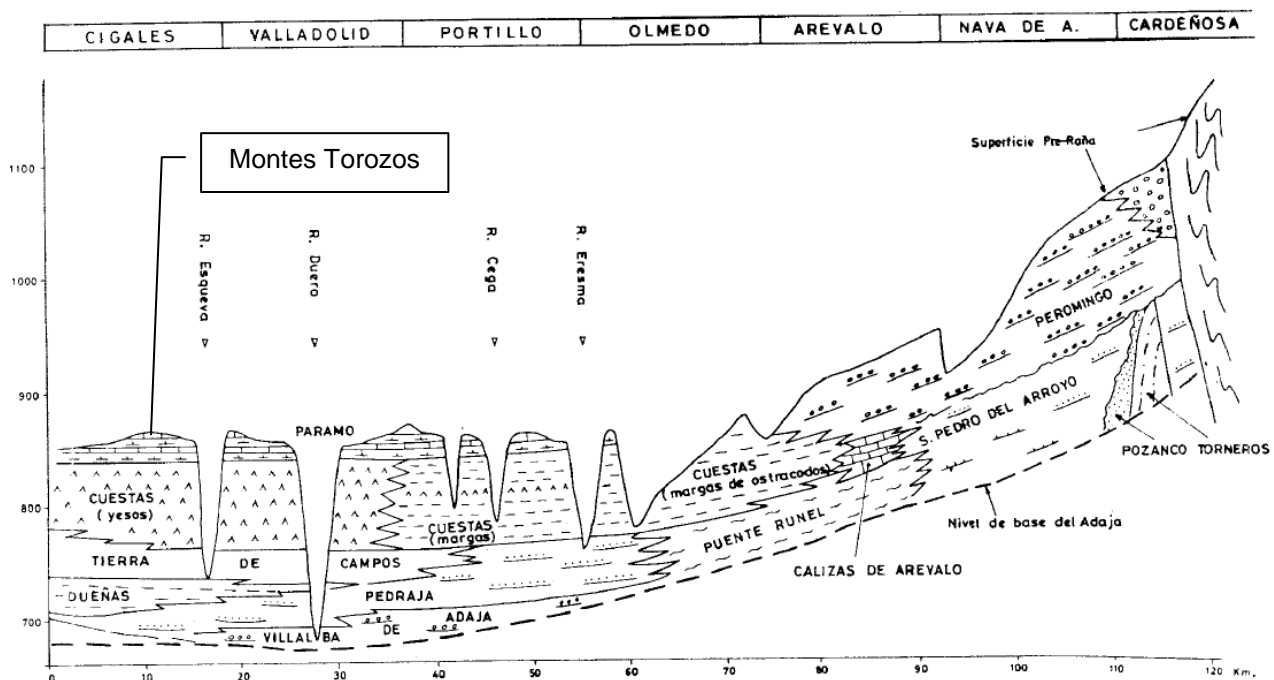


Fig. 13. Estructura del páramo [72, Instituto Geológico y Minero de España 2012].

El páramo está formado por un nivel inferior constituido por una serie de arcillas y margas yesíferas y calcáreas que configuran las cuestas. El contacto es gradual a techo y aparecen niveles calcáreos intercalados hasta constituir series de calizas continuas, que constituyen el cuerpo principal del acuífero como se puede ver en la Fig. 14.

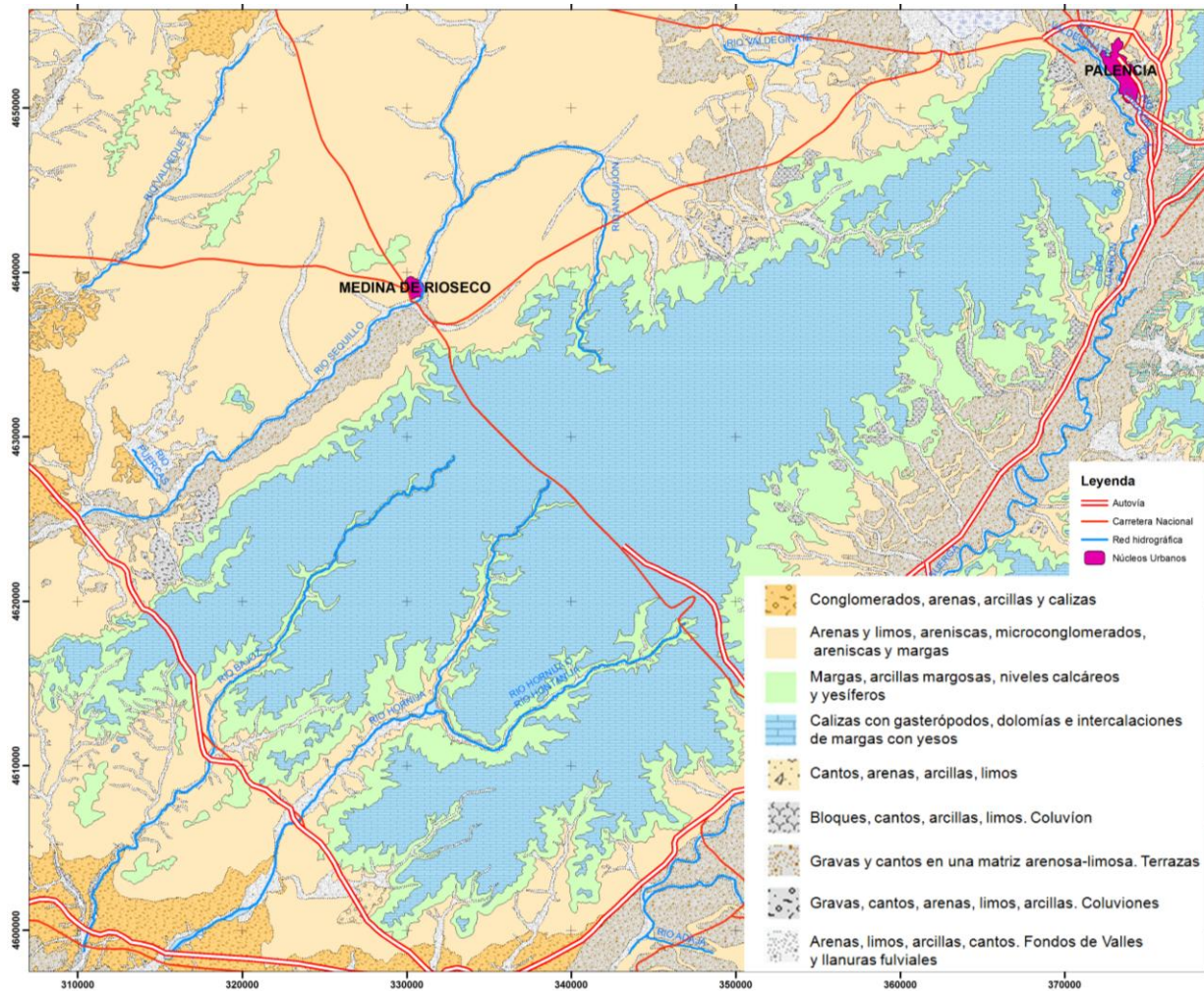


Fig. 14. Mapa geológico [79, Junta de Castilla y León. 2013].

a) Facies Tierra de Campos

Es una serie formada por arcillas limo-arenosas ocre, con paleocanales arenosos y conglomeráticos intercalados. En la parte más alta de esta serie se disponen algunos niveles de calizas palustres y paleosuelos.

Esta serie presenta una cierta permeabilidad en los niveles arenosos y conglomeráticos.

El conjunto de ambas sucesiones no supera unas pocas decenas de metros.

b) Facies de las Cuestas

Serie constituida por arcillas, margas yesíferas, intercalaciones de calizas y yesos especulares en algunas zonas. En la base hay niveles de margas, arcillas y limos con abundantes fósiles. El tramo superior es un paso gradual a las Calizas inferiores del Páramo, que se evidencia por un aumento de los términos carbonatados. El espesor de esta serie puede llegar a más de 70 m y conforman las cuestas morfológicas que enlazan las campiñas de las zonas llanas de la Tierra de Campos (y equivalentes) con los Páramos calcáreos de coronación.

El registro paleontológico constituido principalmente por ostrácodos, gasterópodos y restos vegetales, permite datar esta serie entre el Mioceno Medio y Superior, concretamente desde finales del Astaraciense (Aragoniense Superior) al Vallesiense Inferior.



Sedimentológicamente representa un sistema fluvio-lacustre con asociaciones deltaicas y con encharcamientos evaporíticos. Los sistemas lacustres pueden recibir aportes terrígenos finos, como prueban la presencia de los niveles más limosos.

Desde un punto de vista hidrogeológico, y en conjunto, se puede considerar como un paquete impermeable.

c) *Calizas del Páramo*

En la serie clásica propuesta por Hernández Pacheco [72, Instituto Geológico y Minero de España 2012] solo se identifica un nivel de calizas del Páramo, pero Mediavilla [100, Mediavilla & Dabrio 1988] diferencian actualmente tres niveles sedimentarios, que incluyen dos niveles de caliza separados entre sí por un nivel de materiales con una mayor componente de terrígenos (margas calcáreas y arenosas). Haciendo costar este último autor que este nivel de terrígenos se apoya discordantemente sobre el nivel inferior de calizas.

Nivel inferior calcáreo

Tiene un espesor muy variable, de 0.4 a 5m, pero con una tendencia al engrosamiento hacia el SO del páramo. Se trata de un conjunto de calizas microcristalinas con gasterópodos, ostrácodos y charáceas, bien estratificadas y en capas de 20 a 50 cm, y con juntas margosas centimétricas.

El contacto a muro con las arcillas de la facies de las Cuestas tiene una vergencia hacia el SO de unas 2 milésimas, estimadas cartográficamente a partir del contacto (permeable-impermeable) se ha tratado de generar una base al paquete de calizas. Para ello se ha partido de la digitalización del contacto en las cuestas entre materiales permeables (calizas) e impermeables (margas) usando ortofotografías 0,25 m de *pixel* del PNOA [77, Instituto Tecnológico Agrario de Castilla y León. 2013].

Para determinar la base de la unidad acuífera, se ha recurrido a generar un MDET artificial obtenido por interpolación simple desde el SIG. Este artificio se ha creado a partir del MDET de 25m IGN [21, Centro Nacional de Información Geográfica. 2013], sobre él se ha realizado la extracción de la cota de cada *pixel* de una superficie igual al marco rectangular menos el perímetro de calizas. De esta forma se ha obtenido un mapa de puntos de cota. Después, partiendo de esos puntos se ha realizado una interpolación sencilla para rellenar los huecos dejados por la unidad acuífera, y así obtener una superficie continua aproximada de la base. Para dicho proceso se ha usado las herramientas de las aplicaciones SIG, obteniéndose el siguiente resultado (Fig. 15), en el que se puede apreciar dicho acuñaamiento.

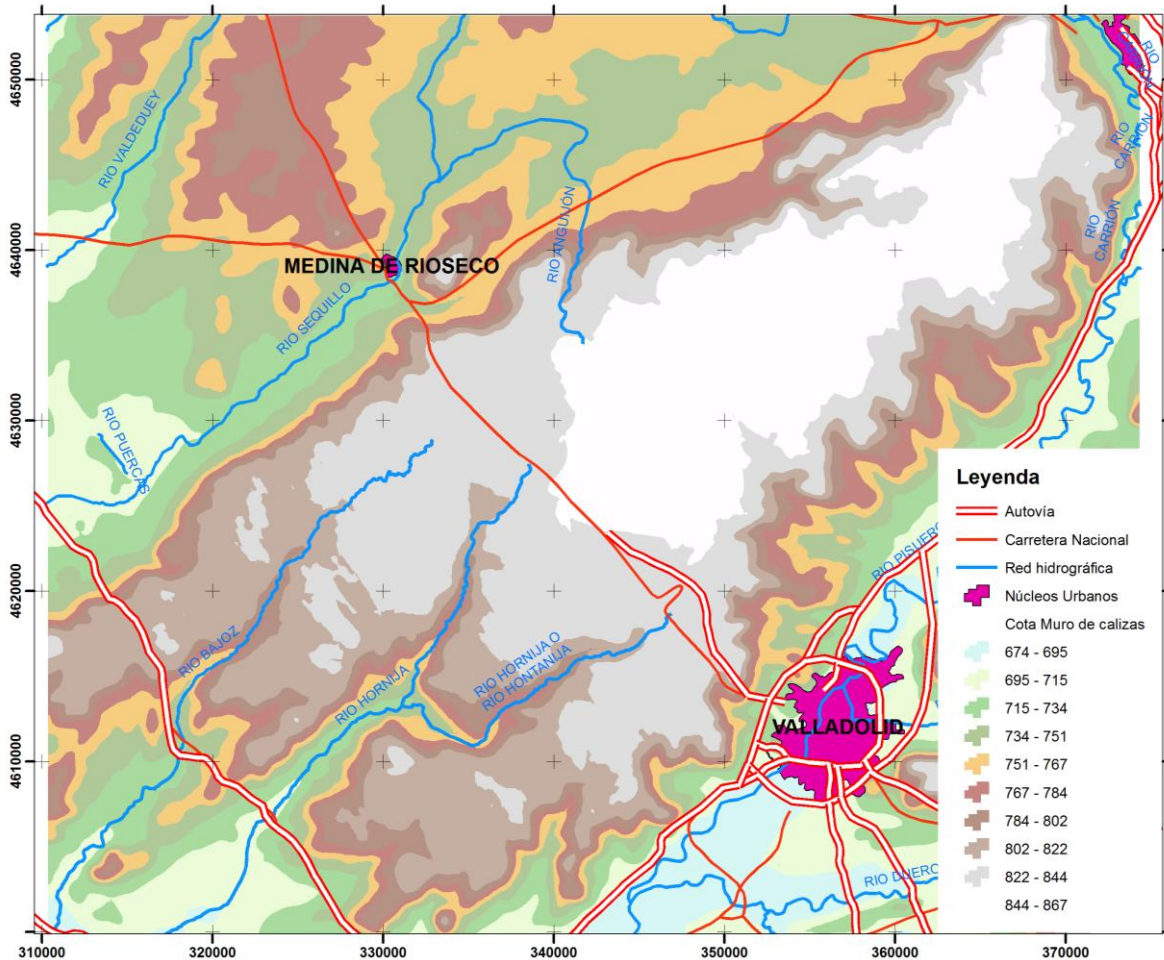


Fig. 15. Resultado del MDET artificial interpolado usado como muro del acuífero.

Nivel intermedio terrígeno margoso

Directamente sobre las calizas inferiores se diferencia en algunos puntos un nivel arenarcilloso con gravas en la base de unos 2 m de potencia máxima y poca continuidad lateral, recubierto por un nivel de arcillas de *terra rossa*. Por encima de este nivel terrígeno se dispone una unidad de margas arenosas muy calcáreas (hasta 75% CaCO_3) y limos, con bastante continuidad lateral de unos 5 m de potencia. En el registro fósil de estas margas aparecen charáceas, ostrácodos y foraminíferos.

Nivel superior calcáreo

En contacto ligeramente discordante se dispone una delgada tabla de caliza de 1 a 3 m de potencia, en bancos de 20 a 45 cm y que se engrosa hacia el SO, constituyendo la superficie del Páramo (Fig. 16). El conjunto de esta unidad de Calizas del Páramo puede alcanzar espesores de hasta 18 m de potencia en la parte SO.

La porosidad de esta unidad se desarrolla por procesos de karstificación aprovechando las brechas de las zonas de fractura tectónica o diagenética, los nódulos o los moldes fosilíferos (porosidad móldica), y las aperturas de inserción de raíces. Las microcavernas suelen estar rellenas de arcillas rojas residuales (*terra rossa*) del proceso de disolución kárstica.

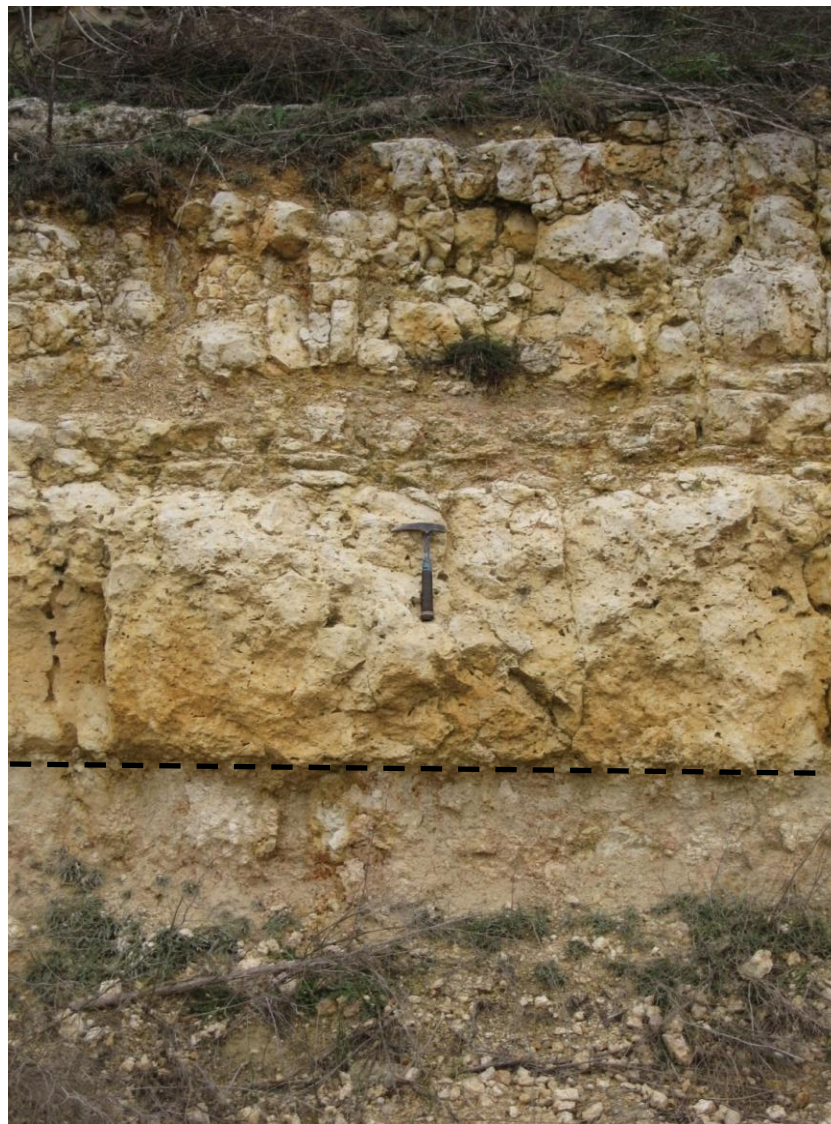


Fig. 16. Contacto entre el nivel superior calcáreo y el nivel intermedio terrígeno margoso.

En las columnas litoestratigráficas de los sondeos correspondientes a los piezómetros de control de la CHD se corrobora la presencia de los tres niveles definidos en la formación de Calizas del Páramo. Se aprecia una gran continuidad en el techo del paquete Margas grises (o muro de las calizas) desde el piezómetro de Ampudia (PZ0232001) hasta al de Villalba de los Alcores (PZ0232002) y de éste hasta el piezómetro de Peñafior de Hornija (PZ0232003) [25, Confederación Hidrográfica del Duero 2009] (Fig. 17).

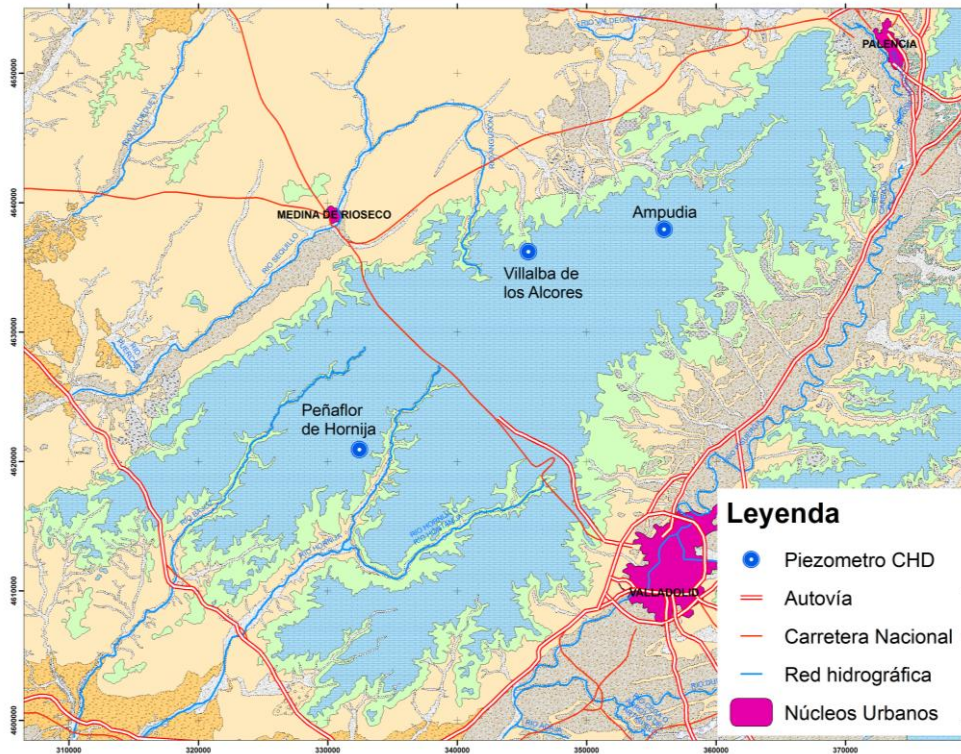


Fig. 17. Mapa de localización de los piezómetros de la CHD.

Se detecta también un engrosamiento desde Ampudia y Villalba de los Alcores con 15 m de potencia para el conjunto de las calizas del páramo y hacia el oeste en Peñafior donde se registra una potencia de 17 m, tal y como se observa en la Fig. 18.

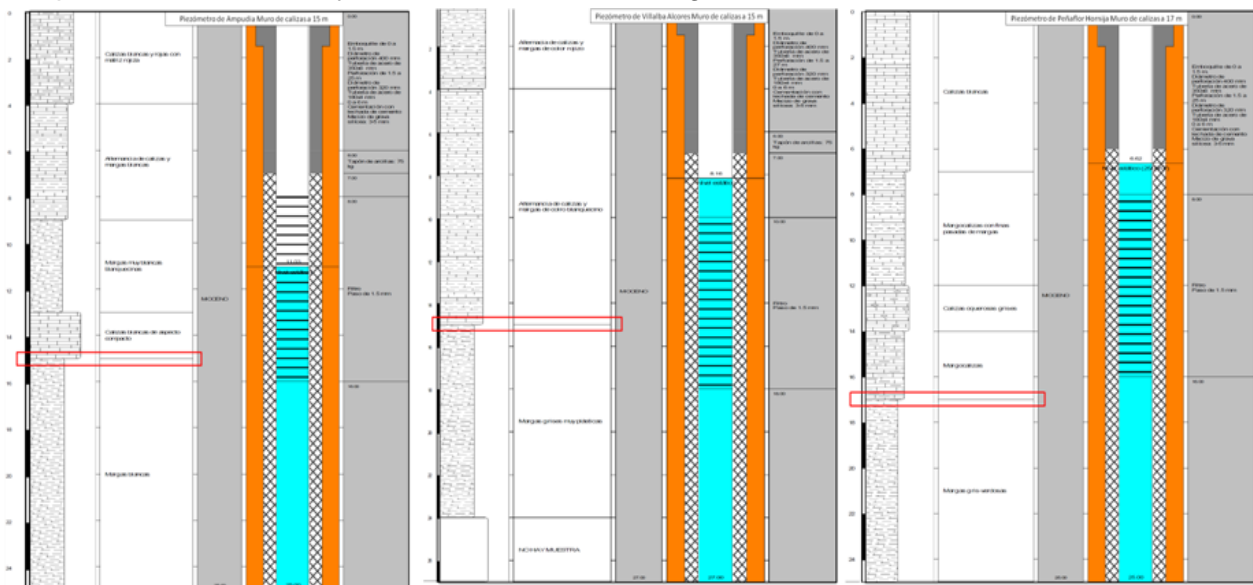


Fig. 18. Columnas estratigráficas de los piezómetros.

Cuaternario

Aluviales de fondos de valle. Valles en artesa con los fondos tapizados por depósitos aluviales de gravas calcáreas arenas y arcillas y limos.

Depósitos coluviales de ladera. Coluviones de ladera formados por inestabilidades en las arcillas de las facies cuestas y en el desmantelamiento de calizas del borde del páramo.

Acumulaciones de terra rossa. Restos de descalcificación sobre la superficie del Páramo.



3.1.2.3.2 Tectónica

Tradicionalmente siempre se ha considerado a la cuenca del Duero como una zona atectónica [52, García et al. 1991], únicamente modificada por la fracturación diagenética, que permite el desarrollo de formaciones y canales kársticos debido a la acción erosiva del agua [139, Sociedad de Investigación y Explotación Minera de Castilla y León S.A. 1997]. Sin embargo, de acuerdo con los indicios presentados en los Informes Complementarios de Neotectónica de las hojas del MAGNA [72, Instituto Geológico y Minero de España 2012], parece que en este páramo hay un basculamiento generalizado hacia el SO, como respuesta a un posible levantamiento de pequeña magnitud de la Cordillera Cantábrica [74, Instituto Geológico y Minero de España. 2014] con una pendiente muy suave, aproximadamente de 2 milésimas. Este levantamiento, originado durante la fase Iberomanchega [2, Aguirre et al. 1976] de los movimientos Finineógenos, sólo produce suaves deformaciones dentro de la cuenca sedimentaria.

Por otra parte, el trabajo de García [52, García et al 1991] pone de manifiesto la existencia de una relación entre esta la última fase neotectónica (fase Iberomanchega) y tres alineaciones de pequeñas fracturas NE-SO, ESE-OSE y SE-NO, dos de las cuales se ajustan al alineamiento de las dolinas de superficie encontradas en el páramo (Fig. 19). El alineamiento principal NE-SO responde a la "Falla de Alentejo-Plasencia" que cruza la Península Ibérica y atraviesa la zona estudiada, y el NO-SE a la "Falla de Ventaniella".

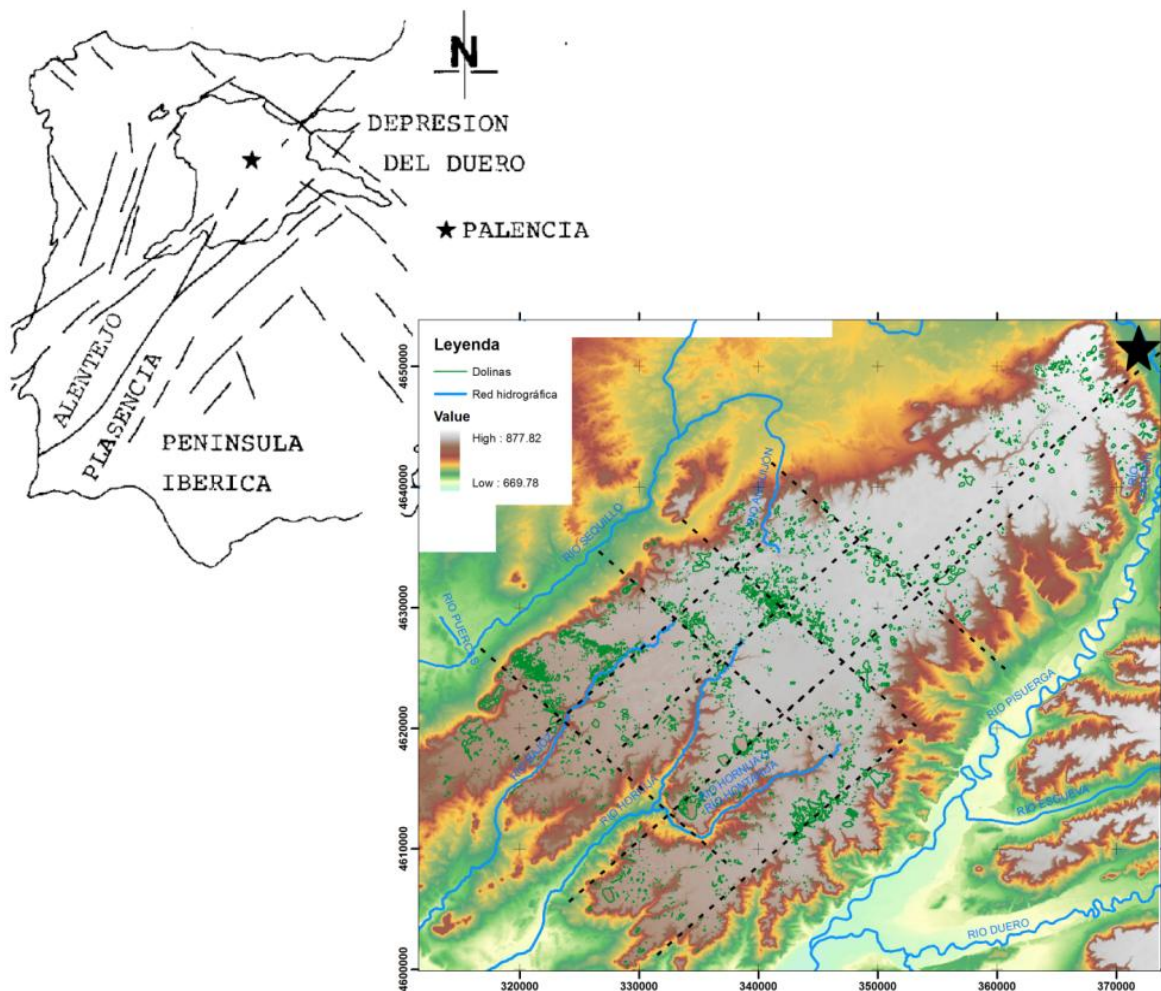


Fig. 19. Mapa de alineamiento de las dolinas

Estas estructuras Neotectónicas han tenido reflejo sobre la evolución sedimentológica, geomorfológica e hidrogeológica del entorno del páramo.

Esta fase Neotéctónica, también parecen tener un efecto sobre el control sedimentario de la cuenca sedimentaria en general, concretamente durante la sedimentación de las Calizas del Páramo, los movimientos de estas fallas sincrónicas al proceso sedimentario, aunque de pequeña magnitud, influyeron sobre las condiciones de sedimentación, y permiten explicar la ligera discordancia angular existente en el contacto entre los paquetes de calizas superiores y margas, así como el suave acuñamiento de esta serie calcárea hacia el SO y la presencia de pequeñas discontinuidades en los niveles de margocalizas y calizas [101, Mediavilla & Dabrio 1988].

Morfológicamente esta fase Iberomanchega termina de levantar los páramos calcáreos y determina el punto de partida de incisión de la actual red hidrográfica, adaptándose los grandes ríos como el Pisuerga a estas alineaciones NE-SO. Los mayores ríos y arroyos con nacimiento en el Páramo (Hornija, Hontanija y Bajoz) se adaptan bien a estas líneas de fractura NE-SO, e incluso el tramo de afluencia del Hontanija en el Hornija se adaptaría a la alineación NO-SE. Por otro lado también las alineaciones de dolinas en la superficie de los páramos, parecen seguir el mismo patrón de la red de fracturas Finineógenas.

Esta red de fracturación va a dar lugar al desarrollo de un modelado kárstico con idéntica orientación, lo que ha condicionado un desarrollo del acuífero anisótropo, con flujos preferentes vinculados a las alineaciones de las dolinas (Fig. 20).

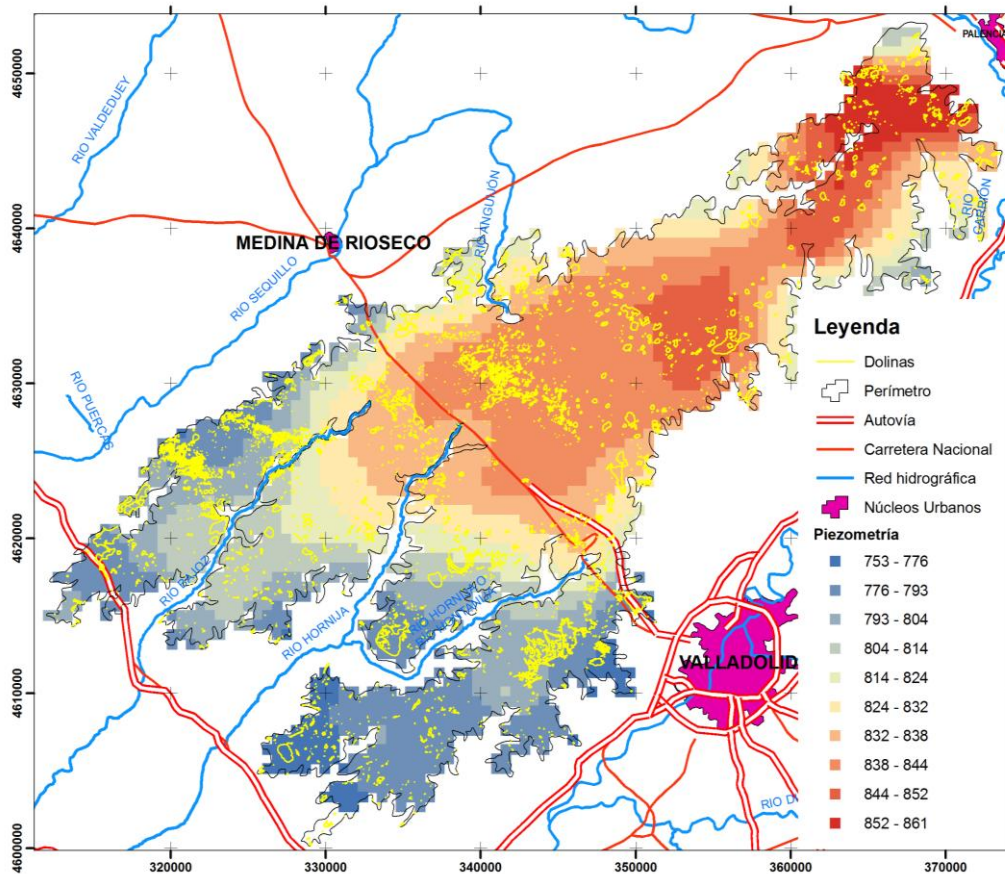


Fig. 20. Mapa de la distribución de las dolinas respecto de la piezometría.



3.1.2.3.3 Geomorfología

Geomorfológicamente el Páramo de Torozos es una meseta calcárea que se dispone sobre los materiales arcillosos de la Facies Cuestas, conformando una superficie estructural de calizas aparentemente subhorizontales aunque con una cierta vergencia topográfica hacia el SO, detectada por la variación significativa de la cota del contacto con la Facies Cuestas, que en la parte norte se encuentra entre las cotas 880 y 870, en la parte sur este contacto se sitúa entre los 830 y los 820 m snm, lo que supone una pendiente aproximada de unas 2 milésimas hacia el SO.

Los procesos de modelado dominantes en el Páramo de los Torozos serían:

- a) Proceso de karstificación de las Calizas del Páramo
- b) Incisión de valles fluviales
- c) Erosión y desmantelamiento de los bordes del páramo y cuestas arcillosas

a) Proceso de karstificación

El desarrollo del karst es el resultado por un lado de la acción erosiva mecánica de la desecación y humidificación periódica de la roca por la infiltración del agua del suelo, y por otro, del proceso disolución química (erosión química). Los factores que afectan a las formas endokársticas que dan lugar al acuífero son: el tipo y estructura de la roca caliza (diaclasado, estratificación, inclinación y composición química); el tipo y la cantidad de flujo del agua (flujo freático, flujo vadoso o flujo epifreático); la fisiografía; el clima; y el tiempo transcurrido [62, Gutiérrez 2008].

Habitualmente las redes de fracturación influyen sobre el desarrollo del modelado kárstico con alineaciones de dolinas y/o uvalas siguiendo las orientaciones dominantes de las fracturas y sus intersecciones.

El buen ajuste cartográfico existente entre dos de las alineaciones de pequeñas fracturas NE-SO y SE-NO asociadas a la fase neotectónica Iberomanchega . [52, García et al 1991] y la red de dolinas cartografiadas en la superficie del páramo (Fig. 19), permite corroborar esta hipótesis de desarrollo del sistema kárstico en la zona de estudio.

Proceso físico

El proceso kárstico comienza con la deposición de los sedimentación hipersalinos de baja energía de la cuenca endorreica. Mediante diversos procesos geológicos se forma la roca sedimentaria, que cuando se deseca genera grietas de desecación a través de las cuales el agua infiltra al suelo. Una vez que el agua ha penetrado en el suelo comienza el proceso químico de disolución.

Proceso Químico

El proceso de disolución de rocas solubles da lugar a una morfología muy típica en superficie y profundidad. El mayor desarrollo del karst se produce en las rocas carbonatadas y dentro de estas son las calizas en las que mejor se visualizan estos procesos de disolución. Estas rocas presentan una baja solubilidad relativa, por lo que el proceso de karstificación es lento, pero tienen una gran resistencia, su karstificación encierra reacciones químicas y fenómenos físicos complejos en las interfases atmósfera-suelo-agua-roca.

Debido al carácter reversible, las reacciones de disolución pueden dar lugar a procesos de precipitación en función de hacia qué lado se desplace el equilibrio.

El rasgo morfológico más característico y destacado del paisaje kárstico de Torozos son precisamente las manifestaciones exokársticas. En el páramo sólo pueden apreciarse elementos geomorfológicos como dolinas, ya que ni lapiaces, ni poljes pueden desarrollarse debido a la propia génesis del páramo y a la escasa homogeneidad del paquete de calizas.

Se ha tratado de identificar las dolinas existentes en la unidad hidrogeológica. Para ello se ha partido del MDET de precisión de 50 cm, proporcionado por la el CIT, y las curvas de nivel derivadas de él. Con las isolíneas dibujadas, se han extraído todas las que supusieran una depresión de la superficie del páramo. Finalmente se ha obtenido el resultado de la Fig. 21.

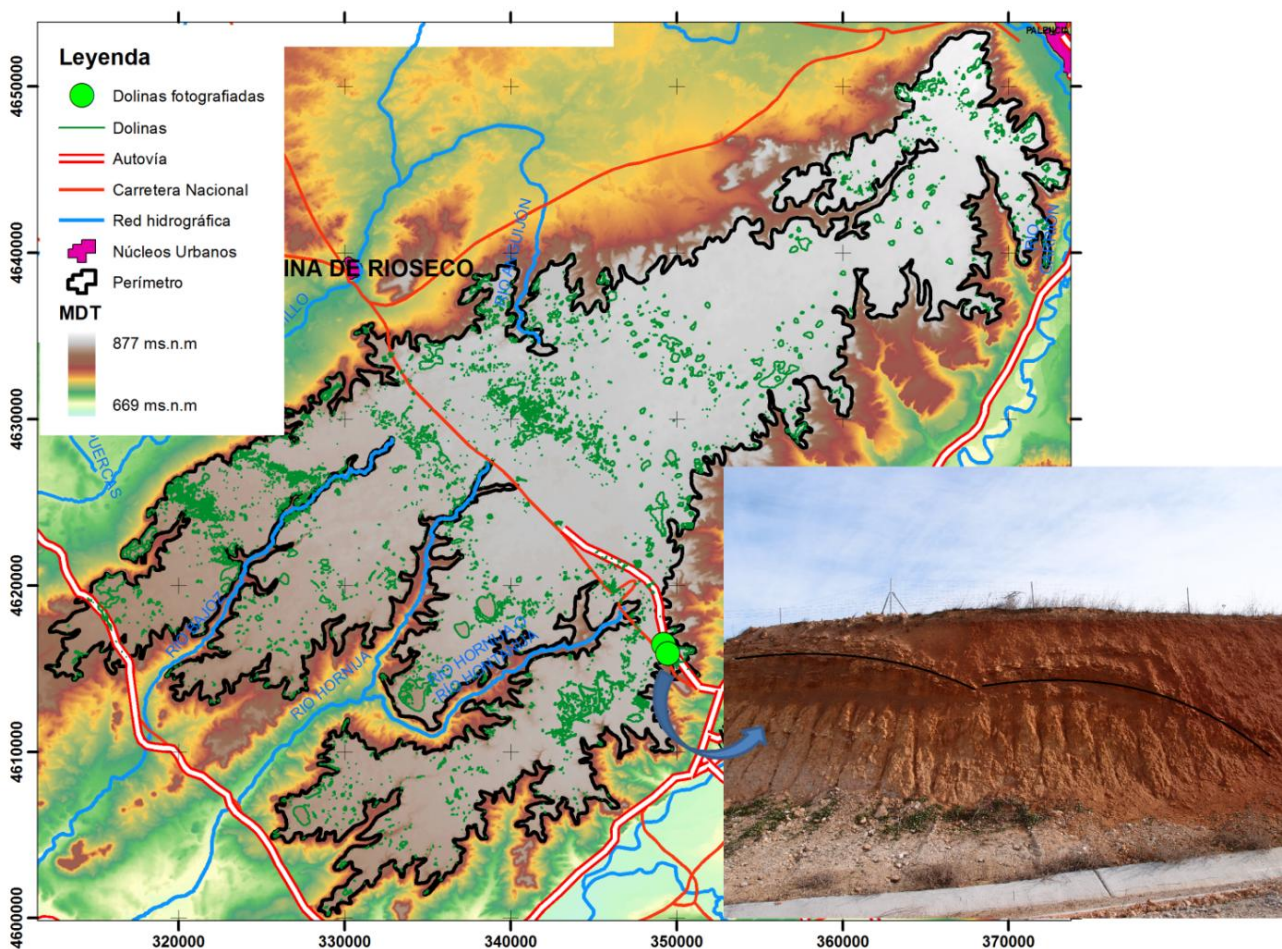


Fig. 21. Mapa de distribución de dolinas.

b) La incisión de valles fluviales

El páramo está formado por materiales carbonatados más resistentes a la erosión que las series infrayacentes, lo que trae consigo la formación de netos escarpes que limitan las vertientes desarrolladas a su pie y que constituyen las "Cuestas". No se trata de una superficie de colmatación, sino de una superficie poligénica en la que se reconocen procesos de erosión, karstificación y depósito [72, Instituto Geológico y Minero de España 2012], dando paso a los valles y fondos de valle.



Los fondos de valle aparecen ocupando las zonas topográficamente más bajas. Su forma en planta es alargada, de longitud variable y con trazados rectilíneos o suavemente sinuosos, no muy largos y estrechos, superando apenas los 300 m de anchura, con un fondo plano que ocasiona valles con perfil en artesa (Fig. 22). La linealidad de muchos cauces es persistente en determinadas direcciones, destacando la NE-SO [72, Instituto Geológico y Minero de España 2012].



Fig. 22. Valle en forma de artesa. Arroyo Valcaliente. Cigales.

Otra de las formas a considerar son los conos de deyección, situados en algunos valles cuando otros cauces de menor rango desembocan en ellos. En general se presentan como formas aisladas, de pequeño tamaño, y con una característica forma de abanico. Son frecuentes en los valles de los ríos que seccionan el Páramo, como el Bajoz, o el Hornija, donde aparecen interdentándose lateralmente con los coluviones [72, Instituto Geológico y Minero de España 2012].

c) La erosión y el dismantelamiento de los bordes del páramo y cuestras arcillosas

La otra forma de alteración geomorfológica activa en la zona responde a los procesos de erosión de laderas. La estabilidad de las cuestras que bordean el páramo es el resultado de la acción erosiva natural y de las actividades humanas en ellas desarrolladas. Estos procesos de deslizamiento de suelos pueden llegar a tener importantes alteraciones en el medio, y representan un riesgo para la población ya que en ocasiones genera serios perjuicios a las infraestructuras próximas.

Las laderas presentan una composición bastante homogénea, están formadas principalmente por materiales arcillosos pertenecientes a la Facies de Tierra de Campos y a la Facies Dueñas, con los parámetros estructurales de la tabla 23.

Material	Unidad de Peso [kN/m ³]	Tipo de rotura	Cohesion (c) [kN/m ²]	ángulo de rozamiento (ϕ) [grados]
Arenas Aluviales	20	Mohr-Coulomb	0	30
Calizas	20	Mohr-Coulomb	10	40
Margas-Arcillas	20	Mohr-Coulomb	10	18

Tabla 23. Valores de las propiedades de los materiales geológicos de la serie de las cuestras.

Estructuralmente, la estabilidad del conjunto de laderas puede considerarse alta, ya que posee unas pendientes promedio menor de 10°, como se puede ver en la Fig. 23. Además las laderas suelen estar cubiertas de vegetación: las más tendidas están ocupadas por tierras de cultivo y en las más escarpadas se han realizado repoblaciones de coníferas mezcladas con matorrales y encinas (Fig. 23).

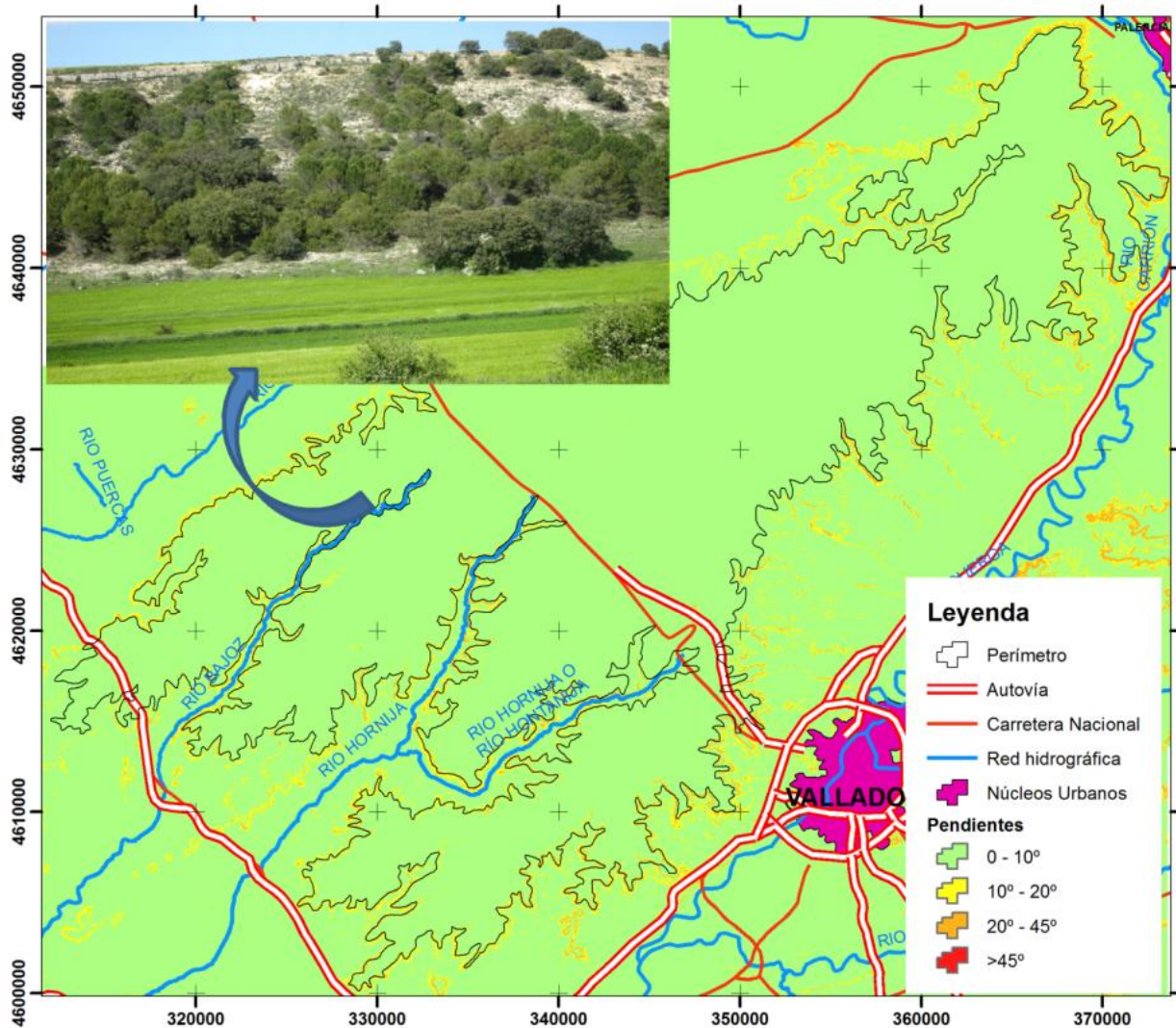


Fig. 23. Mapa de pendientes medias en grados.

3.1.2.3.4 Hidrogeología

Esta masa se encuentra situada en el sector central de la provincia de Valladolid y su extremo nororiental pertenece a la de Palencia, de forma que se ubica al norte del río Duero y al oeste del Pisuerga. El límite norte se define aproximadamente por una línea que une las localidades de Autilla del Pino hasta Castromembibre y el sur desde ésta hasta Villavieja del Cerro. Desde su cota más alta (885 m.s.n.m.) presenta un desnivel de 100 m hasta la base de las arcillas [26, Confederación Hidrográfica del Duero 2013].

El acuífero está constituido por calizas Pontienses (Mioceno Superior) subhorizontales con intercalaciones margosas apoyadas sobre el Terciario arcilloso de la Facies Cuestas (Tabla 24). Su espesor general es de 1 a 18 m, aunque puntualmente pueda alcanzar hasta los 30 m.

Esta masa posee una forma toscamente triangular y constituye una extensa plataforma elevada, apenas ligeramente inclinada hacia el suroeste (2 milésimas) y acuñada en espesor hacia el SO. Se trata de un sistema kárstico que se recarga a través de la de dolinas, de escasa profundidad y rellenas de arcillas rojas (*terra rossa* de descalcificación), y está sellada en profundidad por las arcillas impermeables de las Facies Cuestas [26, Confederación Hidrográfica del Duero 2013].



El sistema se drena a través de un extenso sistema de manantiales perimetrales, Siendo generalmente más caudalosos los situados en el borde SO, y con mayor desarrollo de los sistemas fluviales.

Litología	Periodo	Exten km ²	Espesor m
Gravas, arenas, limos (depósitos de aluviales, fondos de valle y terrazas bajas en los ríos principales)	Cuaternario	54	2-5
Gravas, arenas, limos, arcillas (depósitos terrazas medias ya altas)	Pleistoceno-Holoceno	59	5-10
Calizas, margocalizas y brechas calcáreas y oncolíticas. Calizas del páramo 2	Mioceno Superior Tortoniense	0	0-1
Margas, limos, arenas y arcillas ocreas o rojas	Mioceno Superior Tortoniense	1	0-15
Calizas y margas. Calizas del páramo 1 o inferiores	Mioceno Superior Vallesiense	930	2-18
Margas yesíferas (Facies Cuestas)	Mioceno Medio-Superior	113	2-80
Margas, margocalizas y arcillas (Facies Cuestas)	Mioceno Medio-Superior	278	2-6
Limos y arenas ocreas, con niveles conglomeráticos y costras (Facies Tierra de Campos)	Mioceno Medio	80	30-60
Margas, margocalizas y arcillas (Facies Dueñas)	Mioceno Inferior-Medio	20	29-329
Arcosas y limos arcillosos, blancos, grises-verdosos u ocreas, con costras	Mioceno Inferior-Medio	15	29-41

Tabla 24. Litológica de la IDE-Duero.

Funciona como un acuífero libre colgado. El nivel freático medio adoptaría una forma de cúpula en las zonas centrales y generándose un gradiente hacia el borde del páramo donde se produce el drenaje. En estas zonas el nivel freático se situaría en el contacto entre los materiales permeables e impermeables [26, Confederación Hidrográfica del Duero 2013] (Fig. 24).

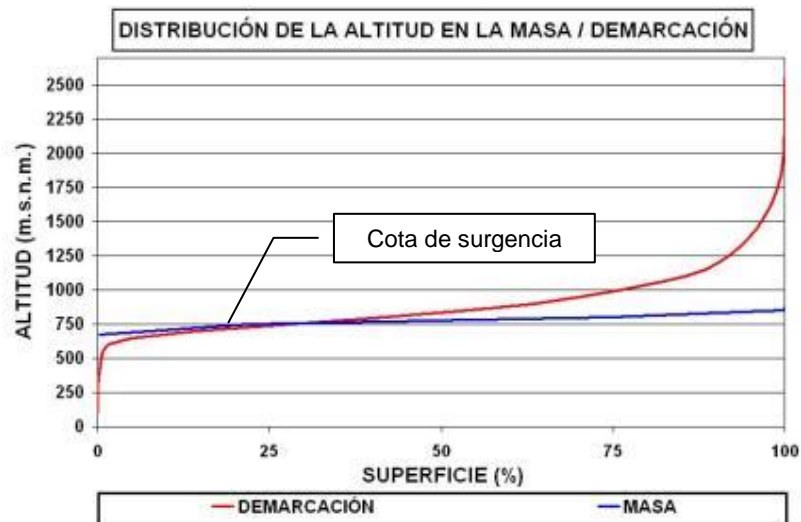


Fig. 24. Gráfico que muestra la cantidad de superficie de la masa de agua (en tanto por ciento, en el eje de las X) que se encuentra a una determinada cota (m.snm del eje de las Y) en comparación a la cota de la demarcación. El nivel donde se cruzan ambas será el nivel freático.

Todo ello ha condicionado un desarrollo del acuífero anisótropo, con flujos preferentes vinculados a las alineaciones de las dolinas (Fig. 19), a la pendiente de la superficie de contacto con el nivel impermeable inferior, y en relación directa con el espesor de la masa calcárea, lo que permite prever un flujo preferente hacia el SO.



De esta manera la recarga del acuífero procede de las precipitaciones, y se drena radialmente por manantiales perimetrales que alimentan el caudal base de los ríos, y por extracciones de pozos.

Presenta problemas de descenso rápido de los niveles debido a su poca capacidad reguladora y su naturaleza de acuífero libre. Además como el nivel freático está muy próximo a superficie (entre 3 y 5 m) hace que sea muy vulnerable a la inmisión directa de contaminantes [127, Sanz 2010].

3.1.2.4 Caracterización de la red hidrográfica

Existe en torno a la centena de puntos de agua, fuentes o manantiales, originados por el drenaje del páramo, pero los afloramientos más relevantes son los ríos Bajoz y Hornija; y en menor medida el Anguijón (este río, correspondiente a la Masa R-124 en ocasiones se ha encontrado como Aguijón) y el Hontanija [25, Confederación Hidrográfica del Duero 2009].

Los manantiales más relevantes en caudales y régimen hídrico corresponden a los nacedores del Bajoz, Hornija y Hontanija en el SO y el Anguijón en el NO. Según Confederación Hidrográfica del Duero, se trata de ríos mineralizados, clasificados con categoría 6 a 8 según el método Strahler.

Aunque en la actualidad ha disminuido el número y caudal de los manantiales, debido a las actividades agrícolas, Torozos siempre ha conservado manantiales de agua mineral, gracias a la lenta filtración del agua de la lluvia a través de las calizas. Pero durante los últimos lustros, el uso de fertilizantes químicos en explotaciones agrícolas ha contribuido a la degradación de los recursos, limitando sus potenciales uso.

3.1.2.5 Química del agua

El interés de la hidroquímica en este trabajo, responde a la problemática detectada por la presencia de notables concentraciones de nitratos en los manantiales que drenan el acuífero. Por este motivo, se comenzó a realizar análisis, primero semicuantitativos (por colorimetría) y posteriormente cuantitativos (por absorbancia) de los nitratos. Además, con efecto de futuras comparaciones con unidades hidrogeológicas similares, se ha estudiado la alcalinidad, con el fin de comprobar el proceso de disolución de la roca caliza.

De forma general, el agua del acuífero de los Montes Torozos se caracteriza por ser de buena calidad, incluso hasta el año 2000, podía considerarse como minero medicinal, como lo acreditaba la existencia de la planta embotelladora de Castrovita (Castromonte). Pero la aparición de estos elevados niveles de nitratos supuso el fin de este aprovechamiento.

Para corroborar la presencia de nitratos y su concentración, se han llevado a cabo más de 200 mediciones colorimétricas, de las cuales se han contrastado mediante la absorbancia con luz ultravioleta aproximadamente un 10%, correspondientes a las muestras de abril de 2007 y junio de 2012. El factor de correlación entre la medida colorimétrica (por tiras) y la medida por absorbancia es de 0,85 y 0,95 respectivamente.



Los resultados obtenidos están en el rango de 50 a 150 mg/l de concentración de nitratos. Estos niveles no presentan variaciones significativas a lo largo de todo el año, ni muestran patrones claros de distribución geográfica. Sin embargo, esta homogeneidad debe ser revisada, a partir de la obtención de nuevos datos más precisos (mayor número de puntos analizados todos ellos mediante absorbancia) y usando como base el módulo de difusión de contaminantes del modelo desarrollado en el apartado 4.1.2. del presente documento, ya que se ha detectado diferencias significativas a lo largo de todo el periodo de estudio entre los diferentes manantiales analizados

Por otra parte también se ha detectado una variación en la distribución vertical de los nitratos, mientras que en los manantiales presentan casi todas concentraciones por encima de los 25 mg/l, las medidas realizadas en los piezómetros las concentraciones se encuentran por debajo de los 10 mg/l. Esta estratificación vertical también debe ser estudiada de forma análoga.

Todos estos resultados, han sido contrastados y respaldados por los análisis valores registrados en la IDE del Duero [26, Confederación Hidrográfica del Duero 2013]. El "Nivel de Referencia" de los nitratos del periodo comprendido entre 1975 y 2008, para 11 puntos de medida, presenta un percentil 25 de 37,53 mg/l y un percentil 75 igual a 115,4 mg/l. En lo referente al "Nivel Básico", durante el periodo 2007 - 2008, para 7 puntos de muestreo, se registró un percentil 25 de 45 mg/l y un percentil 75 de 123 mg/l, lo que puede dar idea de un aumento en la concentración de estos compuestos a lo largo de los últimos años. Finalmente respecto a la estratificación vertical, el Órgano de Cuenca, establece dos niveles: el primero, entre los 0 y los 10 m de profundidad, con una concentración de nitratos de 90,6 mg/l; y el más profundo, entre los 25 y los 50 m, con 124,33 mg/l. A partir de estos datos la Confederación, determina que el estado químico de la masa, es "MALO". Y lo justifica debido a que los contenidos en nitratos de sus aguas suponen la afección a un área significativa de la masa, ya que de las siete estaciones, cinco superan los 50 mg/L.

En lo tocante a la alcalinidad del páramo, se han realizado 20 análisis de las muestras recogidas durante las mismas campañas de muestreo que los nitratos (2007 y 2010). Se ha obtenido unos resultados con una media de 146 mg/l de $(\text{CaCO}_3)^-$, un valor mínimo de 90 mg/l y máximo de 220, por lo que se puede calificar a las aguas del páramo como aguas moderadamente duras. Estos valores son sensiblemente inferiores, pero del igual orden de magnitud, a los registrados por la Confederación en la IDE del Duero [26, Confederación Hidrográfica del Duero 2013], con un percentil 25 de 166 mg/l y un percentil 75 de 282 mg/l de $(\text{CaCO}_3)^-$. Estos valores, moderados, dan una idea de un karst no muy desarrollado, ya que de lo contrario se hubieran encontrado concentraciones más elevadas, o precipitados de carbonatos junto a los manantiales y fuentes.

El resto de parámetros analizados presentan valores bastante homogéneos, sin variaciones estacionales o geográficas. Los valores medios obtenidos para todas las fuentes son:

1. Conductividad eléctrica: 758,81 $\mu\text{s/cm}$
2. Sólidos Totales Disueltos: 485,20 mg/l
3. Salinidad: 369,33 mg/l
4. Oxígeno disuelto: 8,99 mg/l
5. pH: 7,74
6. Temperatura: 14,14°C



3.1.3 Medio biótico

De acuerdo a las series de vegetación de Rivas-Martínez [121, Rivas-Martínez 1987], el Páramo de Torozos se inscribiría dentro de la región Mediterránea. Posee una serie climatófila, con un piso bioclimático Supramediterráneo, siendo la vegetación de típica autóctona encinas y quejigos (Fig. 26).

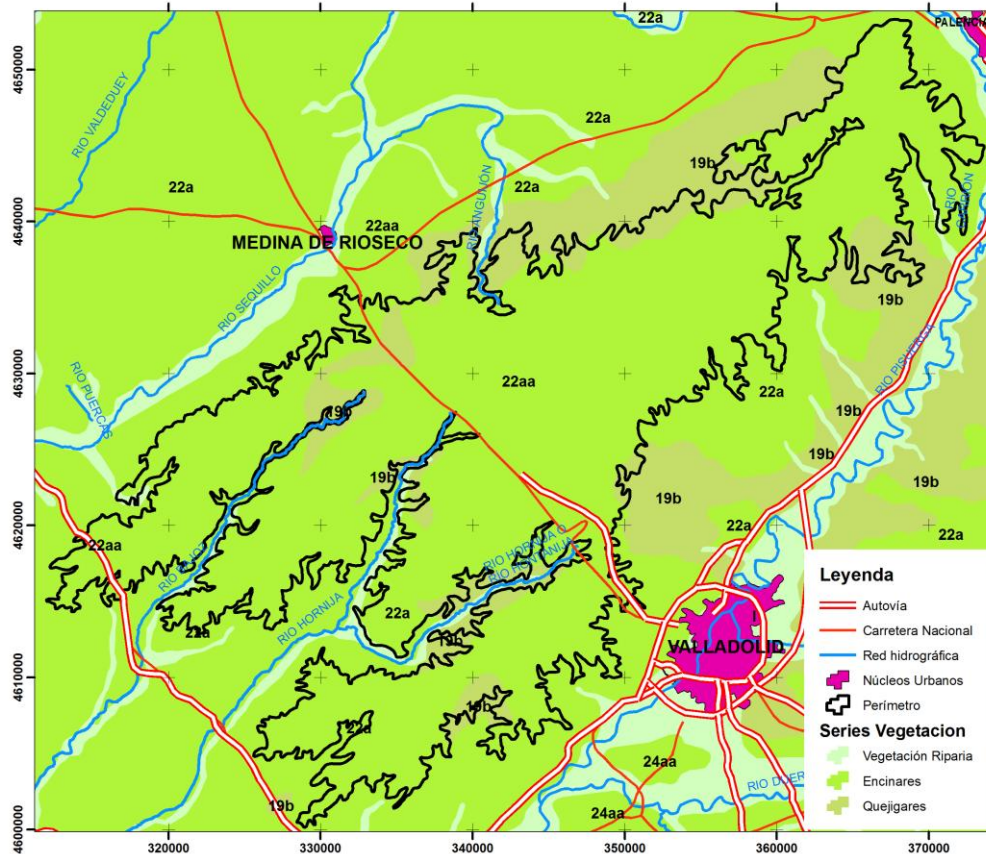


Fig. 26. Mapa de series de vegetación.

3.1.3.1 Formaciones vegetales

Las comunidades vegetales presentes en Torozos más significativas desde el punto de vista ecológico y paisajístico son [59, Guerra 2000]:

- **Bosque en galería:** formaciones arbóreas caducifolias, de cobertura alta, sotobosque arbustivo y subarbustivo caracterizadas por su dependencia de la humedad edáfica. Se encuentran únicamente reducidas a pequeñas manchas asociados a los cursos permanentes de agua. Son comunidades caracterizadas por su elevada madurez desde el punto de vista edáfico, y por tanto con tendencia a ocupar todas aquellas zonas de humedad edáfica singular. En la actualidad estas masas forestales han visto reducida su extensión por aprovechamientos agrícolas o madereros. Si a esto se añade el aumento de los procesos erosivos en las riberas desnudas, es fácil observar la dinámica de degradación y desaparición progresiva de este tipo de formaciones. En Torozos los bosques galería más interesantes, tanto desde el punto de vista florístico como faunístico, se sitúan en el arroyo Cachupines, término de Valdenebro de los Valles, en el arroyo de la Vega, término de Medina de Rioseco, el arroyo del Salón, en el término de Ampudia, y



sobre todo en el nacimiento del Río Bajoz, entre el núcleo de Castromonte y la Santa Espina.

- **Tomillares y aljezares:** formaciones subarbutivas heliófilas compuestas por un número relativamente alto de especies, enriquecidas con especies gipsófilas. Se localizan en las laderas de los valles y del páramo, por lo que la importancia de este tipo de comunidades, radica sobre todo en su papel de sujeción de las capas superiores del suelo. Su principal problema de conservación deriva de la erosión del sustrato sobre el que se asientan, al localizarse en laderas o sobre suelos deleznable, poco protegidos por la baja cobertura de esta formación. A todo esto contribuye la presión ganadera, no sólo por el pasto, sino también por el pisoteo que rompe el suelo, favoreciendo los procesos erosivos. En este aspecto hay que destacar, que en la actualidad se está produciendo un abandono paulatino de la actividad ganadera, lo que favorece en cierta medida la recuperación de este tipo de formaciones.
- **Bosque mediterráneo (encinar, quejigar y formaciones mixtas):** formaciones arbóreas perennifolias y/o marcescentes con una cobertura media y con un sotobosque arbustivo y subarbutivo. Compuestas sobre todo por *Quercus ilex* interrumpida por pequeñas manchas de *Quercus faginea*. En Torozos forman manchas dispersas que, en conjunto, dibujan una banda que recorre transversalmente el páramo de SO-NE. La evolución del bosque mediterráneo se ha visto totalmente mediatizada por la intervención humana, así, la tendencia natural de estas formaciones hacia un aumento de cobertura que haría descender proporción de matorral heliófilo a favor del esciófilo, más propio, se ve contrarrestada por el aprovechamiento de leñas y los aclareos. El peor enemigo de estas manchas de vegetación es la especulación del terreno que ha llevado a la roturación con fines agrícolas o energéticos de grandes espacios. En la actualidad las ayudas derivadas de la sustitución de cultivos para reforestaciones, están sirviendo como freno a la degradación de estas comunidades.
- **Campos de cultivo y eriales:** dedicados sobre todo al cultivo extensivo de cereales de secano, aunque la reciente modernización y la tecnificación del sector agrario está poniendo en riego una superficie cada vez mayor.
- **Medio urbano:** asentamientos de reducida dimensión ubicados en las cuestas.

La multiplicidad de acercamientos que caracteriza actualmente el estudio de la vegetación ha puesto de manifiesto la función capital que desempeña la acción humana en la organización de los paisajes vegetales actuales.

3.1.3.2 Poblaciones animales

La fauna inventariada en el Páramo de Torozos no ofrece singularidad en cuanto a especies se refiere, salvo la presencia del lobo que ha experimentado un aumento de su población [119, Red Natura 2000 2014].

La comunidad animal característica del bosque mediterráneo está formada por:

- **Aves:** tórtola común (*Streptopelia turtur*), azor (*Accipiter gentilis*), alcotán (*Falco subbuteo*), becada (*Scolopax rusticola*), gavilán (*Accipiter nisus*), y diversas especies paseriformes.



- **Mamíferos:** lobo ibérico (*Canis lupus signatus*), tejón (*Meles meles*), zorro (*Vulpes vulpes*), turón (*Mustela putorius furo*), jabalí (*Sus scrofa*), lirón careto (*Eliomys quercinus*), y varias especies de la Familia Muridae.

Las únicas lagunas (charcas o bodones) inventariadas, sin contar las lagunas artificiales para riego, son la Casa del páramo de Matallana, en Villalba de los Alcores, y la de la Nava en Wamba. Como zona húmeda artificial destaca el embalse del río Bajoz, en la Santa Espina (Fig. 27) y las lagunas del Monte de San Lorenzo. El pequeño embalse ha evolucionado hacia un humedal seminaturalizado, con el asentamiento de una fauna y flora acuática, donde destaca la presencia de parejas reproductoras de focha (*Fulica atra*) y de zampullín chico (*Tachybaptus ruficollis*).



Fig. 27. Fotografía del embalse de la Santa Espina (Fecha: 28/08/2012).

Los bosques de ribera están escasamente representados en los distintos cursos de agua de la zona, careciendo de interés especial dada su extensión reducida. Sin embargo seis especies de aves y dos de mamíferos catalogadas como amenazadas dependen en algún momento del ciclo biológico de este biotopo.

- **Aves:** cigüeña blanca (*Ciconia ciconia*), tórtola común (*Streptopelia turtur*), becada (*Scolopax rusticola*), gavilán (*Accipiter nisus*), agachadiza común (*Gallinago gallinago*), avión zapador (*Riparia riparia*), martín pescador (*Alcedo atthis*).



- **Mamíferos:** tejón (*Meles meles*), turón (*Mustela putorius furo*), lirón careto (*Eliomys quercinus*).
- **Anfibios:** salamandra (*Salamandra salamandra*), tritón ibérico (*Triturus boscai*), salamanquesa (*Tarentola mauritanica*), sapo común (*Bufo bufo*).

Respecto a los campos de cultivo y eriales, destacan nueve especies de aves catalogadas como amenazadas están vinculadas a este biotopo: aguilucho cenizo (*Circus pygargus*), avutarda (*Otis tarda*), halcón peregrino (*Falco peregrinus*), sisón (*Tetrax tetrax*), esmerejón (*Falco columbarius*), alcotán (*Falco subbuteo*), alcaraván (*Burhinus oedicephalus*). Dentro de los mamíferos, no existe ninguna especie amenazada.

Finalmente, el medio urbano está ocupado por una importante comunidad antropófila, caracterizada por presentar unas pocas especies con alta dominancia, más densas y estables que en otros medios. Vencejos y aviones tienen sus poblaciones únicamente asentadas en los núcleos urbanos de Torozos, así como la cigüeña blanca (Fig. 28) que encuentra en las edificaciones el único lugar de cría en el Páramo.



Fig. 28. Fotografía de una cigüeña blanca en la Mudarra (Fecha: 23/05/2012).



3.1.4 Medio socioeconómico

3.1.4.1 Demografía

El área de estudio se extiende por 48 municipios de la provincia de Valladolid y 7 de la de Palencia, con una población superior a 47.000 habitantes, en el año 2008. Hay que señalar que menos de la mitad de ellos tienen el núcleo de población encima del páramo, pero la mayoría hasta fechas muy recientes se abastecían del agua procedente de la masa de agua. La población de estos núcleos rurales se caracteriza por una baja densidad de población (menor a 30 hab/km² bastante por debajo de la media nacional [75, Instituto Nacional de Estadística 2013], una tasa de crecimiento prácticamente nula (salvo en los municipios próximos a Valladolid y Palencia, debido al efecto alfoz), un fuerte envejecimiento y masculinización de la población [17, Caja España 2009].

3.1.4.2 Usos del suelo

Los factores ambientales ligados a los aspectos culturales han dado lugar a un singular aprovechamiento del suelo, condicionado tanto por la orografía como por la climatología. Tradicionalmente los usos urbanos (asentamientos permanentes y núcleos de población) en los Torozos se restringían a las zonas de abrigo ubicadas en los bordes del Páramo, donde a su vez, también se localizaban los manantiales.

Se trata de una zona que tradicionalmente ha estado cubierta de espeso matorral, de encinas y de quejigo. Pero como resultado de una intensa acción antrópica, de explotación agrícola y ganadera, hoy sólo quedan vestigios de aquel monte bajo, que ha sido sustituido por la agricultura de secano y el pastoreo.

El uso predominante del páramo ha sido agropecuario. Históricamente durante los s XVIII y XIX las masas forestales y de monte bajo representaban una mayor superficie [60, Guerra 2001]. Pero desde 1959 hasta 2006, de acuerdo con el CORINE [41, European Environment Agency 2012], la dominancia agrícola es innegable, como se puede apreciar en la tabla 25.

Uso	1959	1977	1990	2000	2006
Artificial	0,41	0,54	0,56	0,56	0,63
Agrícola	81,63	83,16	82,67	82,65	82,63
Seminatural	17,96	16,30	16,77	16,79	16,84

Tabla 25. Evolución de la superficie de usos de suelo CORINE en tanto por ciento.

El análisis evolutivo del cambio reciente de aprovechamiento del suelo no permite establecer un patrón claro en las tendencias, por lo que puede aceptarse el último mapa de usos como el de referencia Fig. 29.

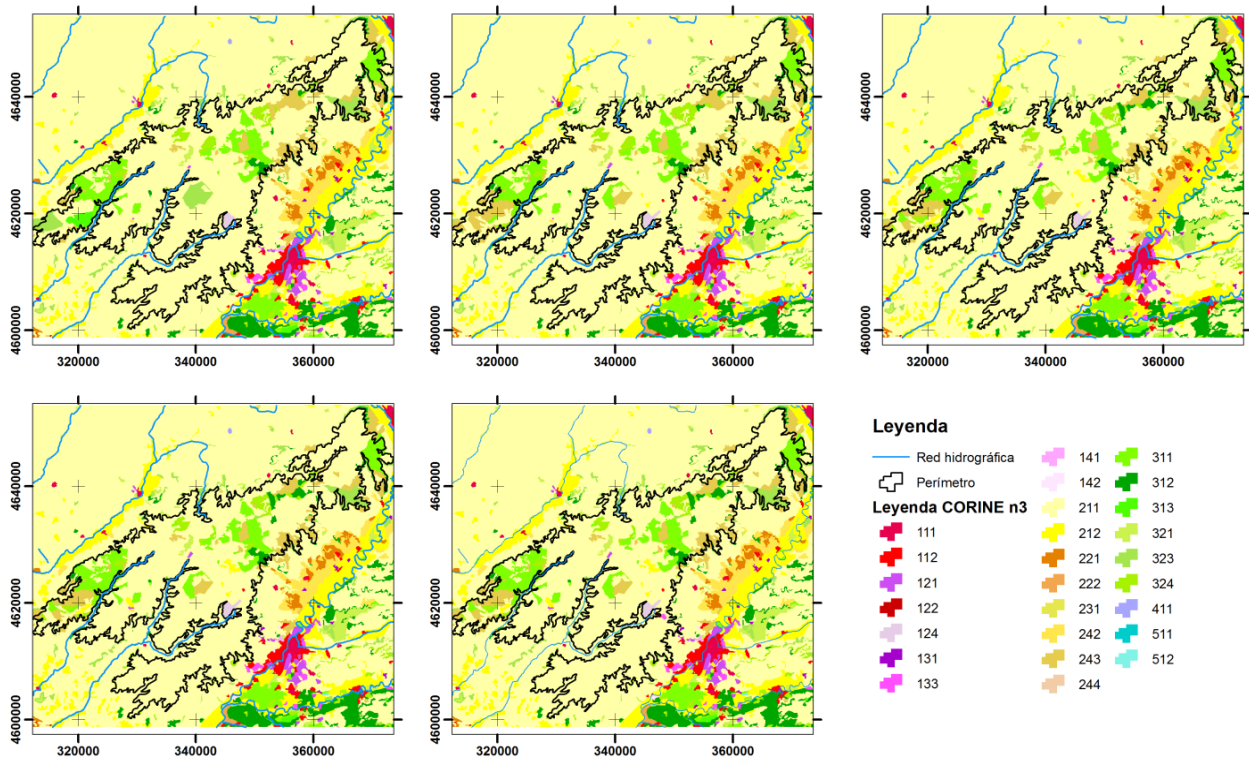


Fig. 29. Evolución de los usos del suelo según CORINE.

La única excepción a este inmovilismo la constituyen las poblaciones próximas a las capitales de provincia, en las cuales se aprecia una expansión del aprovechamiento urbano e industrial, resultante del efecto alfoz metropolitano, como se puede apreciar en la Fig. 30.

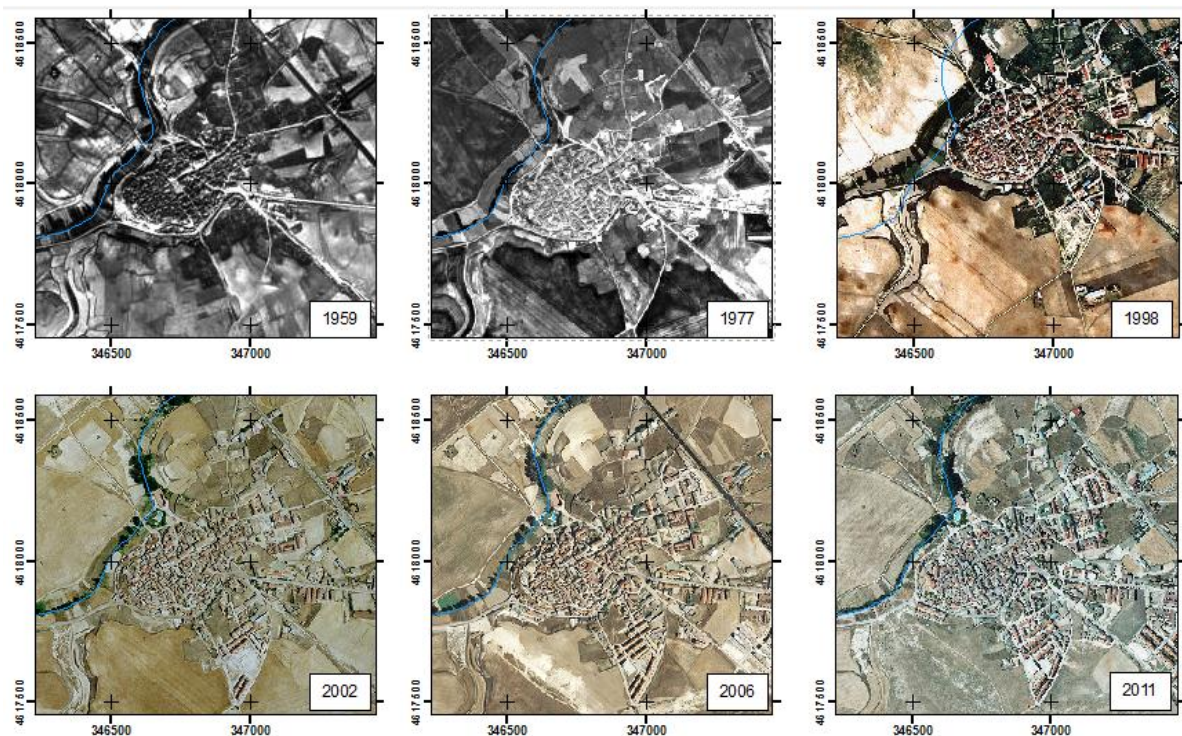


Fig. 30. Ortofotografías del núcleo urbano de Villanueva de la Cañada en las que se puede apreciar la evolución de la ocupación del suelo por usos industriales y residenciales en los años 1959, 1977, 1998, 2002, 2006 y 2011 [77, Instituto Tecnológico Agrario de Castilla y León 2013].

Otro cambio a pequeña escala es el que ha sufrido la estructura parcelaria con la puesta en marcha de los Planes de Estabilización y los proyectos de Concentración Parcelaria surgidos con el fin de modernizar la agricultura, a partir de la década de los 60 del pasado siglo (Fig. 31).

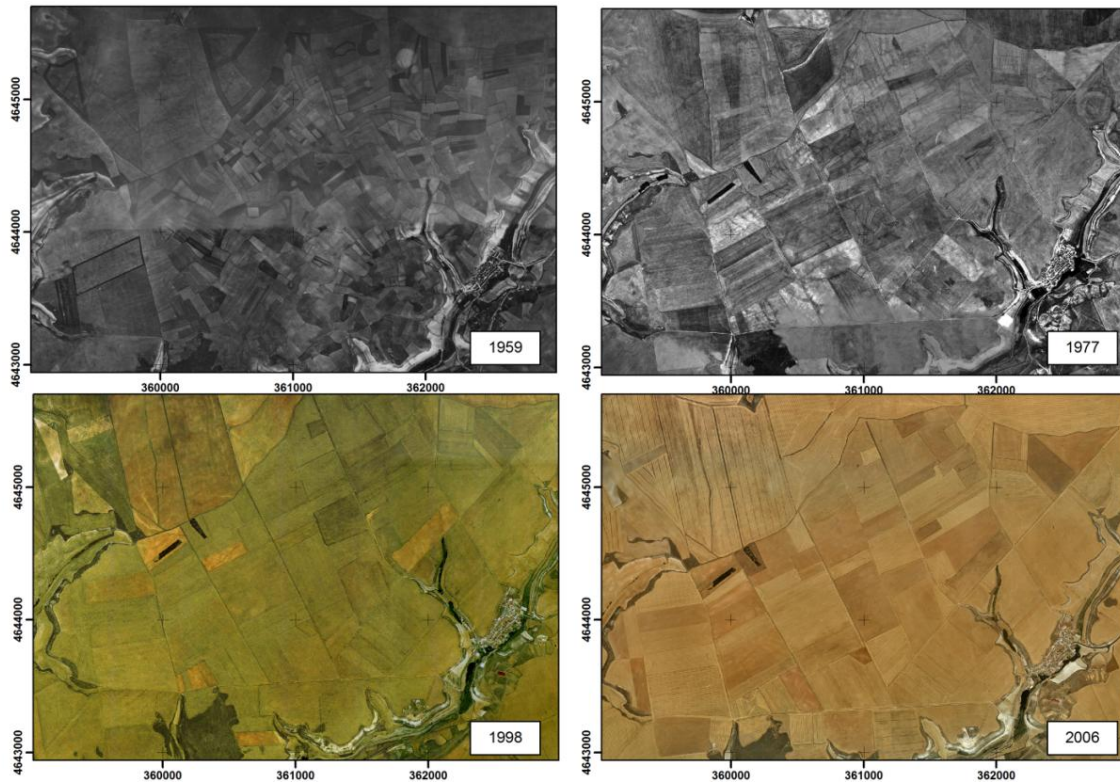


Fig. 31. Cambios en la estructura parcelaria después de los proyectos de concentración.

No obstante, y partiendo de los datos proporcionados por la cartografía del Mapa de Usos del Suelo de Castilla y León, catalogado con la leyenda CORINE Land Cover, se ha determinado la superficie que ocupa cada uso. Los principales grupos de vegetación que se han encontrado en el páramo se muestran a continuación (Fig. 32):

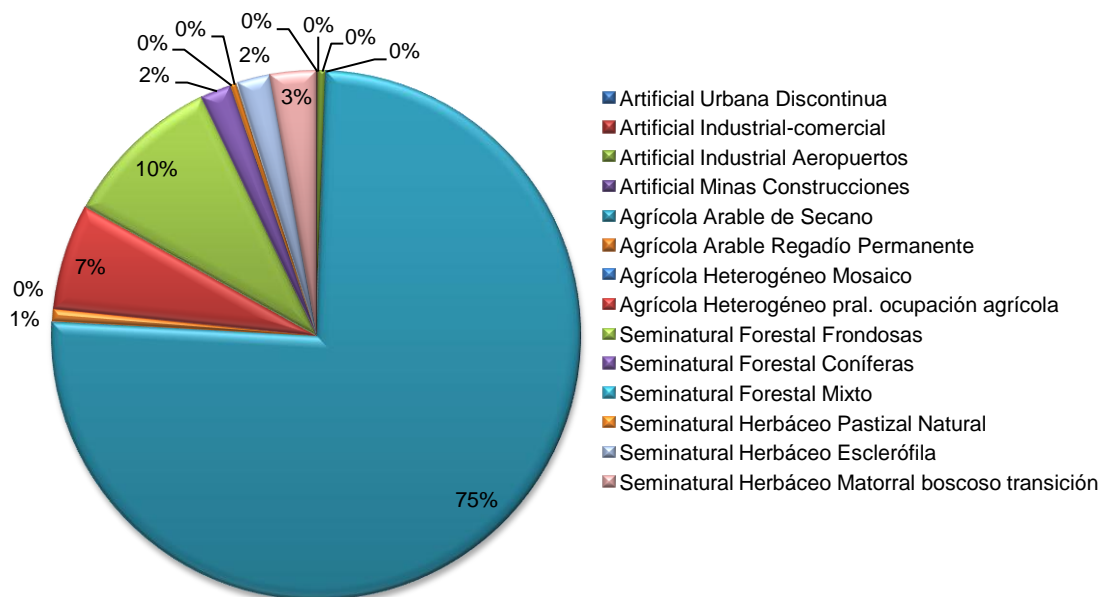


Fig. 32. Gráfico en porcentaje de los aprovechamientos del suelo (CORINE 2006).



Esta distribución de usos se traduce en que la principal actividad económica del páramo es la agricultura, aunque en la actualidad el auge de las energías renovables alternativas, sobre todo eólica (Fig. 33) y solar fotovoltaica, ha supuesto la introducción de un nuevo uso aún no cuantificado.



Fig. 33. Construcción del un parque eólico (Fecha: 08/10/2010).

Torozos cuenta, según el Ente Regional de la Energía de Castilla y León (EREN), con una potencia eólica instalada y en funcionamiento de 486 kW, a la que habría que sumar 188 kW con Autorización Administrativa. Respecto a los paneles fotovoltaicos situados en el entorno de los Torozos, suponen una potencia total instalada superior a los 1300 kW, todos sometidos a régimen especial [40, Ente Regional de la Energía de Castilla y León 2013].

3.1.5 Medio perceptual

Hablar de medio perceptual equivale a hablar del paisaje y de sus distintas unidades paisajísticas. Entre los valores más destacados se encuentran: las extensiones cerealistas; el bosque de galería (ribera); el encinar, quejigar y bosque mediterráneo; el curso de los arroyos; la arquitectura rural y religiosa; y el gran contraste en espacios reducidos.

La literatura del siglo XIX generalizó la identificación de las llanuras castellanas con un medio estepario sobre el que todo era luz, horizontes infinitos y la aridez mineral del sustrato. Se trata de una visión poética evidentemente simplificada de la realidad. Los Montes Torozos son, sin duda, algo más que cielo y tierra, prolongados ambos como rectas que se buscan en el infinito. La tierra plana en principio, se ve hendida en los valles que excavan los ríos y arroyos del páramo. Valles mucho mejor definidos aquí que sobre las campiñas vecinas. Y entre cielo y tierra, el monte, las manchas de encinas hacen del páramo un área más forestal que una inhóspita estepa. De cara al



exterior, el páramo sirve de promontorio y mirador natural, desde sus bordes pueden contemplarse perspectivas de las campiñas vecinas, llegándose a vislumbrar en días claros los macizos montañosos del norte peninsular

Por otra parte, es necesario destacar que el páramo de los Montes Torozos, es un paisaje deprecido por actividades de diversa naturaleza, y sin duda la agricultura es la causa de desaparición del bosque mediterráneo original que cubría los montes. En Torozos destacan las grandes extensiones dedicadas a la explotación cerealista, por tanto el paisaje sufre la transformación desde las verdes praderas de primavera, debidas a los brotes del cereal, hasta los campos amarillos y secos de verano. Desde cualquier punto del perímetro del páramo se puede disfrutar de grandes vistas, pero existen una serie de lugares consagrados como miradores destacados, entre ellos el Mirador de Campos, en Autilla del Pino; el de Peñafior de Hornija; el de Urueña; o el de Montealegre.



Fig. 34. Fotografía de la vista desde el mirador del Castillo de Montealegre de Campos (Fecha: 22/02/2012).

En cuanto a los asentamientos humanos, en Torozos estos están dispuestos en las faldas y en lo alto de montículos calizos que conforman estos montes, y son sin duda de gran agrado visual por tratarse de típicos pueblos castellanos, en los que aún pueden apreciarse algunas casas de adobe, construcción típica de la zona, además existen edificaciones de gran valor cultural y patrimonial. Por ello el paisaje urbano constituye un reclamo excelente y un recurso socioeconómico muy aprovechable, sin olvidar que los pueblos que ocupan el área de estudio presentan también un valioso patrimonio histórico.

La necesidad de integrar la acción humana en el estudio del paisaje vegetal es fundamental a la hora de realizar la caracterización ecológica y su interpretación desde el punto de vista paisajístico. La consideración del paisaje vegetal como un paisaje humanizado abre nuevas perspectivas e interrogantes, además de proporcionar dimensiones distintas a conceptos clásicos como el de la estructura de la vegetación. Desde esta perspectiva, la Biogeografía presenta grandes posibilidades de desarrollo. Por otro lado, permite recuperar las descripciones de la



vegetación e incluirlas dentro de un marco de referencia no exclusivamente ecológico para la comprensión del paisaje vegetal, estableciendo un vector entre lo natural, la historia, y las ciencias agroforestales. El intercambio de conocimientos entre unas y otras no se plantea por tanto en términos de convergencia, sino en términos de complementariedad [60, Guerra 2001].

Otro aspecto clave a la hora de analizar el paisaje de los Montes Torozos son los nuevos usos asociados a la energía, ya que presentan fuertes modificaciones de las panorámicas y son visibles desde grandes distancias.



3.2 PARÁMETROS HIDROGEOLÓGICOS DEL ACUÍFERO

La Cuenca del Duero ocupa una superficie de algo más de 77.000 km² lo que representa aproximadamente el 16% de la superficie peninsular española. El comportamiento de la Cuenca varía según los materiales de la zona. Así se diferencian tres grandes zonas según su comportamiento hidrogeológico:

1. El gran acuífero terciario que coincide con lo que geográficamente se conoce como Meseta del Duero.
2. Acuíferos superficiales que se apoyan sobre el anterior: páramos calizos, rañas y aluviales.
3. Acuíferos mesozoicos en los bordes de la cuenca, constituidos por rocas sedimentarias, principalmente calizas.

La Cuenca fue dividida por el Plan Hidrológico de la Cuenca del Duero [36, Dirección General de Obras Hidráulicas and Instituto Geológico & Minero de España 1988] en 21 Unidades Hidrogeológicas, las cuales se han integrado en el Plan Hidrológico de la Cuenca del Duero de 2009 [25, Confederación Hidrográfica del Duero 2009] junto con el resto de masas de agua superficiales, de acuerdo con lo establecido en la Directiva Marco del Agua [27, Consejo Europe. 2001].

El acuífero estudiado es la masa de agua subterránea del Páramo de los Montes Torozos (Cod. 400032) homóloga a la antigua unidad 02.07 (del *Páramo de Torozos*), situado en el centro de la cuenca, próxima al cauce del Duero.

Está constituida por calizas Pontienes (Mioceno Superior) horizontales con intercalaciones margosas apoyadas sobre el Terciario detrítico (Fig. 35). Su espesor general es de 6 a 15 metros, aunque puntualmente puede alcanzar los 30 metros.

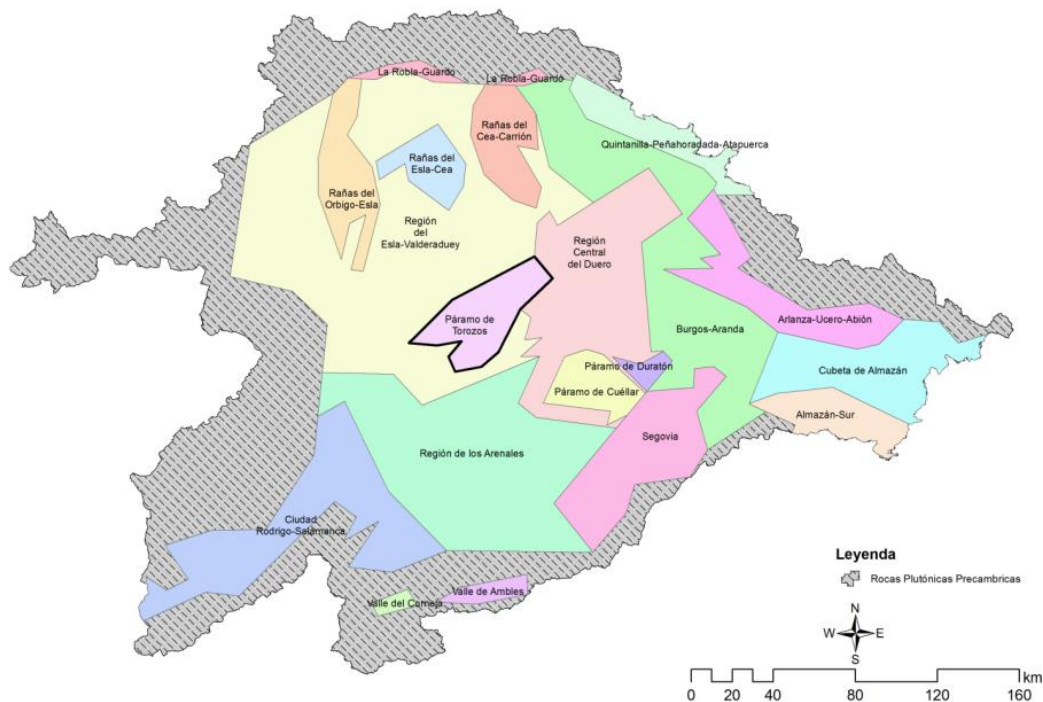


Fig. 35. Mapa de encuadre de las Unidades Hidrogeológicas de la Cuenca del Duero.

El estudio de toda masa de agua, requiere comenzar con una caracterización exhaustiva su geometría, sus propiedades, y su evolución con el tiempo. Esta caracterización es la que permite determinar el estado actual en el que se encuentra la masa y cuáles deben ser las líneas de trabajo para mejorarlo y conseguir el "Buen Estado" cualitativo y cuantitativo.

3.2.1 Cálculo de la piezometría

La valoración del estado cuantitativo parte de la cuantificación del recurso existente en un momento dado. Por ello durante el otoño de 2012 se realizó una campaña para determinar la piezometría (o nivel freático, al tratarse de un acuífero no confinado). En dicha campaña se midió la profundidad a la que se encontraba la lámina de agua en 28 pozos (Fig. 36). La fecha en la que se realizó fue un mes después del comienzo del año hidrológico, con el fin de dar un margen a la recuperación del acuífero después del verano y además evitar las interferencias de las extracciones para riego.

Debido a que el número de pozos accesibles y en buen estado no permitía elaborar una malla de puntos suficientemente representativa, se introdujeron otros dos tipos de puntos que permitieran crear una interpolación geoestadística robusta. Primero se optó por introducir los puntos de contacto de los materiales permeables e impermeables a lo largo del perímetro del páramo, es decir, el punto de afloramiento de los manantiales. Con los pozos y los manantiales, se realizó una primera interpolación, pero el resultado no se ajustaba lo suficiente a la realidad observada, por lo que fue necesario crear una serie de puntos "estimados" que permitieran modelar una superficie de isopiezas que ocupara todo el páramo de manera continua. Estos se obtuvieron a partir de la topografía, los niveles medidos en áreas próximas y la bibliografía existente en la IDE del Duero [26, Confederación Hidrográfica del Duero 2013]. Finalmente, para la calibración y validación del modelo geoestadístico, estos pozos fueron completados con los datos procedentes de los piezómetros de la Red de Control de Aguas Subterráneas de la Confederación (Fig. 16).

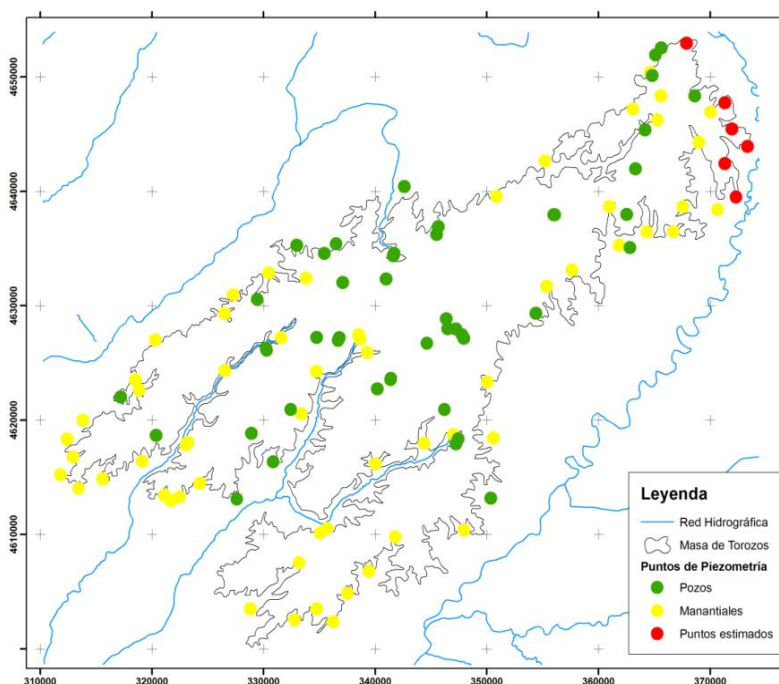


Fig. 36. Mapa de puntos muestreados usados para el modelo geoestadístico de la piezometría.



Con estos datos se han realizado distintas interpolaciones de tipo *Kriging* usando el programa SpaceStat [10, BioMedware 2013]. Para ello se realizaron dos modelos geoestadísticos distintos: el primero suponiendo un medio isótropo omnidireccional; y el segundo usando un modelo isótropo con un flujo preferencial.

Modelo 1.

Se supuso un medio homogéneo, isótropo y omnidireccional, con los parámetros de la tabla 26.

Parameters	Nugget	Model 1
Nugget (C_0)	361,2258	-
Type	-	Spherical
Sill (C_1)	-	517,3606
Min range (a_1)	-	28801,6903

Tabla 26. Parámetros de interpolación del Modelo 1.

Obteniendo el siguiente resultado de la piezometría con su variograma (Fig. 37)

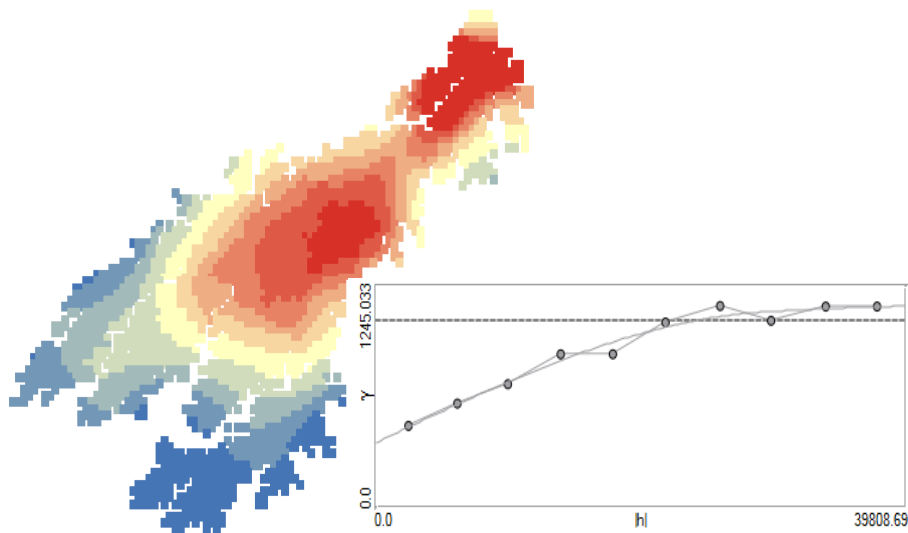


Fig. 37. Mapa y variograma resultante de la interpolación del Modelo 1 con SpaceStat.

A pesar de la bondad de la interpolación, al tener un efecto pepita menor del 50% (36%), el variograma parece indicar que pueden existirse dos estructuras con un comportamiento diferente. Por este motivo, se realizaron diversas pruebas tratando de buscar algún tipo de alineación o de flujo preferente.

Modelo 2.

Por ensayo-error se encontró, como cabía esperar por el modelo conceptual, una anisotropía en dirección NE-SO, con un ángulo aproximado de 45°. Conocido este alineamiento, se realizó un segundo modelo, a partir del cual se identificaron y modelaron dos estructuras diferenciadas (Fig. 38): una de aproximadamente 18 km, correspondiente con la parte norte de la masa de agua; y otra de 43 km que incluye todo el resto del acuífero (estas estructuras se modelaron con los parámetros de la tabla 27).



Parameters	Nugget	Model 1	Model 2
Nugget (C_0)	261,1159	-	-
Type	-	Spherical	Spherical
Sill (C_1)	-	617,3606	-
Sill (C_2)	-	-	254,8226
Min range (a_1)	-	18801,6903	-
Max range (a_2)	-	-	43048,2053

Tabla 27. Parámetros de interpolación del Modelo 2.

En la primera estructura, existe una relación de corta distancia entre los puntos, agrupando los puntos en un radio de 18 km. La segunda está formada por todo el resto del páramo desde el sur del arroyo del Valle, donde la relación entre los puntos es a una mayor distancia (43 km).

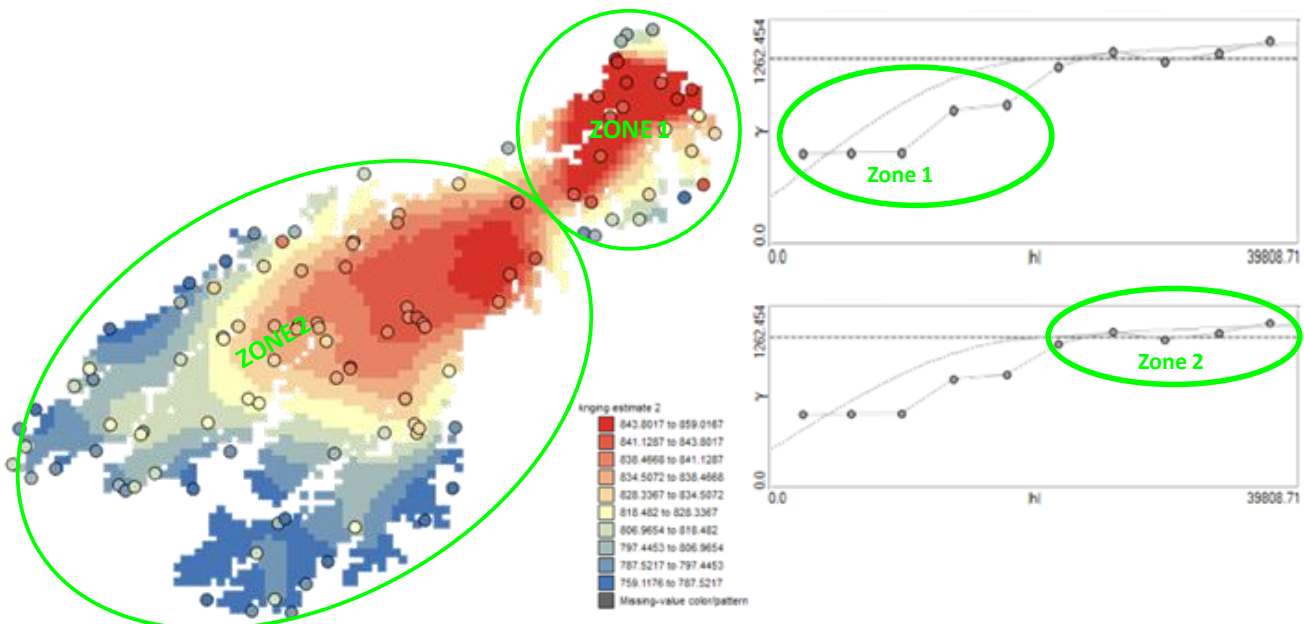


Fig. 38. Mapa y variogramas resultantes de la interpolación del Modelo 2 con SpaceStat.

Se puede observar que el efecto pepita disminuye hasta el 26% y para cada uno de los tramos existe una buena correlación entre el valor predictivo de la interpolación y el valor de cada punto (Fig. 38).

El cambio en el comportamiento hidráulico en cada uno de los tramos se puede explicar desde el punto de vista geológico por el estrechamiento que sufre el páramo a la altura del arroyo del Valle.

Finalmente se puede afirmar que el modelo geoestadístico del nivel freático es bueno, ya que la varianza obtenida durante el *kriging* es moderada (Fig. 39), y al superponer los puntos de cálculo se puede observar que la interpolación representa fielmente la realidad observada.

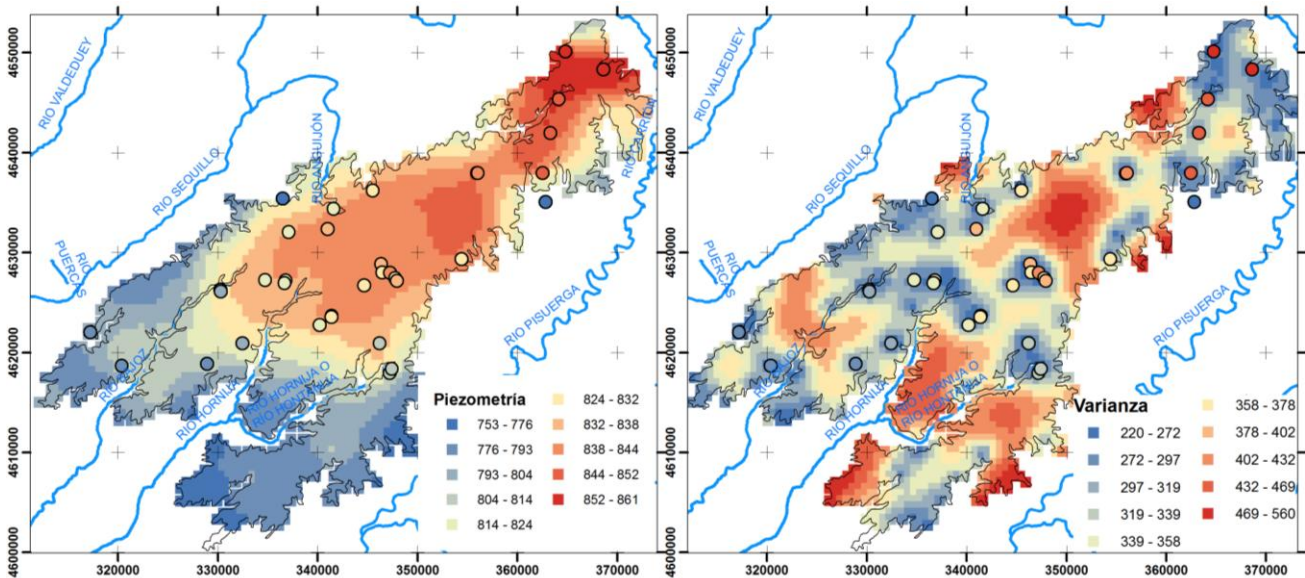


Fig. 39. Mapa piezométrico interpolado frente a mapa de la varianza resultante de la interpolación.

3.2.2 Cálculo de la inercia

La estimación de los parámetros hidrogeológicos parte de la premisa de aceptar como válidos los datos bibliográficos para las siguientes variables hidrogeológicas [33, Custodio & Llamas 2001]:

- Porosidad efectiva de las calizas: 15%
- Porosidad total de las calizas: 30%
- Coeficiente de almacenamiento: 0,15 al tratarse de un acuífero libre es igual a la porosidad efectiva.

Para determinar la inercia del acuífero se han correlacionado las variaciones de caudal medido en el nacimiento del Hontanija (Villanubla) con la precipitación media en la estación meteorológica de la misma localidad durante el mismo lapso de tiempo (Fig. 40)

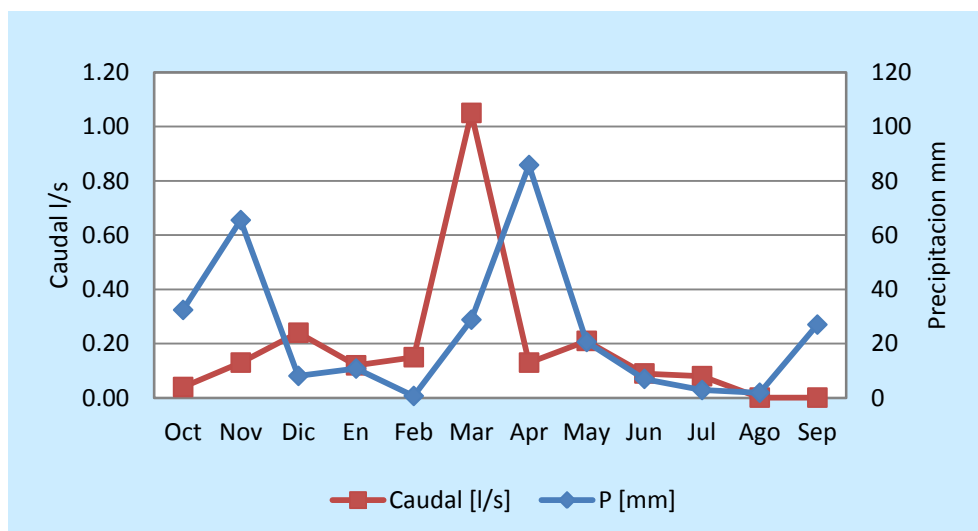


Fig. 40. Gráfico de relación precipitación-caudal para el aforo de Villanubla.



Parece existir cierta relación entre el caudal medido y las precipitaciones registradas. Para determinar dicha relación se ha optado por buscar la mejor correlación entre ambas variables a lo largo del periodo de tiempo más amplio posible. Se ha encontrado una correlación de 0,84 entre la precipitación caída entre los meses de octubre a marzo (que representa más del 50% de la precipitación anual) con el caudal medido entre los meses de febrero a julio (Tabla 28).

	Oct	Nov	Dic	En	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	R ²	%
P [mm]	32,40	65,50	8,10	10,80	0,70	28,80	85,80	20,60	7,00	2,90	1,90	0,00		
Q [l/s]	0,04	0,13	0,24	0,12	0,15	1,05	0,13	0,09	0,08	0,00	0,00	0,19	0,84	50,19

Tabla 28. Precipitación frente a caudal.

La elección de los seis primeros meses del año hídrico se justifica porque en teoría en ellos no existen extracciones destinadas al riego que pudieran ocasionar alteraciones en el régimen natural del acuífero, y el acuífero ya ha comenzado la fase de recarga. En este caso, esta afirmación no puede considerarse del todo cierta, pues en la cuenca de captación existen multitud de pequeñas extracciones destinadas a usos no agrícolas que también afectan al funcionamiento del acuífero. Pero, pero a pesar de ello, como el nivel de correlación es significativo, se puede afirmar que no sólo existe una relación directa caudal-precipitación, sino que además existe un desfase (o inercia) de cuatro meses. Esta inercia puede oscilar entre los 3 y 5 meses en función de las precipitaciones totales anuales, así en años muy húmedos la inercia estará más próxima a los 3 meses, mientras que en años secos se acercará a los 5 meses debido al menor gradiente hidráulico.

3.2.3 Permeabilidad

A partir del periodo de inercia y la piezometría se puede hacer una aproximación a la permeabilidad [K]. Conociendo el gradiente hidráulico [h] y la dirección de flujo obtenidas a partir de la piezometría, la permeabilidad es igual a la distancia que recorre el agua desde la divisoria hasta salir por el manantial. Aceptando una inercia de cuatro meses, es decir un intervalo de tiempo de 120 días, y sabiendo que la fuente de Villanubla está situada a 9.500 m (Fig. 41).

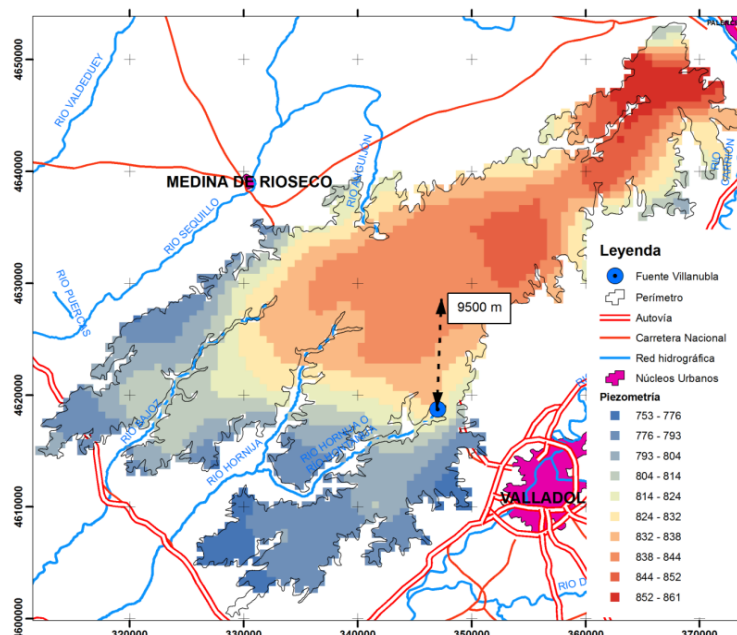


Fig. 41. Mapa de la distancia de la fuente de Villanubla al eje hipotético del acuífero.



De esta forma:

$$K = \frac{9500m}{120d} = 79,16m/d$$

O lo que es lo mismo una permeabilidad K igual a $9,16 \cdot 10^{-3}$ cm/s.

3.2.4 Transmisividad

De esta forma, suponiendo un espesor medio del acuífero de 12 m, la Transmisividad [T] se puede calcular multiplicando el espesor medio saturado por la permeabilidad, lo que da un valor de T, de $950 \text{ m}^2/d$.

3.2.5 Cálculo de α

A partir de este valor, aplicando la ecuación de de Custodio para acuíferos con drenaje radial, como es el acuífero de los Montes Torozos (Fig. 40), el proceso de liberación del agua subterránea sigue una ley exponencial igual a [33, Custodio & Llamas 2001]:

$$Q_t = Q_0 e^{-\alpha t}$$

Aplicando la ley de Darcy:

$$q = k \frac{h}{L} S'$$

Donde:

- q es el caudal saliente
- k es la permeabilidad
- L longitud al punto de mayor cota de agua
- S' sección

Sustituyendo, integrando y despejando, se obtiene que para un $t_0=0$

$$q = q_0 e^{-\alpha t}$$

De forma análoga, si todo el espesor está saturado, es permeable y existe un flujo horizontal, se obtienen la siguiente ecuación (ley inversa de cuadrados):

$$q = q_0 [1 + \mu \sqrt{q_0} (t - t_0)]^{-2}$$

Donde:

- μ es una constante dependiente de las características de la cuenca

Y al tratarse de una cúpula,

$$\alpha = \frac{\pi^2 T}{4SI^2}$$

Donde:

- T es la transmisividad
- S el coeficiente de almacenamiento
- I la distancia del eje de simetría del acuífero al manantial

De esta forma se obtiene un valor de α igual a: $4,32 \cdot 10^{-3}$ (adimensional).



3.2.6 Aproximación a la curva de agotamiento

Conocido α , el cálculo de la curva de gasto, o agotamiento, se ha aplicado el método de los logaritmos de los caudales [103, Mendes 2006].

La curva de agotamiento representa la disminución del agua almacenada en el acuífero. En el hidrograma de la estación de Villanubla (Fig. 41) se pueden identificar dos tramos de descenso a lo largo del año hidrológico: uno entre diciembre y enero, y otro entre marzo y julio. Asumiendo que la de julio a octubre va tener una mayor influencia de las extracciones destinadas al riego, se ha optado por trabajar sólo desde marzo a junio, ya que la única salida de agua se produce por el drenaje perimetral del manantial.

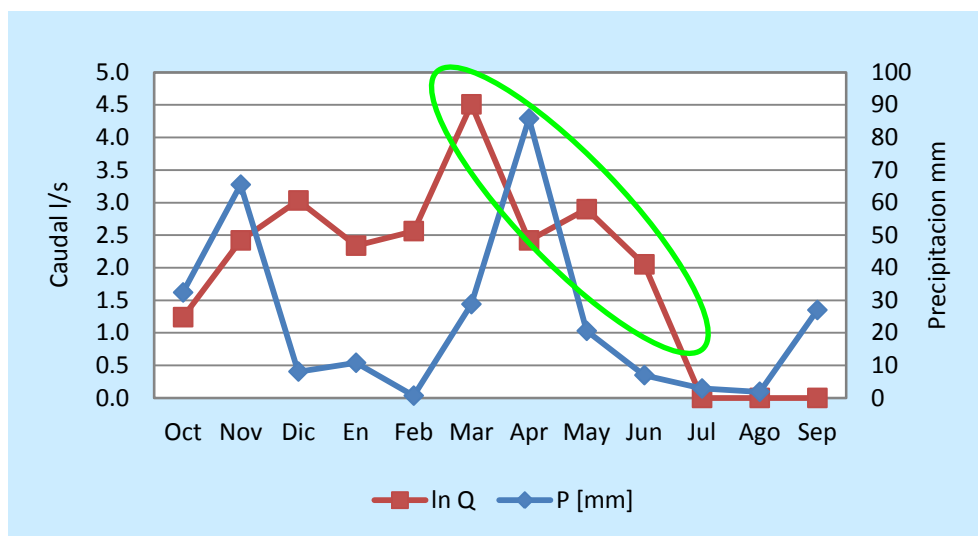


Fig. 42. Gráfico de la curva de agotamiento de Villanubla.

Al enfrentar el logaritmo neperiano de los caudales a la precipitación, los valores de la correlación no se ven significativamente alterados, obteniendo para los meses de octubre a marzo un factor de correlación de 0,83 con el desfase de cuatro meses (Tabla 29).

	Oct	Nov	Dic	En	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	R ²
P [mm]	32,40	65,50	8,10	10,80	0,70	28,80	85,80	20,60	7,00	2,90	1,90	0,00	
ln Q	1,24	2,42	3,03	2,34	2,56	4,51	2,42	2,90	2,05	0,00	0,00	0,00	0,83

Tabla 29. Precipitación frente al logaritmo de los caudales.

A partir del valor de α , y con la distribución temporal de los neperianos de los caudales, se puede crear una recta teórica de agotamiento (Fig. 43), que responde a la ecuación:

$$\ln Q = 9,85 - 0,0002x$$

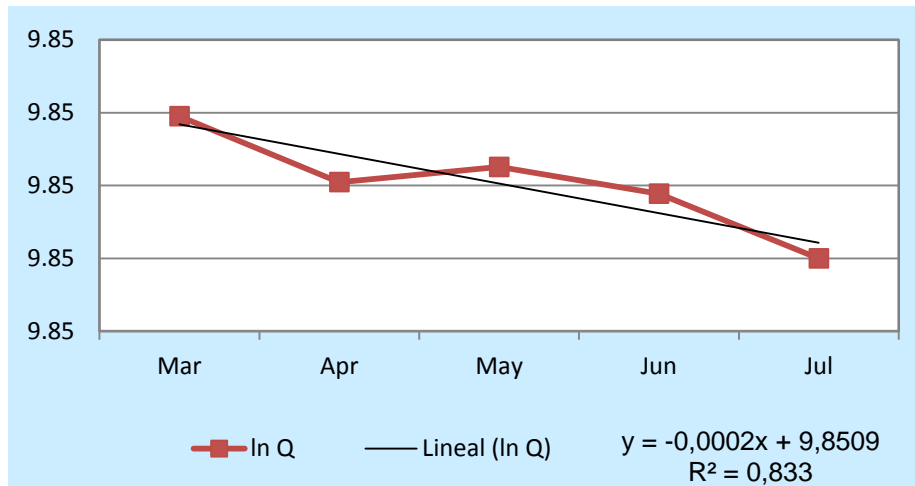


Fig. 43. Gráfico de la recta teórica de agotamiento de Villanubla.

Deshaciendo el neperiano de los caudales se obtiene:

$$Q_0 = 18958,35 \text{ m}^3 / \text{d}$$

De forma complementaria, se ha calculado la curva de agotamiento real para el mismo periodo, y se ha obtenido una recta de regresión (Fig. 44), que responde a la siguiente ecuación:

$$\ln Q = 5,19 - 0,9383x$$

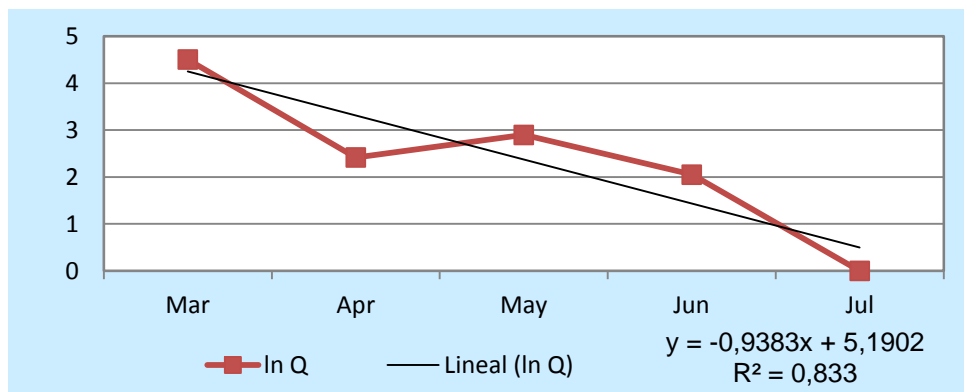


Fig. 44. Gráfico de la recta real de ajuste del neperiano de los caudales de Villanubla.

Existe una diferencia significativa entre la pendiente teórica y la real. Se puede justificar esta diferencia por varios motivos:

1. La alteración de las medidas asociada a captaciones de agua subterránea. Porque a pesar que no exista riego, si puede existir otras extracciones, que aunque de menor cuantía, puedan afectar al volumen.
2. La limitación de las mediciones puntuales que no reflejan de forma suficientemente precisa la evolución del caudal.
3. La superficie de la cuenca puede ser muy variable, ya que no existen elementos hidrogeológicos que permitan una definición certera.

Entre ambas curvas la experiencia práctica indica que es más verosímil la curva teórica que la real, por lo que para futuros cálculos sólo se considerarán los valores de los parámetros teóricos.



3.2.7 Recarga

Una vez aproximada la curva de gasto a una recta, se puede conocer cómo varía el volumen de agua almacenada (V_0) a través de la expresión [33, Custodio & Llamas 2001]:

$$V_0 = \int_0^{\infty} Q dt = \int_0^{\infty} Q_0 e^{-\alpha t} dt = \frac{Q_0}{\alpha}$$

Donde:

- Q_0 : es el caudal al inicio del descenso
- α : es el coeficiente de agotamiento, el cual está definido por la pendiente de la recta.

Sustituyendo, se obtiene:

$$V_0 = \frac{18958,35}{0,00017} = 111,52 \text{ hm}^3$$

Considerando un área triangular para la cuenca de 145 ha, es posible calcular la cantidad de agua infiltrada (I):

$$I = \frac{V_0}{A} = \frac{111519705.88}{14520451} = 7,68 \text{ mm}$$

Admitiendo que el episodio de precipitación, responsable de esta escorrentía, ocurrió entre el octubre y febrero (debido a la inercia), este valor se corresponde con un total de 146,3 mm de precipitación para ese periodo. De esta forma, el volumen determinado (V_0) representa 50,19 % del total de la precipitación. Por otra parte este valor de 111,51 hm^3 , concuerda bastante bien con el volumen estimado de las entradas (por precipitación al acuífero) de 141,12 hm^3 , obtenido de multiplicar la superficie del acuífero (981.572.201,8 m^2) por la lluvia útil (143,78 mm/año).

De estos resultados se deduce que la escorrentía superficial sea de este orden de magnitud, en relación a la precipitación total. Además se puede comprobar que la aproximación teórica (7,68 mm) se aproxima a los 8,8 mm de aportación estimados por la Confederación Hidrográfica del Duero y a los 8,38 calculados a partir de las variables meteorológicas.

3.2.8 Cálculo de las aportaciones:

La recarga se ha calculado usando técnicas estadísticas a partir de datos climatológicos de precipitación, temperatura y horas de sol. Previo al cálculo de la recarga, ha sido necesario calcular la evapotranspiración.

3.2.8.1 Evapotranspiración

Se ha calculado la evapotranspiración Real, mediante la ecuación de Turc; y la Potencial, mediante Thornwaite, para la serie temporal 1956-2006 de la estación de Villanubla.



ETR-Turc ha sido calculada con la ecuación [144, Turc 1961]:

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

$$L = 300 + 25t + 0,05t^3$$

Donde:

- *ETR* es la evapotranspiración Real en [mm/año]
- *P* es la precipitación media acumulada [mm/año]
- *t* es la temperatura media [°C]

La ETP-Thornwaite responde a la expresión [143, Thornthwaite 1948]:

$$ETP_{\text{sin corregir}} = 16 \left(\frac{10t}{I} \right)^\alpha$$

Donde:

- *ETP*: es la evapotranspiración Potencial en [mm/año]
- *I*: es el índice de calor mensual $I = \sum_{12} i \Leftrightarrow i = \left(\frac{t}{5} \right)^{1,514}$
- *t*: es la temperatura media mensual [°C]
- α : es un parámetro dependiente de *I*

$$I = 675 \cdot 10^{-3} x I^3 - 771 \cdot 10^{-7} x I^2 + 1792 \cdot 10^{-5} x I + 0,49239$$

La ETP se ha ajustado y corregido según el número de días del mes y el número de horas de sol [38, Doorenbos & Pruitt 1977].

$$ETP = ETP_{\text{sin corregir}} \times \frac{N}{D} \times \frac{d}{30}$$

Donde:

- *N*: es el número máximo de horas de sol, dependiendo del mes y de la latitud.
- *d*: número de días del mes

En resumen, Torozos posee una ETR media anual de 312 mm, una ETP sin corregir de 593 mm y corregida de 655 mm, distribuidos mensualmente como aparece en la tabla 30 y en la Fig. 45.

	Oct	Nov	Dic	En	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Media
P [mm]	43,91	34,09	36,90	42,50	47,24	35,94	18,16	16,45	33,37	45,94	51,68	50,18	456,38
Tª [°C]	3,09	4,61	7,33	9,20	12,60	17,11	20,17	20,03	17,05	12,03	6,83	3,65	11,14
ETPsc	10,19	16,49	28,80	37,86	55,29	79,89	97,40	96,60	79,54	52,28	26,43	12,44	593,22
ETPc	9,12	15,76	29,76	42,05	64,75	96,31	116,59	109,80	84,94	51,77	24,13	10,93	655,91
ETR Turc	19,45	20,48	22,40	23,82	26,70	31,21	34,76	34,59	31,14	26,19	22,04	19,83	312,60

Tabla 30. Distribución de la precipitación, temperatura, ETP y ETR.

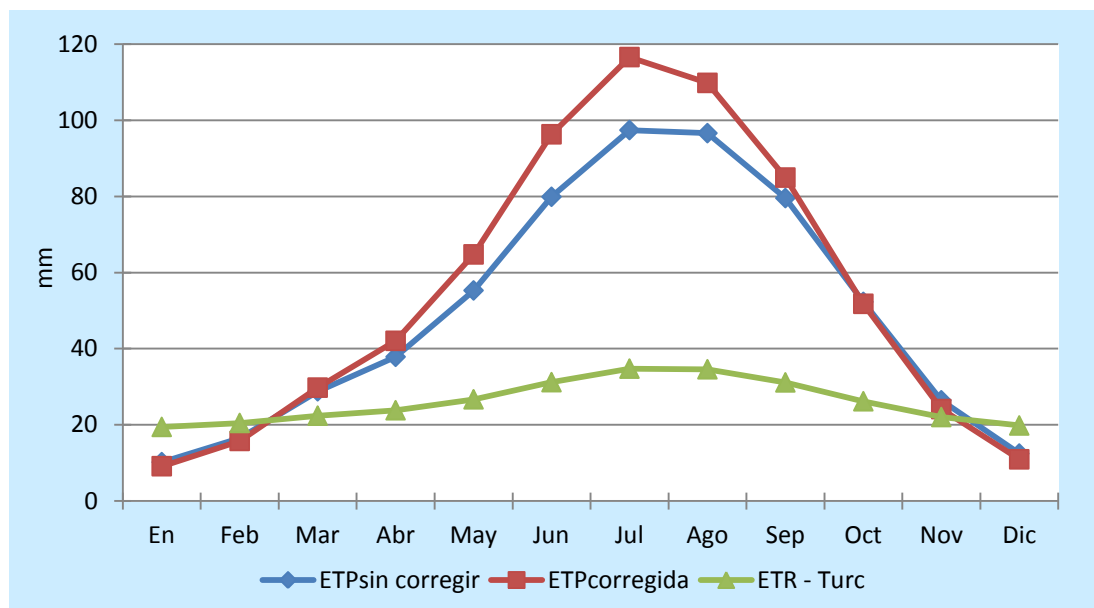


Fig. 45. Comparación de las evapotranspiraciones calculadas.

3.2.8.2 Aportación superficial

La estimación de las aportaciones superficiales (escorrentía) se ha realizado a partir de los datos y los mapas de aportaciones anuales y mensuales medios de la Confederación Hidrográfica del Duero [25, Confederación Hidrográfica del Duero 2009]. Posteriormente se ha comparado con la aportación total calculada a partir de los datos meteorológicos.

De los mapas *raster* de aportaciones, tanto de la serie larga como de la corta, y de los mapas mensuales, se ha hecho una extracción mediante una máscara, y se han obtenido los siguientes valores promedio (Tabla 31).

Aportaciones	Min mm/año	Max mm/año	Med mm/año	Des
Serie corta	0,00	67,15	6.58	7,20
Serie larga	0,00	76,65	8.40	8,70

Tabla 31. Aportaciones superficiales estimadas para la Masa de agua DU-40032.

Conocido el valor de la aportación media (8,4 mm/año) al multiplicarlo por la superficie del páramo, se obtiene un volumen de recurso 8,4 hm³. Pero como la precipitación no es del todo homogénea, se ha calculado el valor medio de las aportaciones para cada uno de los polígonos de Thiessen en las que se ha dividido la masa de agua subterránea. Para ello, se ha calculado la extensión de cada uno de los polígonos (mediante herramientas SIG) y se ha multiplicado por el dato de aportaciones media acumulada de la serie larga (1940-2005) de la CHD, ponderado en función de las precipitaciones de cada una de las estaciones (Tabla 32) [25, Confederación Hidrográfica del Duero 2009].



Polígonos	Nombre	Área del Polígono	P anual [mm]	Aport [mm]
2532	Castromonte	73774157	413,37	8,049
2533	La Santa Espina	183502630	484,87	9,441
2536U	La Esperanza	252331943	351,02	6,835
2538	Cortas de Blas	89734833	454,08	8,841
2539	Villanubla	205517182	456,38	8,886
2601	Páramo Matallana	86896128	434,12	8,453
2607I	Monte Garrido	89815327	424,65	8,268

Tabla 32. Aportaciones medias estimadas para los polígonos de Thiessen (dato procedente del modelo del CEDEX, a partir de la restitución de las series del modelo SIMPA 2008).

Como resultado se obtiene una aportación superficial total para el páramo $8,14 \text{ hm}^3/\text{año}$. Aunque la distribución espacial de la precipitación es bastante homogénea, si se eliminan las aportaciones extremas (es decir, la estación de la Santa Espina (con $9,4 \text{ mm/año}$), que se encuentra ya en el valle del Bajoz; y la estación de la Esperanza con una serie temporal de 6 años) se puede aceptar una aportación media de $8,38 \text{ mm/año}$ distribuida temporalmente de la siguiente manera (Tabla 33):

	Min	Max	Med	%
Octubre	0,00	7,01	0,23	2,73
Noviembre	0,00	17,52	0,66	7,86
Diciembre	0,00	15,11	1,51	18,03
Enero	0,00	15,38	1,84	21,92
Febrero	0,00	10,69	1,62	19,34
Marzo	0,00	10,95	1,47	17,51
Abril	0,00	4,04	0,57	6,82
Mayo	0,00	3,21	0,40	4,78
Junio	0,00	1,56	0,07	0,80
Julio	0,00	0,35	0,00	0,02
Agosto	0,00	0,24	0,00	0,02
Septiembre	0,00	2,00	0,01	0,17

Tabla 33. Distribución mensual de las aportaciones.

El valor obtenido se ha multiplicado por la superficie de la cuenca para calcular las aportaciones superficiales, y los resultados se exponen en la tabla 34.



De forma análoga se han calculado las aportaciones anuales totales utilizando los datos meteorológicos proporcionados por la AEMT, y el concepto de lluvia útil, que se define como el agua de precipitación que escapa a la evapotranspiración y que se infiltra en terreno, y se calcula restando de la precipitación total [P] la ETR (Tabla 35).

	En	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
P [mm] Total	43,91	34,09	36,90	42,50	47,24	35,94	18,16	16,45	33,37	45,94	51,68	50,18
ETR - Turc	19,45	20,48	22,40	23,82	26,70	31,21	34,76	34,59	31,14	26,19	22,04	19,83
Lluvia útil	24,47	13,61	14,50	18,68	20,54	4,73	-16,59	-18,14	2,23	19,75	29,64	30,35

Tabla 35. Lluvia útil calculada.

De esta forma se obtiene un valor de lluvia útil de 143,75 mm/año, que al multiplicarlo por la superficie de las calizas del páramo (981572201,8 m²) da un volumen de 141,10 hm³/año.

3.2.8.3 Infiltración y recarga

La recarga de los niveles acuíferos dependerá de los Coeficientes de Infiltración de los diferentes materiales. Este modelo solo considera los recursos hídricos útiles almacenados en las calizas, para calcular la tasa de infiltración, se ha partido los datos de precipitación y ETR, con los que se ha calculado la lluvia útil.

A partir de la lluvia útil y las aportaciones, se ha restado de la primera la segunda, obteniendo los resultados de la tabla 36 [33, Custodio & Llamas 2001].

	mm/año
Lluvia útil	143,75
Aportación superficial	8,38
Infiltración	135,37

Tabla 36. Infiltración total estimada.

Lo que supone un coeficiente de infiltración de 94,17%, bastante alejado de las cifras bibliográficas del 60% existente para formaciones calizas. Esta desviación se justifica por la alteración de los procesos de sedimentación durante la fase en la que actúa la Neotectónica. Este valor se ha adoptado de forma homogénea para toda la superficie del páramo (Tabla 37).

Polígonos	Nombre	Área del Polígono	Aport mm	infiltra hm ³
2532	Castromonte	73774157	8,049	0,559
2533	La Santa Espina	183502630	9,441	1,631
2536U	La Esperanza	252331943	6,835	1,624
2538	Cortas de Blas	89734833	8,841	0,747
2539	Villanubla	205517182	8,886	1,719
2601	Páramo Matallana	86896128	8,453	0,691
2607I	Monte Garrido	89815327	8,268	0,699

Tabla 37. Infiltración ponderada a los polígonos de Thiessen.



3.2.9 Cálculo de las extracciones: drenaje y pozos

Para los cálculos de las extracciones se ha partido de los datos de aforos medidos y de los datos obtenidos de la IDE del Duero relativos a extracciones subterráneas y unidades de demanda agraria.

3.2.9.1 Drenaje perimetral

Respecto del drenaje perimetral radial se han identificado a partir de la cartografía 78 posibles puntos de agua donde realizar aforos. De todos ellos, ya sea por razones de accesibilidad, por no haber sido localizadas, o por estar casi permanentemente secos, solamente 13 presentan condiciones aptas para realizar un aforo con el equipo disponible.

El mal estado generalizado de los cauces y manantiales se debe a la gran cantidad de alteraciones que ha sufrido la red hidrográfica a partir de la concentración parcelaria, la roturación de las laderas y de los valles de menor pendiente, o incluso al vandalismo (Fig. 47).



Fig. 47. Cambio del estado del Manantial de Castrovita. Fotografías de los años: 2006, 2010, 2012.

Solo se encuentran en buen estado algunas fuentes y manantiales, destinadas en su mayoría actualmente a uso agropecuarios, se encuentran en buen estado. Pero esta conservación en ocasiones lleva asociada una regulación artificial, ya sea mediante grifos con depósito, o pozos cercanos, anulando su validez a la hora de incluirlas en el estudio.

Por todas estas razones, se ha realizado un seguimiento de las 13 fuentes accesibles y aforables (Tabla 38), pero sólo se han monitorizado las que se han considerado permanentes, es decir que no se secan a lo largo de todo el año. Pero debido al tiempo que se ha tardado en desarrollar este trabajo científico, se puede afirmar, que en Torozos no existe ninguna fuente permanente, ya que en años secos o muy secos (pluviometría menor a 350 mm/año), todos los manantiales terminan por secarse, como es el caso del río Bajoz (Fig. 48). No obstante, existen excepciones, como la fuente de la Salud (Peñaflor de Hornija) que nunca se ha observado completamente seca.



Fig. 48. Embalse de la Santa Espina, río Bajoz en agosto de 2007y en agosto de 2012.

Por condiciones de accesibilidad y relevancia en términos volumétricos, sólo se han monitorizado 6 de las 13 fuentes. La monitorización ha consistido en cuantificar el caudal y medir las propiedades fisicoquímicas más significativas: temperatura (T^a), pH, conductividad eléctrica (EC), Salinidad (SAL), Sólidos totales en suspensión (TDS), oxígeno disuelto (OD), nitratos ($(NO_3)^-$) y nitritos ($(NO_2)^{2-}$). De forma complementaria, y como comprobación de algunas hipótesis, se han valorado en el laboratorio algunos otros iones como cloruros (Cl^-) y carbonatos ($CaCO_3$).

En un primer periodo la toma de muestras se hizo una vez cada estación. Posteriormente se aumento la frecuencia a una vez al mes, para terminar finalmente adoptando una postura flexible en función de las necesidades de información y los acontecimientos climáticos extremos (abundantes precipitaciones, fuertes heladas, etc.) para comprobar si se encontraba una respuesta directa del acuífero. Esta situación se tradujo en muestrear en otoño e invierno 1-2 veces por semana, y en primavera y verano una vez cada 2-3 semanas.

Los valores medios medidos de los cauces y fuentes aforadas durante las salidas se muestran en la tabla 38.

Nombre	Estado	Municipio	Aforo [l/s]	Coord. X	Coord. Y
Fte Bercero	Aforado	Castrodeza	0,21	335046	4610047
Fte del Caño - San Pelayo	Aforado	San Pelayo	2,76	330867	4616359
Bajoz - Castrovita	Aforado	Castromonte	0,4	331577	4627218
Fte de la Monja - Los estudios	Aforado	San Cebrián de Mazote	0,05	323226	4618074
Arry del Prado	Aforado	Villalba de los Alcores	0,01	345638	4636920
Fte Valdenebro	Aforado	Valdenebro de los Valles	0,64	336770	4635876
Fuente afluente del Bajoz	Aforado	San Cebrián de Mazote	0,05	323859	4620393
Rio Hontanija - Fte Los Ángeles	Monitorizada	Villanubla	0,45	347007	4618740
Fte de la Salud - Hornija	Monitorizada	Peñaflor de Hornija	3,2	333386	4620550
Fte San Antonio - Hornija	Monitorizada	La Mudarra	0,54	338636	4627091
Embalse Sta. Espina - Bajoz	Monitorizada	Castromonte	70,62	326518	4624339
Emb Fuenteungrillos	Monitorizada	Villalba de los Alcores	13,54	341682	4634567
Fte Romana Montealegre	Monitorizada	Montealegre de Campos	0,54	342602	4640429

Tabla 38. Caudales medios medidos.

Después de reconocer *in situ* el mayor número de las fuente identificadas, muchas de ellas no pudieron ser aforadas, bien por la falta de caudal, por la dificultad de acceso al cauce, o porque la vegetación y la irregularidad del cauce impedía cualquier tipo de medida (Fig. 49).

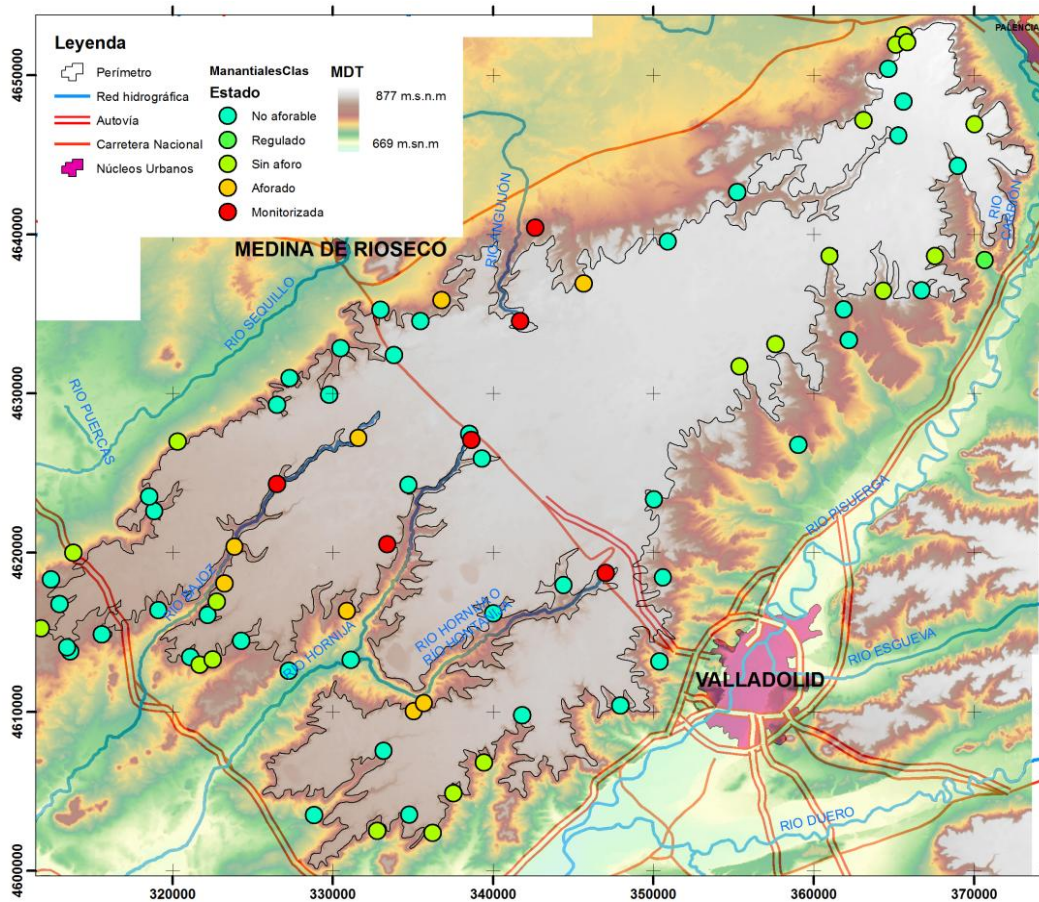


Fig. 49. Mapa de las fuentes y manantiales inventariados.

Para conocer el volumen drenado por el páramo se ha recurrido a una aproximación realizada a partir de los aforos y extrapolándolos al resto de las 78 fuentes según su importancia, asignando un valor medio dependiendo si el manantial es puntual, temporal o permanente. Además, como el tamaño de celda del modelo hidrogeológico planteado impide la simulación de los 78 puntos de agua, se ha optado por reducirlos a 32 unificando puntos próximos entre sí. El resultado es un drenaje estimado en $10,22 \text{ hm}^3/\text{año}$.

3.2.9.2 Extracciones mediante pozos

Para determinar el volumen sustraído mediante captaciones subterráneas ha sido necesario recurrir a los datos del Proyecto ALBERCA de la CHD y del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, y de los datos de las Unidades de Demanda Agraria (UDAs). A partir del proyecto Alberca, se han identificado 211 captaciones todas en formas de pozo y sondeos (de muy diversa naturaleza), pertenecientes a las UDAs del terciario detrítico bajo los páramos de Torozos del Carrión, Pisuerga y Bajo Duero (Tabla 39 y Fig. 50).

	nº Pozos	Vol_anual [hm ³]
Duero	94	6,10
Carrión	84	1,14
Pisuerga	33	1,76

Tabla 39. Volúmenes totales extraídos por UDA.

Al igual que con el drenaje, no se han podido simular todas y cada una de las extracciones por bombeo y se ha tenido que recurrir a una simplificación, juntándolos en un solo pozo el caudal extraído por todos los pozos próximos.

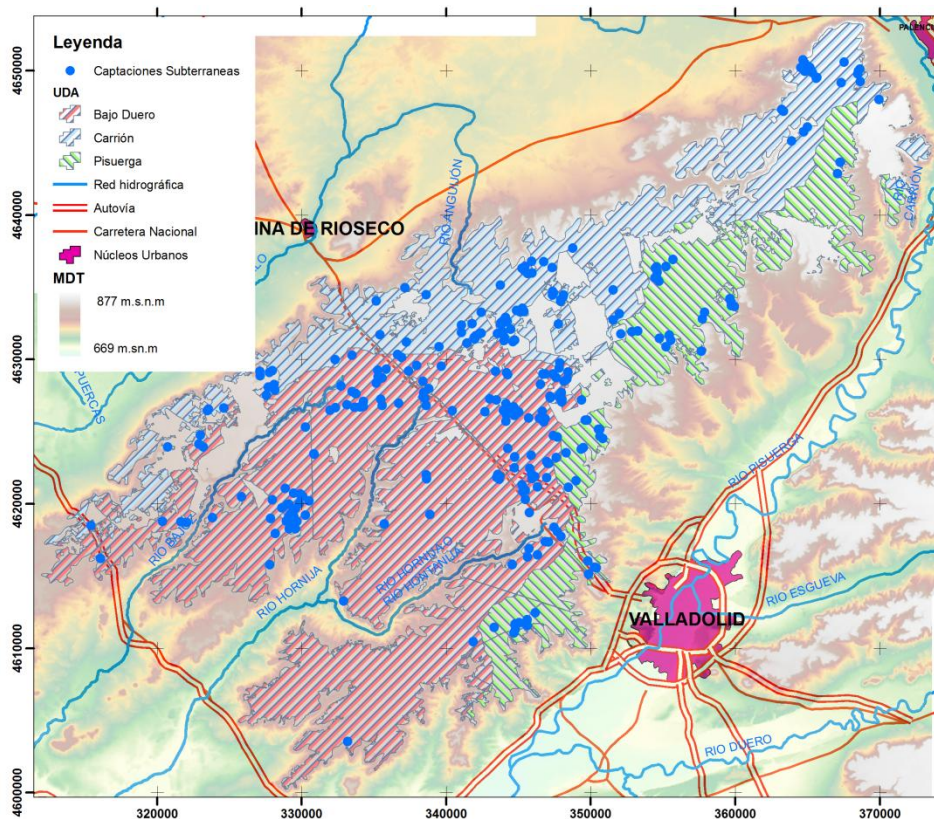


Fig. 50. Mapa de extracciones subterráneas por Unidad de Demanda Agraria.

Debido a que el proyecto Alberca solo proporciona datos de máximo caudal concedido, y no de volumen real extraído, el resultado total de la salida de recurso hídrico por efecto de las captaciones va a estar sobredimensionado. Este hecho, a efectos prácticos, presenta el problema de la precisión y exactitud de los cálculos, pero desde el punto de vista de la sostenibilidad y conservación de los recursos es una medida válida de carácter conservador. Así, de las 211 captaciones se ha obtenido un detractamiento total anual de 9,02 hm³.

3.2.10 Balance hídrico

El balance hídrico puede considerarse como una primera aproximación al modelo, o incluso el primer modelo, ya que es la primera y más sencilla aproximación a la descripción del estado y del funcionamiento del acuífero.



El balance hídrico para la masa de agua de los Montes Torozos se ha realizado mediante dos aproximaciones paralelas. Por un lado la bibliográfica, a partir de los datos registrados en el catalogo de datos del IDE del Duero; y otro a partir de los datos meteorológicos y experimentales.

3.2.10.1 Balance bibliográfico

De acuerdo con la información de la masa de agua DU40032 de la IDE del Duero, las aportaciones a la unidad provienen de la precipitación, lo que supone una infiltración próxima a los 45 hm³/año; y de los retornos de riego, valorados en 1 hm³/año. Respecto a las salidas se producen por el drenaje hacia los manantiales y por las captaciones subterráneas. Sobre el drenaje no existen datos volumétricos, pero la CHD cuantifica las extracciones por bombeo en 6,062 hm³/año, repartidos de la siguiente manera: agricultura y ganadería, 5,596 hm³/año; abastecimiento a la población 0,28 hm³/año; industria 0,0065 hm³/año, y otros 0,121 hm³/año.

Con estos datos y descontando las restricciones ambientales estimadas en 9 hm³/año, se obtiene un volumen de recurso aproximado de 37 hm³/año, con un índice de explotación de 0,164, que se traduce en un ESTADO CUANTITATIVO **BUENO**, ya que es inferior a 0,8.

Pero desde un punto de vista conservador, a pesar de la existencia de una cantidad de recurso notable, debido a que los registros numéricos son poco extensos, y sobre todo no se han observado variaciones piezométricas relevantes, se debe actuar siempre adoptando posiciones conservadoras, que no pongan en peligro la sostenibilidad del recurso.

3.2.10.2 Balance experimental

La forma de calcular el balance hídrico para la cuenca de estudio responde a la siguiente expresión:

$$\text{Entradas (aportaciones)} - \text{Salidas (extracciones)} = \text{Variación de Volumen (almacenamiento)}$$

Partiendo de los resultados obtenidos para cada uno de los parámetros hidrogeológicos básicos calculados anteriormente, y utilizado los volúmenes totales obtenidos de las aportaciones y extracciones, se han obtenido los siguientes resultados de balance hídrico en la tabla 40.

Mes	Precipitación	ETR	Drenaje	Escorrentía	Captaciones	Balance hm ³
Octubre	43,10	19,09	0,73	0,23	0,00	23,05
Noviembre	33,46	20,10	0,73	0,65	0,04	11,94
Diciembre	36,22	21,99	1,04	1,48	0,50	11,21
Enero	41,72	23,38	0,91	1,81	0,44	15,18
Febrero	46,37	26,21	1,26	1,59	0,83	16,48
Marzo	35,28	30,63	1,25	1,44	1,78	0,17
Abril	17,83	34,12	0,48	0,56	2,37	-19,70
Mayo	16,15	33,95	0,70	0,39	2,01	-20,91
Junio	32,76	30,57	0,18	0,07	1,04	0,90
Julio	45,09	25,71	0,61	0,00	0,00	18,78
Agosto	50,73	21,63	1,65	0,00	0,00	27,44
Septiembre	49,26	19,46	0,70	0,01	0,00	29,08
TOTAL	447,95	306,85	10,22	8,23	9,02	113,63

Tabla 40. Valores numéricos mensuales del balance experimental en hm³.



Como se puede observar entre las dos aproximaciones al balance, la diferencia entre ellos radica sobre todo en dos aspectos clave: la pérdida de recursos por la red de drenaje y la cuantificación de las extracciones.

Respecto a la red de drenaje este trabajo de investigación presenta una primera aproximación que deberá mejorarse y perfeccionarse.

En lo tocante a la aproximación experimental de las captaciones, se ha asumido el peor de los escenarios posibles, es decir aquél en el que todos los concesionarios extrajeran el volumen completo de recursos concedidos. Esta situación es complicado que se produzca, a pesar del elevado número de concesiones existente. Esto se debe a la propia naturaleza del acuífero y su forma tradicional de explotación. La fuerte estacionalidad climática, la baja transmisividad generalizada y los flujos preferenciales resultantes de la red de fracturación, han conducido a la creación de campos de pozos aleatorios, ya que la mayoría de las captaciones son muy antiguas y estaban construidas de acuerdo a las indicaciones de los zahoríes.

Estos pozos buscan obtener suficiente volumen de agua como para convertir el secano en regadío, pero si no se acompañan de grandes balsas de regulación que aseguren un riego constante, los pozos normalmente se secan antes de realizar un riego suficiente, haciendo que la transformación y modernización sean complicadas. Aunque no exista paso a regadío, muchas captaciones sí se usan para asegurar o mejorar los cultivos de secano mediante riegos ocasionales con sistemas desmontables. El resultado es que con los más de 6 hm³ destinados a la agricultura sólo se han puesto en regadío 687 ha, es decir el 0,7% del uso está clasificado como Agrícola Arable Regadío Permanente.

Otro resultado obtenido a partir de la comparación de estos dos balances, es la relación existente entre volumen extraído y concedido, que actualmente se sitúa en torno al 67,21%.

A partir de todos estos valores, se obtiene: un recurso anual procedente de las precipitaciones estimado en unos 141,10 hm³/año; una extracción por las explotaciones valorada en 9,02 hm³/año; y un drenaje perimetral cuantificado en 10,22 hm³/año. Esto supone un balance hídrico anual positivo de 113,63 hm³/año, de los cuales una parte se perderá por: el efecto goteo desde las calizas hacia el paquete impermeable, la extracción mediante captaciones no inventariadas (bastantes habituales en la zona); y por el drenaje perimetral difuso. Por lo tanto y de acuerdo con lo establecido en el Plan de Cuenca, se estiman unas reservas estimadas no inferiores a 62 hm³/año [73, Instituto Geológico y Minero de España. 2014].

CAPÍTULO IV:

El modelo y los resultados



4.1 CONSTRUCCIÓN DEL MODELO

El uso más extendido de los modelos hidrológicos es simular el comportamiento de un sistema ante distintas alternativas de gestión, con el fin de ayudar a la toma de decisiones y tratar de elegir las acciones más convenientes en función de los objetivos. Pero esta tarea implica una descripción profunda del sistema, lo que sin duda va a suponer una mejora en el conocimiento del propio sistema y sus relaciones internas y externas, y así avanzar hacia mejores prospecciones futuras, la optimización de recursos, y hacer inferencias sobre la cantidad y calidad del recurso hídrico.

La razón que sustenta el uso de modelos es la imposibilidad de evaluar todos los procesos naturales existentes a la hora de buscar posibles soluciones a los problemas o incógnitas planteadas. Por este motivo, el modelos debe tener la capacidad de integrar de forma simplificada todas las características y procesos del sistema.

En esta memoria partiendo del balance hídrico, se ha realizado un modelo numérico determinístico de flujo del sistema acuífero, para lo cual ha sido indispensable contar con una cartografía suficiente, sobre la que se puedan establecer las características hidrodinámicas y geométricas de la unidad hidrogeológica modelada. La definición del movimiento del agua puede simularse si se cuenta con: la geometría, las propiedades físicas del medio, las leyes que gobiernan el movimiento del agua, las condiciones en los límites del sistema, las condiciones iniciales de funcionamiento del sistema, y la descripción de las acciones exteriores al sistema [106, Ministerio de Obras Públicas 1972].

El resultado del modelo hídrico subterráneo es la obtención, como producto, de la evolución de los niveles de agua y de las velocidades de flujo en el entorno definido (el dominio). El problema radica en la dificultad propia de adquisición y fiabilidad de datos. El origen de los datos para realizar el modelo es diverso, y debe comprobarse su veracidad y exactitud, con el fin de minimizar los errores.

Los límites del sistema pasarán a definir las condiciones de borde del sistema, por este motivo se deben aprovechar límites naturales tales como límites geológicos, divisorias de aguas superficiales o subterráneas, líneas de flujo, o niveles de flujo constante. En el caso de no poder usar estos límites es necesario usar otros límites que no afecten al comportamiento del sistema.

Por su parte, el funcionamiento hidráulico se ha determinado a partir de los resultado obtenidos del modelo en régimen estacionario. Al que posteriormente se han incorporado las acciones externas al sistema hasta obtener el modelo en régimen transitorio. Las principales acciones externas son: la recarga y las extracciones por bombeo.



Los pasos realizados para construir el modelo de la masa de agua subterránea de los Montes Torozos (Fig. 51) son los que se muestran en el siguiente esquema, y a los cuales se va a ceñir este capítulo [147, Vela 2008]:

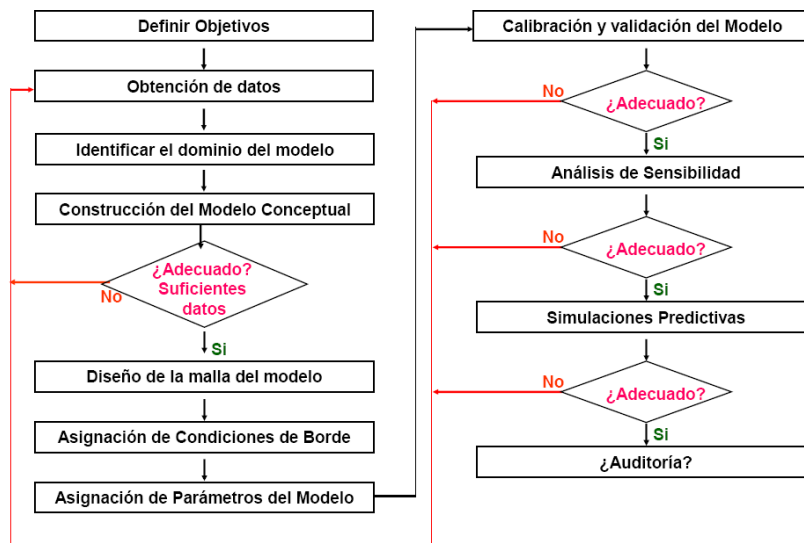


Fig. 51. Esquema resumen del proceso de modelado.

4.1.1 Definición de objetivos

El objetivo último del modelo es obtener una estimación de los recursos, la determinación numérica y gráfica del régimen de flujo y la piezometría, así como su evolución a lo largo del año hidrológico. Para cuantificar estos recursos la herramienta informática empleada, MODFLOW, usa una formulación matemática de ecuaciones diferenciales que representan el flujo en base a la ecuación de Darcy en forma de diferencias finitas y la ecuación de conservación de la masa.

De esta manera y en el acuífero libre que ocupa este trabajo se ha tratado de reproducir de forma cuantitativa y cualitativa el movimiento del agua a través de un medio saturado poroso.

4.1.1.1 La formulación matemática del modelo

La formulación matemática de la ecuación parcial diferencial que gobierna el flujo de agua subterránea y usada en MODFLOW en régimen transitorio en medio homogéneo e isótropo [33, Custodio & Llamas 2001] es la siguiente:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right] + W = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

Donde:

- K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} , son los valores de la conductividad hidráulica para los ejes cartesianos x , y , z
- h , es la pérdida de carga hidráulica
- W , es el flujo volumétrico por unidad de volumen
- S_s , es el almacenamiento específico del medio poroso
- t , es el tiempo



El método de resolver la ecuación diferencial por diferencias finitas en un espacio discreto equivalente al dominio del acuífero representado por una malla de filas, columnas y capas, con la siguiente distribución y nomenclatura, responde a la siguiente formulación (Fig 52) [142, United States Geological Survey 2014]:

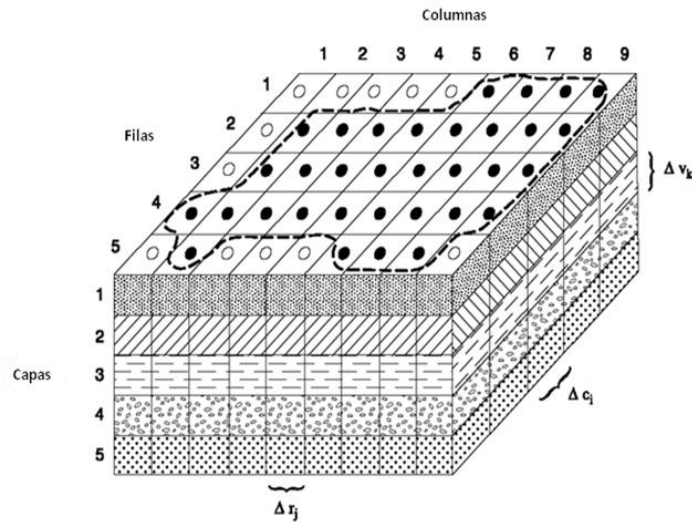


Fig. 52. Esquema y terminología del modelo matemático.

$$\begin{aligned}
 & CR_{i,j-\frac{1}{2},k} (h_{i,j-1,k}^m - h_{i,j,k}^m) + CR_{i,j+\frac{1}{2},k} (h_{i,j+1,k}^m - h_{i,j,k}^m) + \\
 & CC_{i-\frac{1}{2},j,k} (h_{i-1,j,k}^m - h_{i,j,k}^m) + CR_{i+\frac{1}{2},j,k} (h_{i+1,j,k}^m - h_{i,j,k}^m) + \\
 & CV_{i,j,k-\frac{1}{2}} (h_{i,j,k-a}^m - h_{i,j,k}^m) + CV_{i,j,k+\frac{1}{2}} (h_{i,j,k+1}^m - h_{i,j,k}^m) + \\
 & P_{i,j,k} h_{i,j,k}^m + Q_{i,j,k} = SS_{i,j,k} (\Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k) \frac{h_{i,j,k}^m - h_{i,j,k}^{m-1}}{t^m - t^{m-1}}
 \end{aligned}$$

Donde

- $h_{i,j,k}^m$ es la pérdida de carga hidráulica en la celda i,j,k al paso del tiempo m
- CV, CR, CC son la conductancia hidráulica, entre un nodo i,j,k y el vecino
- $P_{i,j,k}$ es la suma de los coeficientes de la pérdida de carga de las fuentes y de las descargas
- $Q_{i,j,k}$ es la suma de las constantes de los términos de las fuentes y las descargas
- Si $Q_{i,j,k} < 0$ se trata de una salida de flujo (como un pozo de bombeo)
- Si $Q_{i,j,k} > 0$ se trata de una entrada de flujo (como un pozo de inyección)
- $SS_{i,j,k}$ es el coeficiente de almacenamiento específico
- $\Delta_j \Delta_i \Delta_{i,j,k}$ son las dimensiones de la celda i,j,k , que al multiplicarse, representa el volumen
- t^m tiempo de paso para un tiempo m



Esta ecuación se resuelve mediante un sistema de ecuaciones:

$$CV_{i,j,k-\frac{1}{2}} h_{i,j,k-1}^m + CC_{i-\frac{1}{2},j,k} h_{i-1,j,k}^m + CR_{i,j-\frac{1}{2},k} h_{i,j-1,k}^m + \left(CV_{i,j,k-\frac{1}{2}} - CC_{i-\frac{1}{2},j,k} - CR_{i,j-\frac{1}{2},k} - CR_{i,j+\frac{1}{2},k} - CC_{i+\frac{1}{2},j,k} - CV_{i,j,k+\frac{1}{2}} + HCOF_{i,j,k} \right) h_{i,j,k}^m + CR_{i,j+\frac{1}{2},k} h_{i,j+1,k}^m + CC_{i+\frac{1}{2},j,k} h_{i+1,j,k}^m + CV_{i,j,k+\frac{1}{2}} h_{i,j,k+1}^m = RHS_{i,j,k}$$

Donde

$$- HCOF_{i,j,k} = P_{i,j,k} - \frac{SS_{i,j,k} \Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k}{t^m - t^{m-1}}$$

$$- RHS_{i,j,k} = -Q_{i,j,k} - SS_{i,j,k} \Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k \frac{h_{i,j,k}^{m-1}}{t^m - t^{m-1}}$$

O en forma de matriz como:

$$Ah = q$$

Donde

- A es la matriz de los coeficientes piezométricos para todos los nodos activos en la red
- h es el vector de los valores de piezometría al final de un paso de tiempo m para todos los nodos de la red
- q es un vector constantes, RHS, para todos los nodos de la red.

Existiendo las siguientes limitaciones:

1. El agua debe tener una densidad y viscosidad dinámica constante, y en consecuencia la temperatura, a través de todo el dominio del modelo.
2. Los principales componentes de la anisotropía y la conductividad hidráulica usada en el MODFLOW sólo permiten tener en cuenta anisotropías ortogonales.

4.1.1.2 Definición: el acuífero como sistema

Un acuífero es un elemento de un sistema de recursos hidráulicos más complejo, que tiene sus leyes particulares de funcionamiento.

Un sistema comprende un conjunto de componentes físicos y geométricos, unas acciones exteriores al sistema y unas leyes de funcionamiento.

Matemáticamente, se puede definir en cada momento el sistema por una serie de parámetros y de variables. Los parámetros pueden describir los componentes geométricos, como forma, límites, etc., o sus componentes físicos, como transmisividad, coeficiente de almacenamiento, etc. Las variables, que se suelen llamar variables de estado, describen la situación del sistema en cada momento.

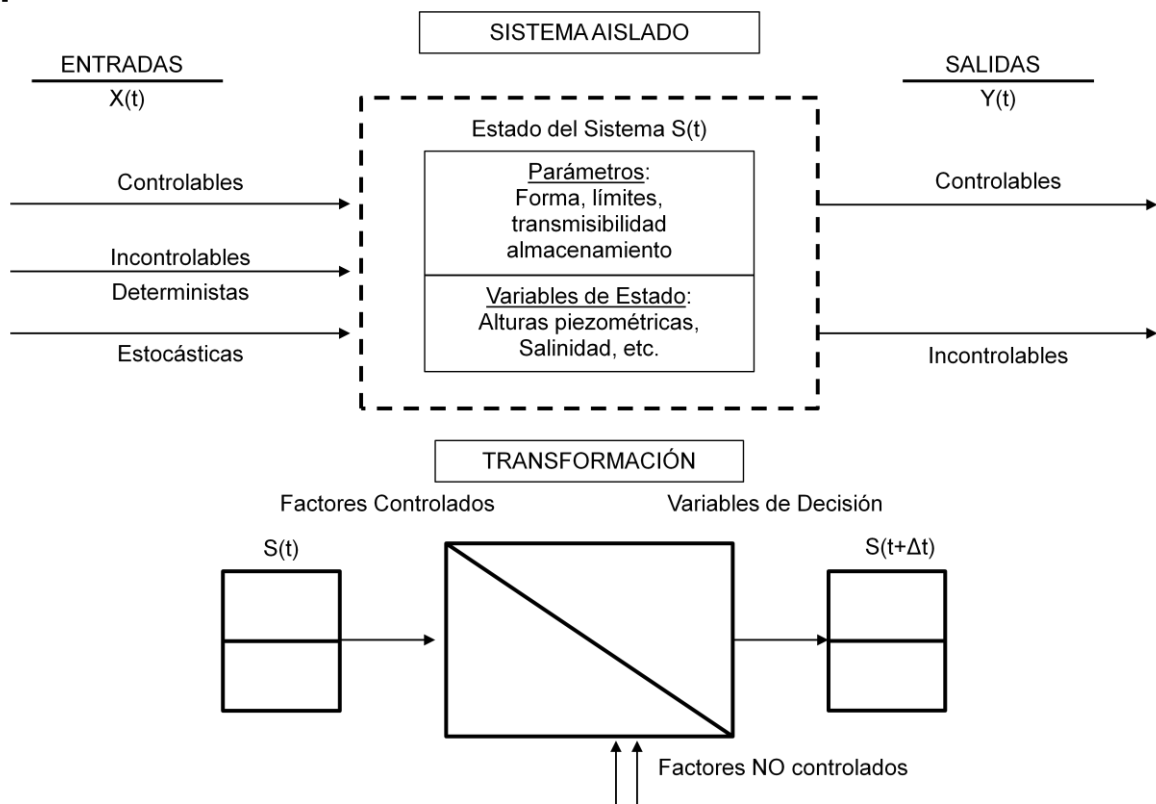


Cuando se ha dividido el sistema para su análisis en elementos discretos, los parámetros y variables se pueden expresar en forma de vectores de “n” dimensiones (siendo n las tres dimensiones del espacio).

Las acciones exteriores al sistema son las que actúan sobre él y lo modifican, ya sean naturales o artificiales (antrópicas). Existen dos tipos de relaciones de entradas o de salidas: las entradas en el sistema de Torozos se producen mediante las precipitación y los retornos de riego; mientras que las salidas son la ETR, el drenaje perimetral (manantiales), drenaje difuso por efecto goteo y las captaciones subterráneas.

Al igual que los modelos, las relaciones exteriores pueden agruparse por categorías según su naturaleza, de forma genérica pueden agruparse en acciones controlables e incontrolables. Las primeras son las que se utilizan para conseguir un objetivo, y se suelen llamar variables de decisión, como por ejemplo bombeos. Las segundas pueden ser deterministas y estocásticas: las deterministas dependen del estado del sistema, por ejemplo, drenaje de un manantial; y las estocásticas dependen de factores hidrológicos y climatológicos, como la recarga natural, y pueden tratarse estadísticamente.

El sistema considerado también está sujeto a una serie de restricciones: físicas, impuestas artificialmente, o debidas a criterios de planificación. En la Fig. 53 se puede observar cómo funciona el sistema y se relaciona con los distintos tipos de variables [33, Custodio & Llamas 2001].



ig. 53. Diagrama de un sistema hidrogeológico.



Con todos estos elementos, variables de estado, restricciones y acciones incontrolables, se tiene que operar sobre las variables de decisión para conseguir el objetivo aproximar el modelo a la realidad. Si el objetivo se puede expresar en forma matemática, su valor óptimo será el que maximice o minimice esa función.

Para simular el sistema, se tiene que partir de sus componentes físicos y geométricos, y de un estado inicial. Al sistema se le aplicará una serie de acciones, de las que se quieren conocer sus consecuencias, y se obtienen como resultado las situaciones que alcanzaría el sistema en periodos sucesivos de tiempo.

Una vez que se ha conseguido reproducir el comportamiento del acuífero, se está en situación de hacer inferencias sobre su comportamiento futuro. Se tendrá más confianza en su representatividad cuanto más largo haya sido el periodo histórico aplicado y menor sea la diferencia entre las perturbaciones que haya sufrido el acuífero en el pasado y las que se obtiene en la simulación del futuro.

De cualquier forma siempre se obtiene una idea de su funcionamiento y comportamiento general, que sería imposible conseguir si no se hace la simulación. Además, ésta dará también idea de cuáles son los parámetros y las acciones que tienen más influencia en el comportamiento del sistema.

4.1.2 Estructura y datos del modelo

Una vez escogida la formulación del modelo y definida la herramienta para su construcción, ha sido necesario dotarlo de una estructura robusta. En la que se ha tenido que llegar a una solución de compromiso entre la funcionalidad y la exactitud. Este equilibrio, puede ser alterado en el futuro con la introducción en el modelo de nuevos datos o nuevas variables.

Las representaciones visuales, como diagramas o esquemas simplificados de la estructura del sistema, permiten observar de manera clara relaciones entre los componentes del sistema y deben de ser ampliamente usados durante el proceso del modelado, lo que se conoce como conceptual gráfico [98, McDonald & Harbaugh 1984]. El esquema que representa el funcionamiento del sistema dentro de Modflow se muestra en el siguiente diagrama (Fig. 54).

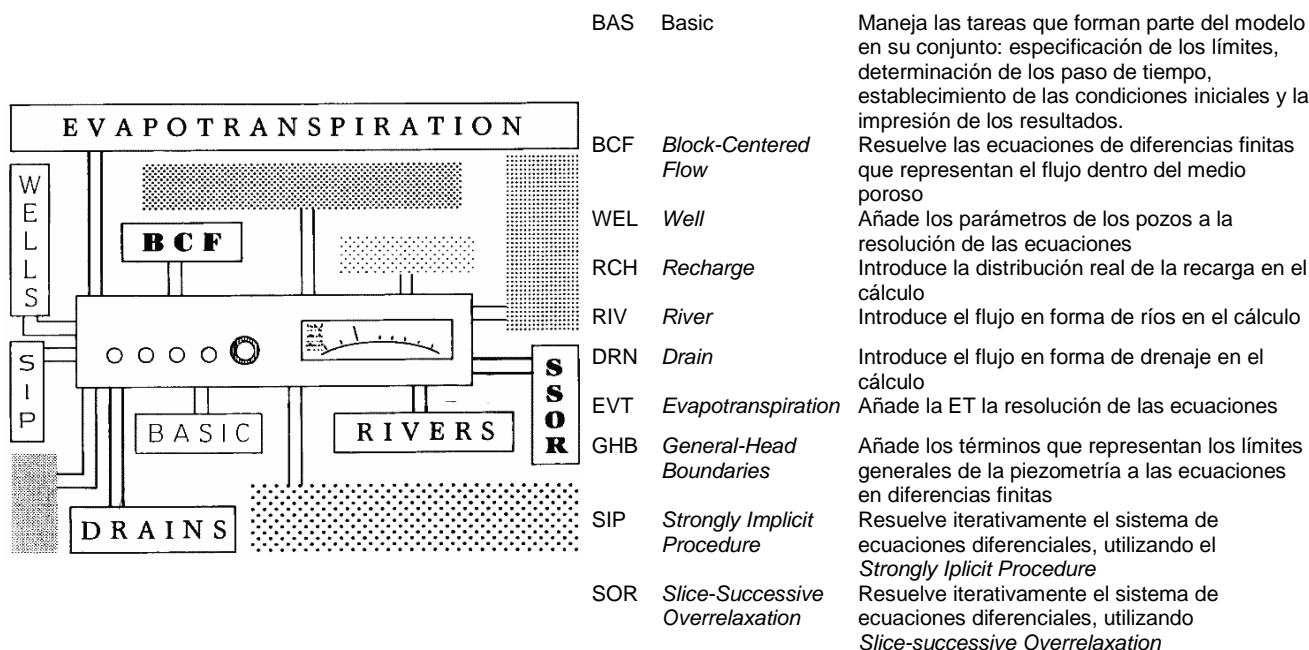


Fig. 54. Esquema resumen de la relación de los parámetros y las ecuaciones de Visual Modflow.

Como el modelo depende del objetivo para el que ha sido creado, su función es representar el comportamiento ideal del sistema para poder establecer un patrón comparativo ante diferentes situaciones específicas y, por tanto, permitir no sólo describir al dinámica subterránea, sino que también permite descubrir o demostrar la existencia de nuevas hipótesis que permitan una aproximación más cercana a la realidad y la predicción de nuevos escenarios.

4.1.2.1 Datos precisos

1. Para el conocimiento de la geometría del sistema.
 - 1.1. Cota de base y de techo de cada una de las formaciones consideradas.
 - 1.2. Límites de cada una de las formaciones. Obtenidas de igual forma.
 - 1.3. Límites del sistema (límites físicos o hidráulicos).
2. Para el conocimiento de las características hidráulicas.
 - 2.1. Distribución espacial de la permeabilidad en cada una de las formaciones.
 - 2.2. Grado de anisotropía del sistema. Suele estimarse de forma teórica.
 - 2.3. Distribución espacial de la porosidad eficaz.
 - 2.4. Distribución espacial del coeficiente de almacenamiento.
 - 2.5. Factor goteo y resistencia hidráulica.
 - 2.6. Distribución de la permeabilidad y la capacidad de infiltración.
3. Funcionamiento hidráulico.
 - 3.1. Identificación áreas de recarga y descarga.
 - 3.2. Establecer relaciones entre acuíferos.
 - 3.3. Tipos de condiciones de los límites.
4. Acciones sobre el acuífero durante el periodo de ajuste.
 - 4.1. Distribución espacial y temporal de la infiltración de lluvia.
 - 4.2. Distribución espacio-temporal de la evaporación y evapotranspiración.
 - 4.3. Infiltración de retornos de riego.



- 4.4. Distribución longitudinal y temporal de la recarga o descarga de cursos de agua superficiales.
- 4.5. Distribución espacio-temporal de la recarga o descarga de masas de agua superficiales.
- 4.6. Descargas o recargas a partir de puntos de agua.
- 4.7. Descarga o recarga de acuíferos superpuestos o colindantes.
5. Variaciones del potencial hidráulico.
 - 5.1. Superficies piezométricas de cada acuífero.

4.1.2.2 Obtención de los datos

Antes de realizar un modelo es fundamental hacer un inventario de los datos necesarios en función del modelo conceptual y sus objetivos. Este inventario requiere una fase de documentación y búsqueda bibliográfica, una segunda fase de obtención de información sobre el terreno, y por último una fase de elaboración tratamiento y síntesis de los datos.

El modelo precisa que todos los datos se completen hasta conseguir un grado de conocimiento suficiente y adecuado. Además de la obtención de los datos, es importante obtener series históricas suficientemente largas para que los efectos de las acciones puedan ser comprobados.

El mapa inicial de superficies piezométricas es la base a reproducir en la simulación en estado estacionario. Si su fiabilidad es alta, y como la geometría es conocida, la interpolación y asignación del resto de parámetros hidrodinámicos y la distribución superficial de la recarga serán más precisas.

La geometría debe describirse mediante mapas de curvas de profundidades de muros y techos de cada capa del acuífero. Como paso intermedio son útiles los cortes, secciones o diagramas bloque, para comprender mejor el sistema, y poder prever el comportamiento del acuífero.

Las principales acciones externas son: la recarga, por lluvia y retornos de riego; las extracciones por bombeo; la evapotranspiración y el drenaje. Los valores de la recarga se obtienen a través de la precipitación, la tasa de infiltración y de retornos de agua de riego, y la tasa de evapotranspiración. El valor de las extracciones se ha obtenido los registros administrativos de la Confederación Hidrográfica del Duero, y mediante inspección del área y entrevistas cuidadosas.

4.1.3 Dominio

El dominio de este modelo coincide con el área del marco geográfico definido para todo el estudio, es decir el páramo calcáreo de los Montes Torozos.

4.1.4 El modelo en Visual Modflow 2012

El punto de partida del modelo para el modelado y simulación es el modelo conceptual, a partir de él se definirá el mallado, las condiciones de contorno y los parámetros hidrogeológicos necesarios necesarios para alcanzar los objetivos planteados.



4.1.4.1 Modelo conceptual

Para la realización del modelo es necesario tratar de una forma idealizada a la región de interés. La idealización parte de la idea de que “lo imperceptible puede ser ignorado”, así este proceso consistiría en una “aproximación a la verdad”. El modelo más sencillo de nuestra masa de agua puede responder a este esquema tipo (Fig. 55):

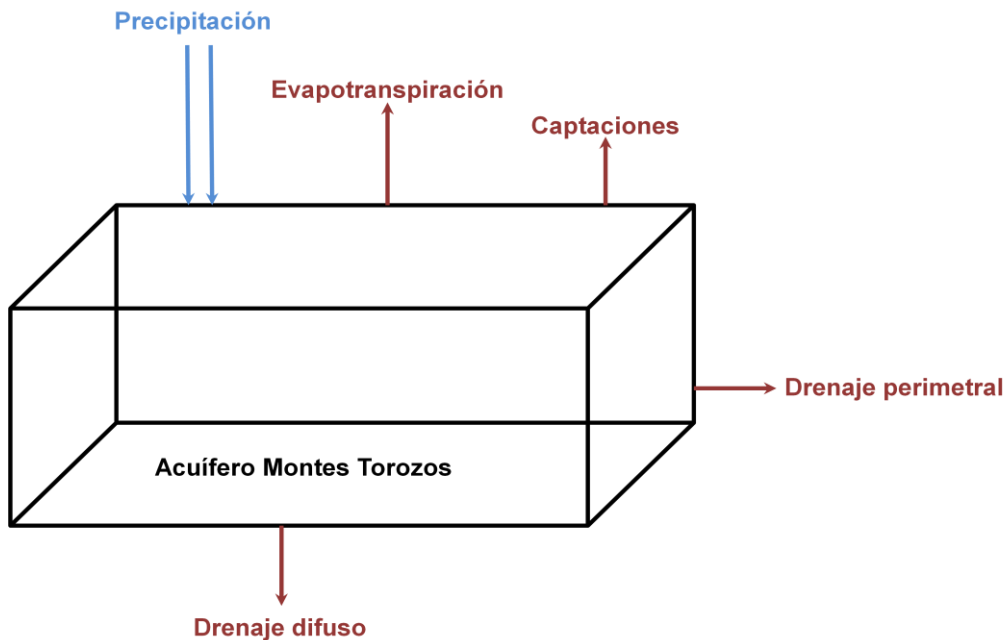


Fig. 55. Modelo conceptual del acuífero de los Montes Torozos.

La falta de datos puede invalidar el modelo, por este motivo es recomendable intentar obtener los datos mediante otros medios como: testigos de pozos construidos, perfiles de pozos con rayos gamma, interpretación de sondeos eléctricos verticales, análisis geoestadísticos (interpolaciones, sub-modelos, correlaciones espaciales, box-plot,...), etc. La calidad de la selección de datos influirá directamente en las dificultades que se presenten en el proceso de simulación.

En lo referente a la red de monitorización de niveles hidráulicos habrá sido definida con este propósito. Los pozos seleccionados deben reproducir fielmente el comportamiento real que se pretende simular. Una serie completa de medidas tiene que haberse efectuado en un breve lapso de tiempo para que responda a una “fotografía” representativa de la situación para ese momento dado.

Al discretizar el dominio (área de estudio) debe tener en cuenta cada “accidente” que pueda afectar a la continuidad del sistema representado: ríos efluentes e influentes, canales de drenaje, límites rocosos, etc. Estos límites pasarán a definir las condiciones de borde del sistema.

Así, considerando la masa subterránea de Torozos como un ente aislado, de forma genérica se han asignado unos valores más generales a los parámetros y unas variables al modelo, y se han simulado el balance medio de la serie temporal (1956-2006), obteniendo valores semejantes a los bibliográficos: temperatura media de 11,4 °C; una precipitación anual media de 456,38 mm; y una ETR de 312,60 mm [116, Ramírez & Reguera 1995].



Si el resultado no fuera el esperado, habría que modificar el modelo conceptual. Para ello, conviene reconsiderar el problema, para ver si alguna de las hipótesis puede ser modificada razonablemente de acuerdo con los datos hidrogeológicos disponibles. Si los resultados son coherentes se pasa a la siguiente etapa, que es la de comparar los resultados con los datos históricos. Si no se ha conseguido una aproximación adecuada, se precede a la modificación de los parámetros, hasta que se consiga un ajuste suficiente.

De acuerdo con esta metodología, se ha establecido un balance hídrico histórico entre la precipitación y la evapotranspiración media anual calculada (Tabla 41). Este balance se ha comparado con la información aportada por los habitantes del páramo que recordaban situaciones climáticas extremas como inundaciones o grandes sequías.

Se han identificado dos periodos de abundantes precipitaciones: uno en 2000-2001; y otro en 1996-1997; en ambos casos se tiene constancia que algunas zonas de la superficie el páramo llegaron a mantener una lámina de agua superficial en donde existían pequeñas depresiones, asociadas a dolinas (Tabla 41).

Datos medios anuales en mm											
Año	P	ETR	Año	P	ETR	Año	P	ETR	Año	P	ETR
1960	724,4	280,1	1972	474,4	251,7	1984	550,0	261,9	1996	496,3	286,6
1961	696,6	306,2	1973	348,7	258,4	1985	362,9	284,8	1997	714,5	311,5
1962	426,8	287,2	1974	432,0	255,0	1986	368,2	276,8	1998	360,8	294,7
1963	716,8	270,3	1975	415,9	265,3	1987	453,2	293,5	1999	391,1	281,7
1964	352,6	286,2	1976	571,8	276,2	1988	477,8	282,0	2000	541,3	285,6
1965	396,3	281,7	1977	572,4	280,2	1989	534,1	312,2	2001	422,0	290,6
1966	582,6	285,4	1978	545,4	276,0	1990	309,4	300,6	2002	449,3	299,1
1967	403,5	276,6	1979	670,2	282,6	1991	255,3	281,7	2003	566,2	304,6
1968	391,7	286,8	1980	409,0	276,4	1992	324,4	285,2	2004	290,7	286,8
1969	475,3	261,0	1981	404,6	293,9	1993	411,5	267,1	2005	332,0	289,2
1970	459,0	278,0	1982	417,2	290,8	1994	365,0	298,0	2006	473,0	251,7
1971	499,4	255,3	1983	450,6	287,2	1995	421,5	310,8			

Tabla 41. Precipitación y ETR anuales totales de la serie climática.

Se puede observar que respecto a la ETP no existen variaciones significativas, sin embargo las diferencias en las precipitaciones son notables, por lo que se podrían justificar la presencia de dichas "inundaciones" y por tanto corroborar esta primera aproximación del modelo.

El siguiente paso es poder definir el movimiento del agua dentro del acuífero con los datos disponible, dentro de los límites del sistema. En el caso del páramo son fáciles de definir, ya que son constantes en el espacio, por ser un acuífero colgado.



De esta forma, la construcción del Modelo en régimen transitorio de la masa de los Montes Torozos se ha basado en dos modelos previos, uno en régimen estacionario con un *pixel* de 1 km de lado [127, Sanz 2010] (Fig. 60); y otro considerando un espesor homogéneo sin basculamiento ni acuñamiento.

4.1.4.2 Modelo informático

Una vez definido el modelo conceptual y aceptado, la siguiente etapa es crear el modelo numérico en el software elegido. El proceso de construcción del modelo en Visual Modflow 2012 comienza con la modelización geométrica del acuífero, el establecimiento de sus límites y la discretización mediante el mallado del sistema.

Para la modelización geométrica del acuífero se ha partido de una discretización cartográfica de la unidad geológica que lo comprende, empleando técnicas de fotointerpretación, apoyado por un reconocimiento de campo de las litologías permeables y sus contactos impermeables. Se han empleado dos series de ortofotografías, correspondientes a vuelos efectuados en 2002 y 2011, conforme al análisis multitemporal de cambios de uso.

El modelo se ha realizado con la herramienta de cálculo y visualización Visual Modflow 2012 [132, Schlumberger Water Services. 2012], se trata de una herramienta informática desarrollada por Schlumberger, desarrollada a partir de los trabajos del *United States Geological Survey*, la que permite simular el flujo del agua subterránea, en las condiciones especificadas. Este programa modeliza el flujo de aguas subterráneas en medios porosos saturados, en régimen estacionario y/o transitorio, en este último caso es necesario definir los distintos pasos de tiempo en los que se produzcan variaciones en el sistema, en área discretizadas por una malla tridimensional.

El área de estudio se ha definido a partir de los límites físicos del sistema, con los que se han asignado los valores de los parámetros hidrogeológicos (transmisividad, coeficiente de almacenamiento, porosidad, etc.).

Visual Modflow precisa además que se le suministre la morfología de las capas que forman el modelo, con el objetivo de definir la geometría de cada una de ellas, es decir, los límites superior e inferior que las delimitan. En nuestro caso, el límite superior de la capa se corresponde con la topografía del terreno, mientras que el límite inferior lo constituye el fondo del acuífero, formado por las margas del Mioceno.

Los resultados ofrecidos por Modflow son los valores de la piezometría en todas y cada una de las celdas del modelo, para cada uno de los pasos de tiempo. Las salidas pueden obtenerse de forma alfanumérica y/o gráfica (dibujo de isopiezas e isodescensos, evolución temporal de la piezometría en puntos señalados del modelo, balances en forma de gráficos, etc.). Estos resultados pueden exportarse a diversas aplicaciones para su dibujo e interpretación posterior.



4.1.4.2.1 El mallado

Antes de crear el modelo con este software, se debe crear una carpeta, ya que de lo contrario en la ubicación elegida el programa generará múltiples archivos, con los que posteriormente será muy difícil trabajar.

Al crear un nuevo modelo se debe tener cuidado en seleccionar adecuadamente las unidades de trabajo, ya que cambiar posteriormente puede resultar bastante costoso (como por ejemplo las unidades de las magnitudes, o el tipo de flujo), u obligar a hacer cambios de unidades, con los problemas asociados que ello conlleva (errores con los ceros, pérdida de exactitud, etc.). Las unidades de los parámetros y variables, el tipo de régimen y el tipo de flujo introducidos se muestran en la Fig. 57.

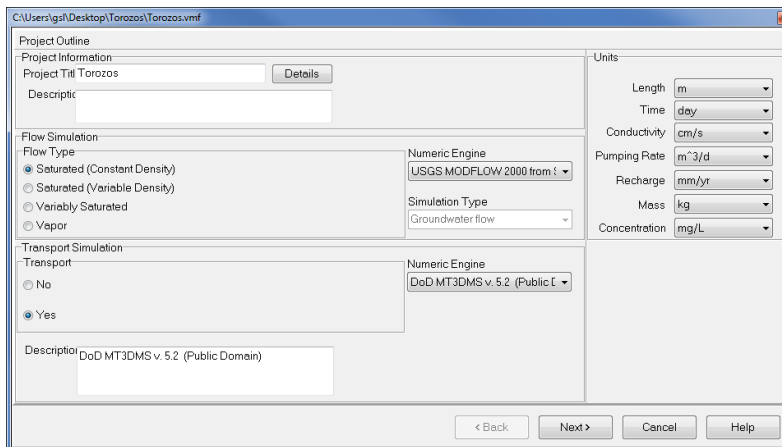


Fig. 57. Cuadro de magnitudes del modelo.

Posteriormente se ha asignado los valores iniciales generalizados de los parámetros hidráulicos de la zona de estudio (Fig. 58).

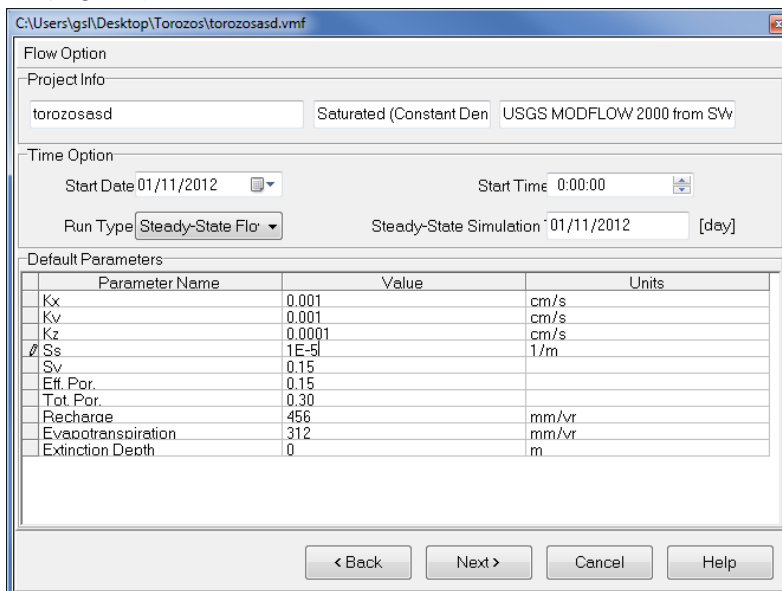


Fig. 58. Cuadro de valores iniciales de los parámetros hidráulicos.

En el tercer paso se introducen las dimensiones físicas del modelo, así como el número de celdas y capas. En este caso los valores introducidos son de poca importancia, porque salvo las



coordenadas iniciales el resto de valores pueden ser fácilmente modificados durante el proceso de modelado (Fig. 59).

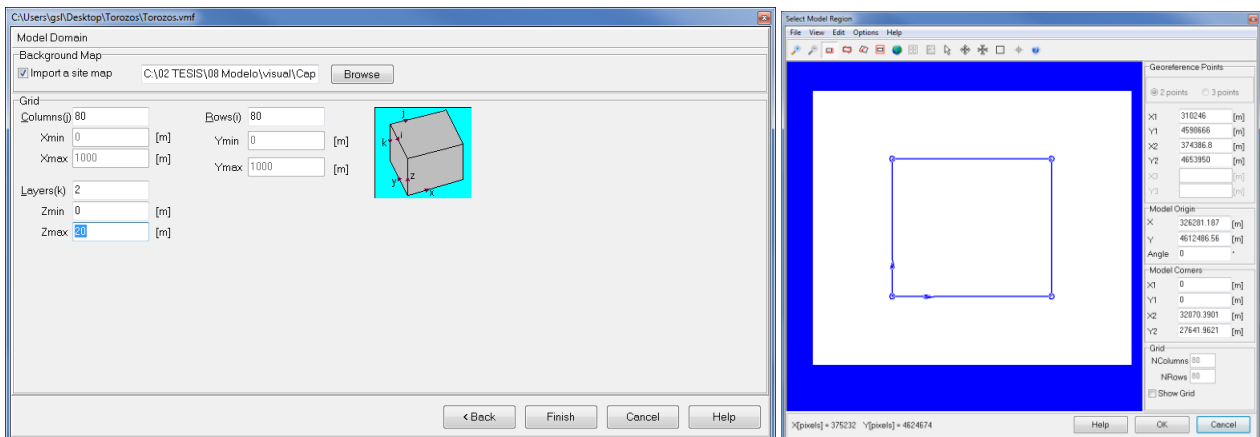


Fig. 59. Ventanas para establecer la discretización del sistema.

4.1.4.2.2 Los límites del sistema

Los límites de la masa de agua subterránea son límites físicos. El límite inferior está determinado por el contacto geológico muro-techo entre las calizas y las margas. Por su parte los límites laterales, por tratarse de un acuífero colgado, se han dejado abiertos para la salida mediante una línea de piezometría constante situada a la cota del contacto caliza-marga (Fig. 60).

A pesar que se conoce la anisotropía del medio, debido a la falta de datos que permitan su modelación se ha optado por simular el paquete de calizas como una única capa.

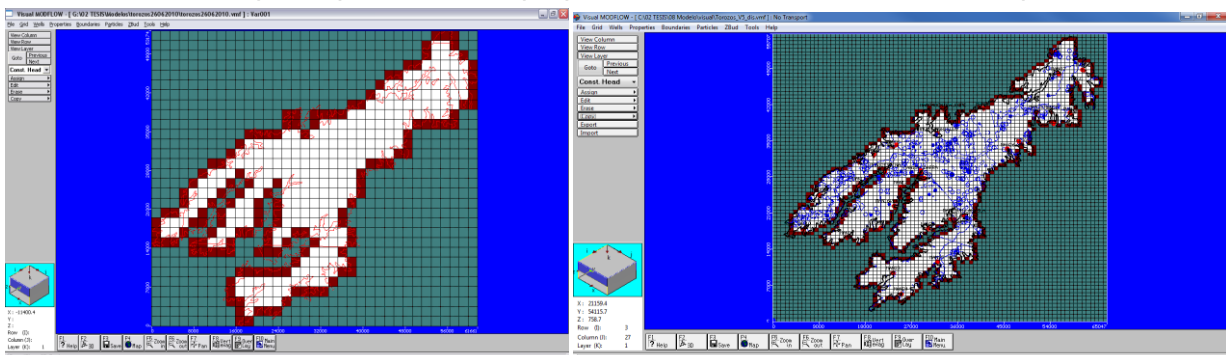


Fig. 60. Imagen comparativa de las condiciones de contorno del primer modelo y del modelo definitivo.

4.1.4.2.3 Asignación de parámetros

El modelo hidrogeológico parte de una imagen abstracta del acuífero, y se construye según conocimientos previos de que se dispone sobre él. Su perfeccionamiento se produce mediante un ciclo iterativo de mejora continuada (observación, representación, comprobación) (Fig.6).

Concluida la fase de asignación de parámetros básicos, comienza la fase de introducción de datos al modelo. Los datos iniciales que requiere el modelo son:

1. un mapa digital de elevaciones (MDET), que sustituya al techo plano introducido en origen. El MDET se ha cargado como un fichero de puntos en formato ASCII exportado a partir del



MDET de 5 m del SIG. A partir de los puntos Visual Modflow es capaz de interpolar la superficie de modelado (Fig. 61).

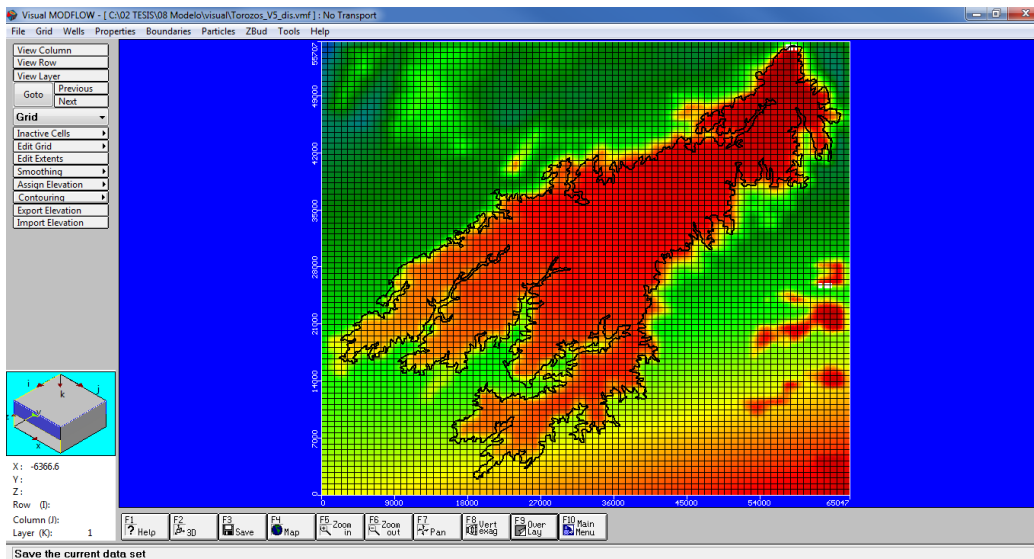


Fig. 61. MDET introducido en el modelo para simular la superficie del páramo.

2. un mapa digital de elevaciones, que reproduzca la base del acuífero. Obtenido mediante el mismo procedimiento que el anterior. (Fig.62).

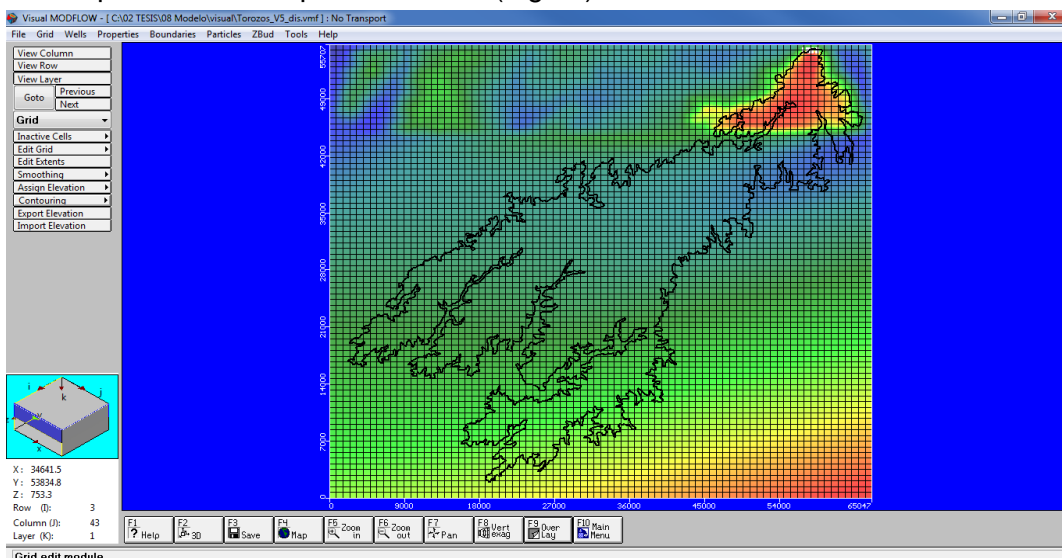


Fig. 62. Mapa del muro de las calizas interpolado por Visual Modflow.

Pero en este caso se puede apreciar que al interpolar se ha generado un artefacto en la parte norte del acuífero, por lo que se ha tenido que corregir de un mapa digital de elevaciones, modificando las celdas activas manualmente (Fig.63).

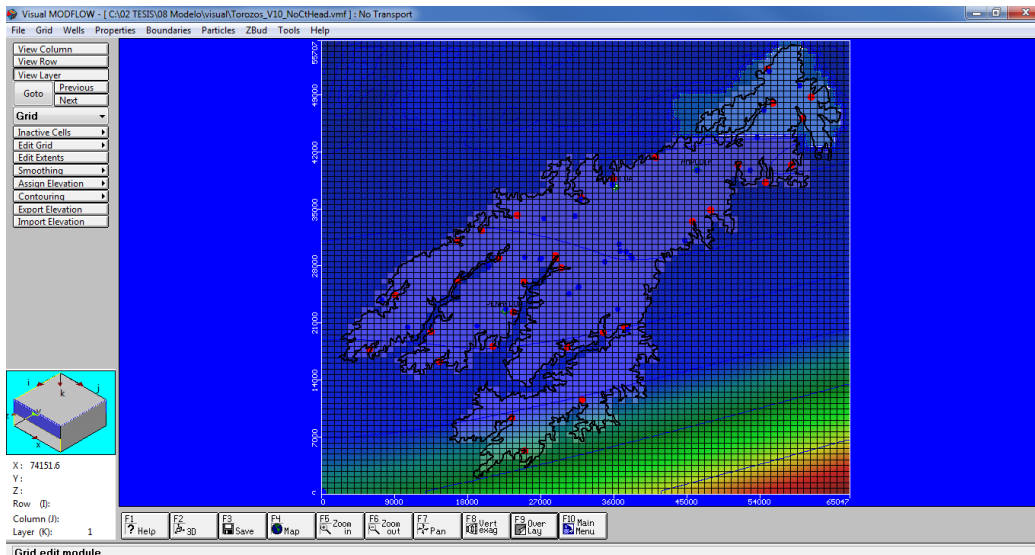


Fig. 63. Mapa del muro de las calizas corregido.

3. El siguiente parámetro que se debe introducir es la piezometría. El procedimiento es el mismo que en los casos anteriores pero partiendo de los datos obtenidos del modelo interpolado con SpaceStat. El resultado se muestra en la Fig. 64.

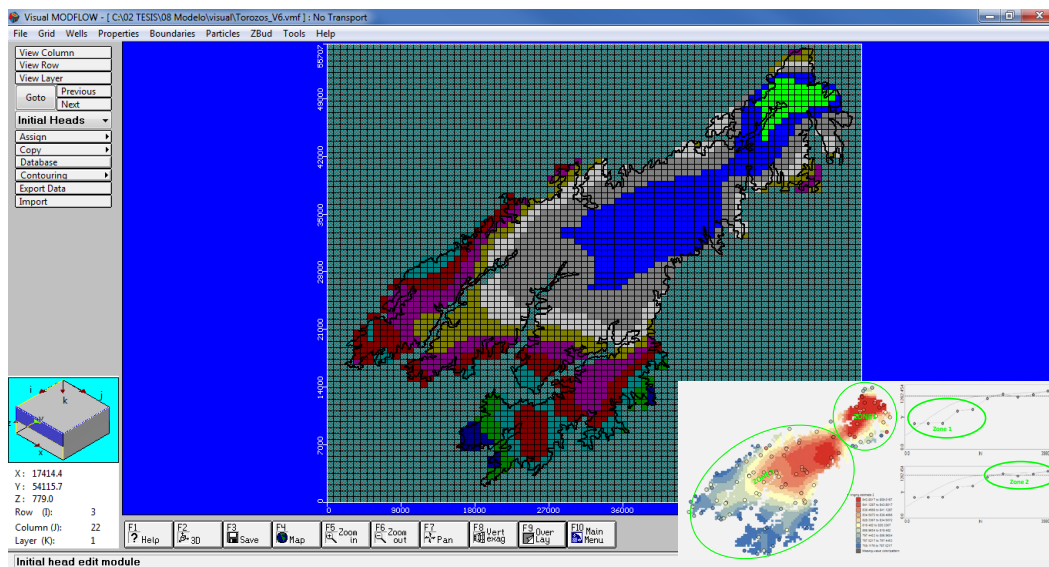


Fig. 64. Imagen de la piezometría asignada a partir de los resultados de SapceStat.

Una vez introducida la piezometría se ajuntan la permeabilidad y el coeficiente de almacenamiento en función de los valores obtenidos a partir de los cálculos hidráulicos (Fig.65).

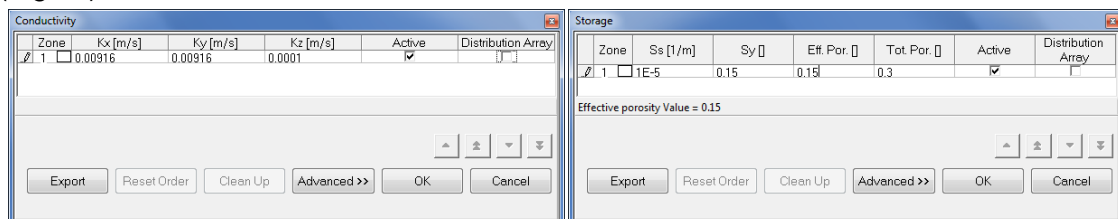


Fig. 65. Imágenes de los menús para la modificación de la conductividad y el almacenamiento.



- Tras haber fijado la imagen inicial de partida, se comienza a introducir las acciones que actúan sobre el sistema. La primera acción introducida es el drenaje perimetral a través de los principales manantiales. Se han simulado los 32 más significativos (para el modelador), agrupando en ellos todo el resto de las fuentes no simuladas Fig. 66. La forma más rápida y eficaz de simular este tipo de drenaje es asemejándolos a pozos de bombeo, ya que se comportan como extracciones puntuales.

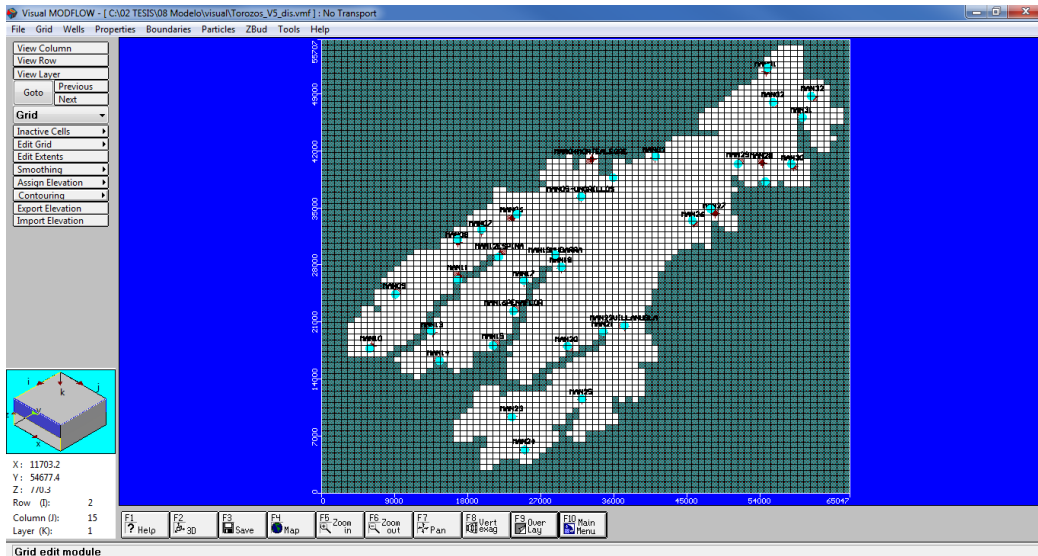


Fig. 66. Imagen con la localización de los manantiales incorporados al modelo.

Para la introducción al modelo de los pozos de bombeo (y en este caso también de los manantiales), el programa informático cuenta con un menú (Fig. 67) en el que se introduce: el nombre, las coordenadas, el nivel freático, la profundidad del pozo, y la distribución en el calendario de las extracciones en función de los intervalos de tiempo especificados, se ha utilizado una distribución mensual establecida a través del número por número de días.

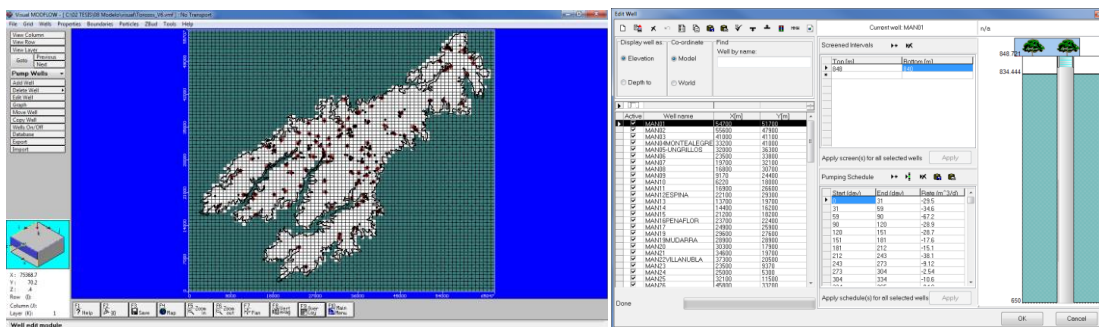


Fig. 67. Distribución espacial de los pozos y los parámetros introducidos en el modelo.

- Finalmente, se modificaron las condiciones de recarga y evapotranspiración, para que se ajusten a la distribución anual introducida en los pozos y manantiales (Fig. 68)

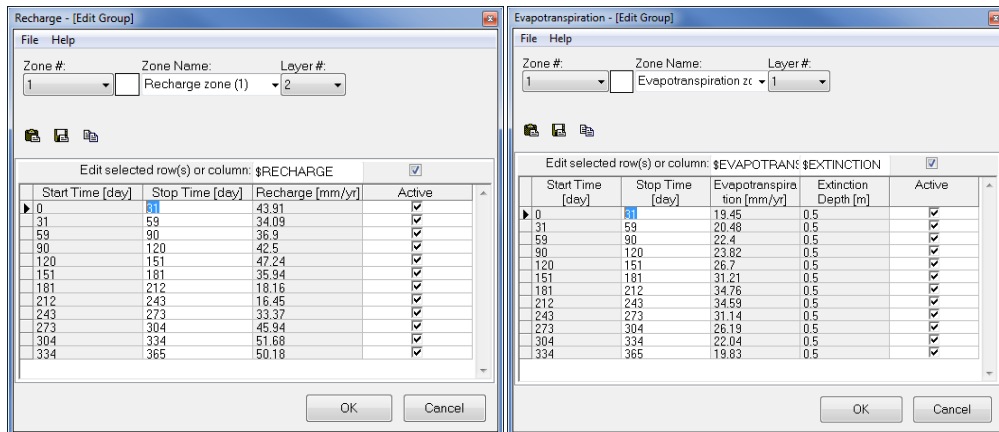


Fig. 68. Imagen con las ventanas que modifican las condiciones de recarga y ETR.

Visual Modflow permite visualizar en la pantalla la situación real de los pozos, ríos, contactos geológicos, etc., existentes dentro del modelo, con la finalidad de poder definir y localizar con mayor precisión los elementos del modelo (Fig. 69).

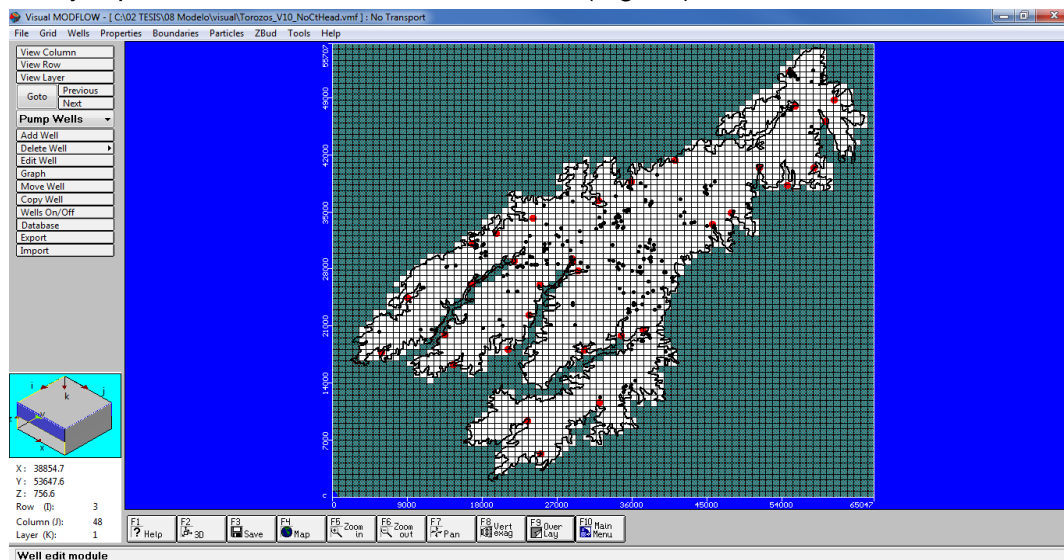


Fig. 69. Imagen del modelo con los manantiales, los pozos y el perímetro importados.

4.1.4.3 Resultados y discusión

Una vez introducidos todos los datos y ajustado el sistema se ha ejecutado el modelo. Para correr el modelo se deben escoger los módulos de Visual Modflow de los que se desean obtener resultados, en este caso se han utilizado "Modflow 2000", "ZoneBudget" y "ModPath".

El resultado en régimen estacionario ha sido la piezometría de partida; y en régimen transitorio su evolución a lo largo del año hidrológico. Las salidas ofrecidas por Visual Modflow son representaciones visuales en planta o en corte de los niveles piezométricos. El programa calcula un único valor de la piezometría para cada celda del modelo. El modelo establece un balance hídrico y dibuja los vectores del flujo subterráneo.

En lo referente a la piezometría inicial, como ésta se ajustó respondiendo al modelo geostadístico (más preciso, por disponer de un control más exhaustivo de las variables) creado a su efecto, no



se puede considerar una salida propia del modelo hidrogeológico. Respecto a la evolución de los niveles piezométricos, el modelo ha calculado su valor a lo largo de cada uno de los pasos de tiempo. En este caso ofrece un nivel piezométrico diario, en forma de isopiezas. Uno de los niveles calculados se representa en la Fig. 70, estos resultados también puede ser exportables a fichero tipo *.asc e integrados en una herramienta SIG (Fig. 71).

En la Fig. 70, la piezometría está representa mediante isopiezas de color azul y por una escala de colores, donde el rojo es el valor más alto y el verde el más bajo. El modelo también ofrece como salida gráfica los vectores direccionales de flujo, que se representan como flechas de color verde cuyo tamaño es proporcional a su magnitud. Por último, el modelo que se ha construido permite la simulación del desplazamiento de partículas, el avance está representado por flechas de color marrón, una por cada paso de tiempo estudiado. De esta forma se puede estudiar la dirección y trayectoria teórica de la dispersión de contaminantes.

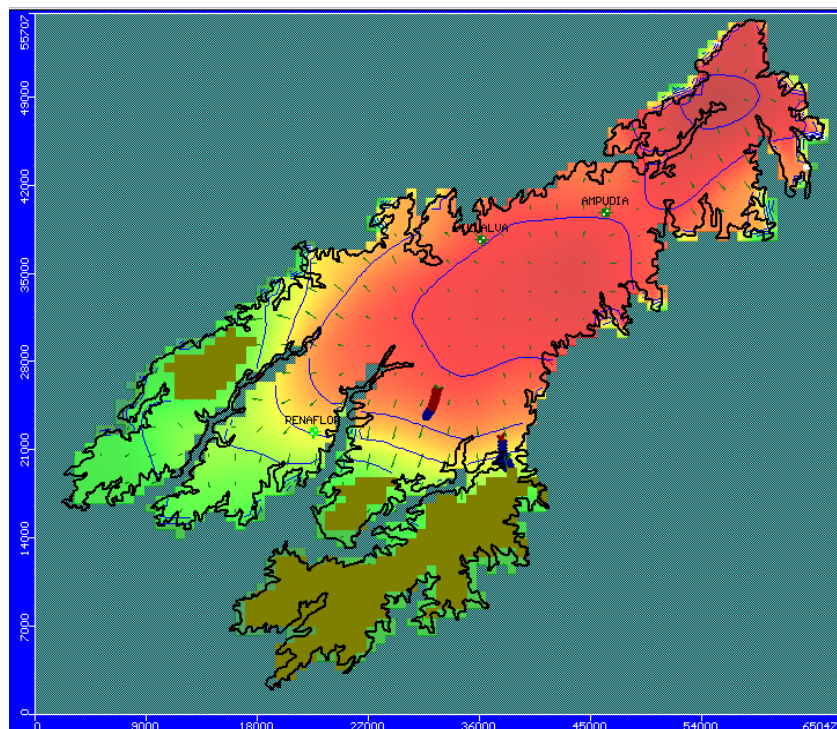


Fig. 70. Venta de salida gráfica del modelo. En verde "oliva" las celdas sin agua, o secas del modelo.

A partir de esta imagen (Fig. 70) se puede comprobar que el modelo responde bien a las acciones externas al sistema, ya que en esa zona presenta escasa conectividad hidráulica y se ha simulado un campo de pozos con una captación de 95.000 m³/año. Volumen no muy elevado, pero al extraerse en una zona donde el nivel freático está más deprimido que la media del páramo, el resultado obtenido es la delimitación de esa área como seca.

Otra resultado obtenido es que las zonas que el modelo muestra como secas históricamente han sido consideradas por la población local de bajo interés desde el punto de vista de los recursos hidrogeológicos, ya que existe una notable menor densidad de pozos en comparación con el resto de la masa de agua, como se puede apreciar en la Fig. 71.

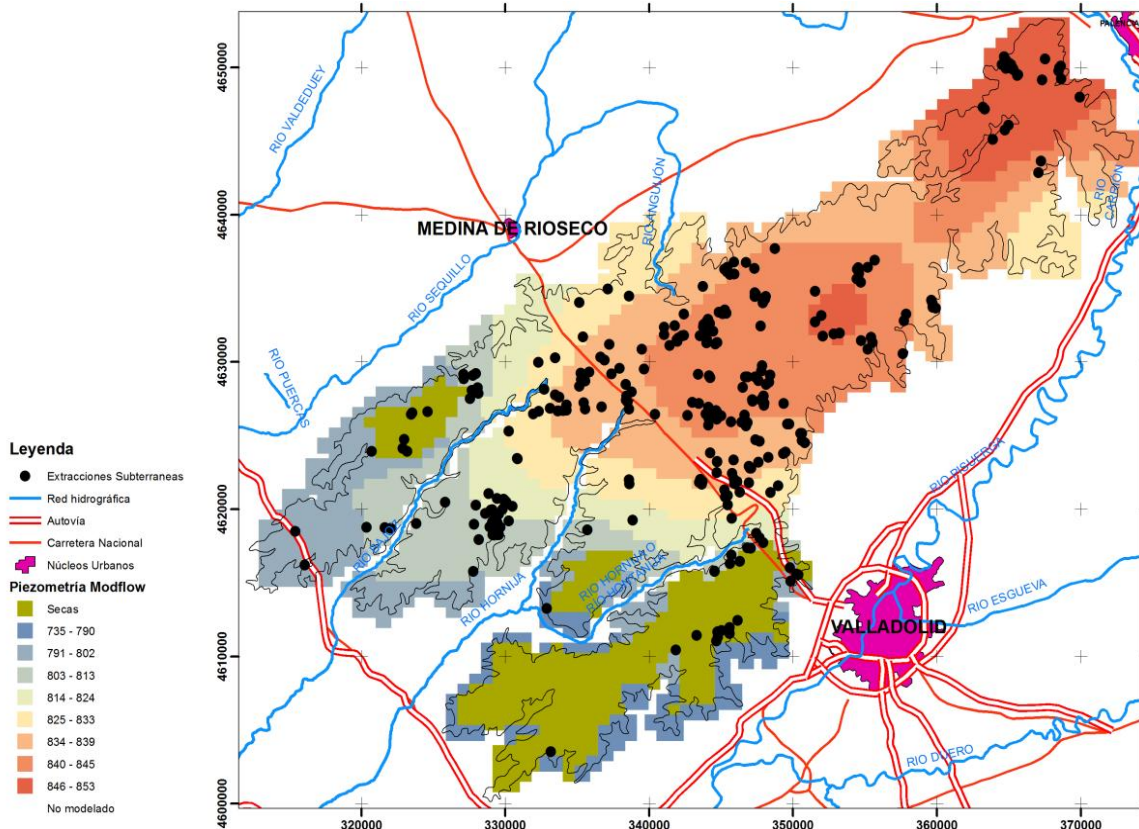


Fig. 71. Mapa de resultados de obtenidos de la piezometría de Visual Modflow con los pozos superpuestos.

Otra forma de visualizar los resultados del modelo es en forma de corte (Fig. 72). En esta imagen se puede ver la forma de cúpula que dibuja el nivel freático (de color azul) y los vectores de flujo representados por flechas azules que indican su dirección y su magnitud.

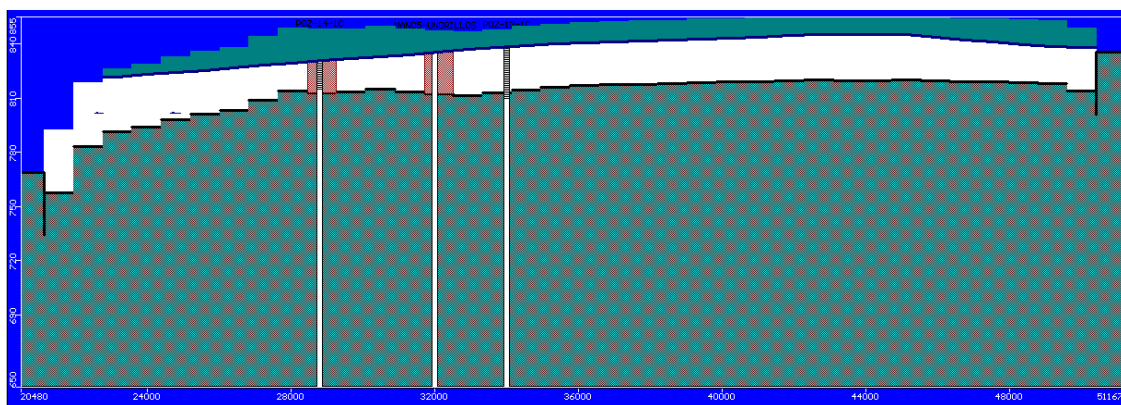


Fig. 72. Imagen de corte transversal realizada con Visual Modflow.

De forma más detallada, a continuación se muestra (Fig. 73) el comportamiento que sufriría una partícula en caso de existir un vertido de de una sustancia soluble. Se ha simulado la trayectoria de tres episodios puntuales de contaminación: uno relacionado con el tráfico de mercancías peligrosas asociada al aeropuerto; otro asociado con el uso de las sustancias egelantes para el mantenimiento de las carreteras; y otro asociado a un vertido procedente de un polígono industrial.

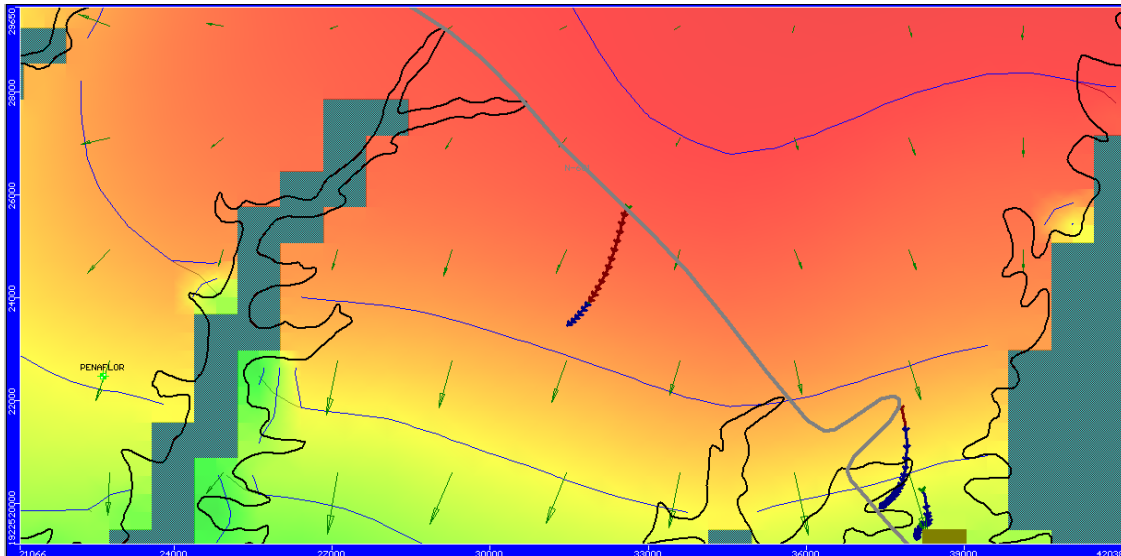


Fig. 73. Imagen del resultado de la simulación de la trayectoria de las tres partículas, representadas por flechas de color azul y marrón. En gris se identifica la carretera N-601.

Además de los resultados espaciales, Visual Modflow 2012 proporciona los resultados numéricos propios del balance hídrico para cada uno de los pasos de tiempo tanto en forma de gráficos (Fig. 74) o en forma de un fichero *.lms (semejante a un archivo de texto plano). El resultado del balance del modelo es de 101 hm³, valor muy similar a los 113 hm³ obtenidos a partir del balance hídrico convencional.

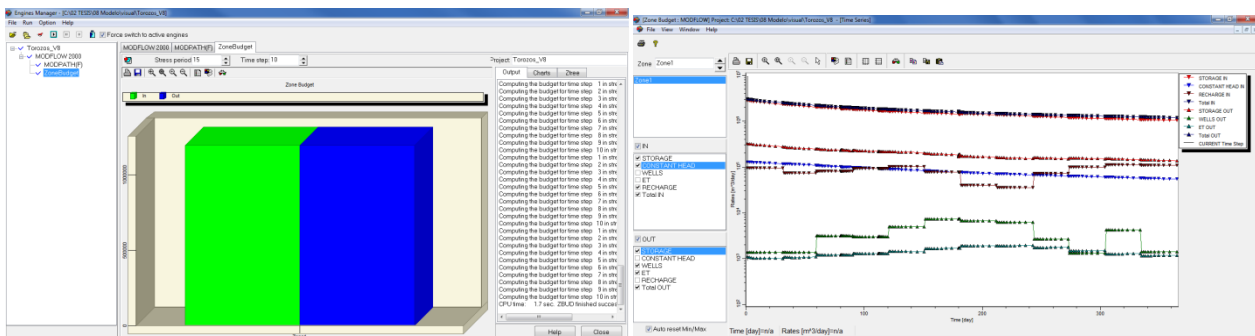


Fig. 74. Imagen del resultado del balance y de las entradas y salidas en cada uno de los pasos de tiempo.

4.1.4.4 Calibración y validación de resultados

La corroboración de los resultados obtenidos del modelo, se ha realizado mediante la incorporación de los piezómetros que la CHD dispone en la masa de agua subterránea de los Montes Torozos. Estos puntos son los únicos de los que se dispone de un registro continuo a lo largo de todo el año, por lo que sirven adecuadamente a su cometido como niveles de referencia. Como ninguno de los tres llega a secarse por completo a lo largo de todo el lapso de tiempo estudiado y las medidas realizadas en campo y las proporcionadas por la Confederación Hidrográfica del Duero [126, Confederación Hidrográfica del Duero 2013] coinciden, se puede aceptar que las interferencias por otras captaciones no son significativas, y por tanto los puntos de calibración son válidos.



De esta forma se obtiene que la medida registrada de los tres piezómetros de control, se encuentra dentro del intervalo de confianza del 95% de los calculados por el modelo, como se puede ver en la Fig. 75.

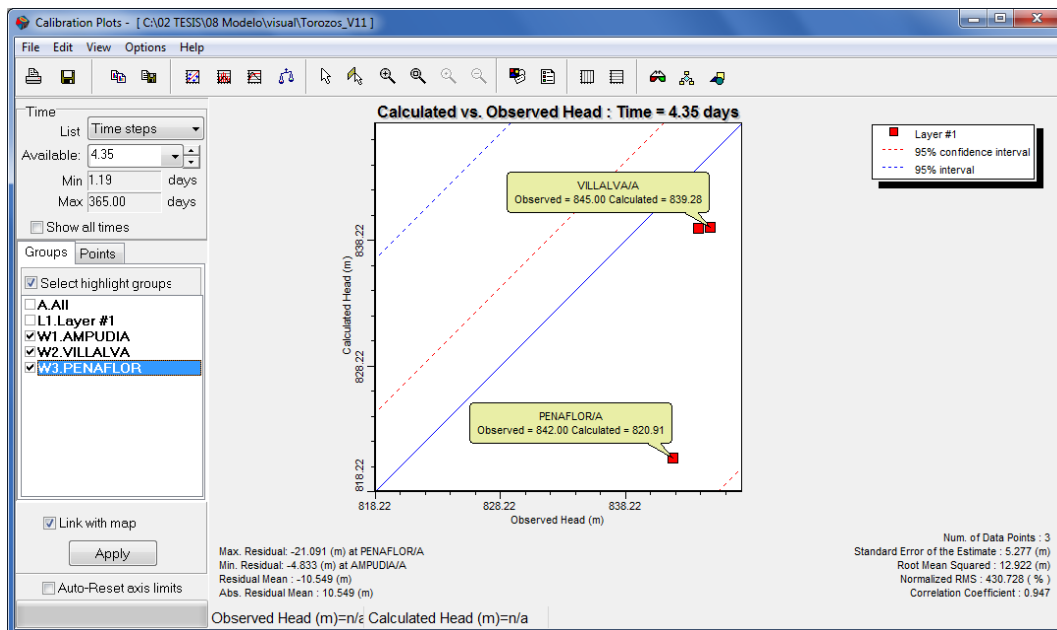


Fig. 75. Cuadro de calibración de Visual Modflow correspondiente al instante de tiempo 4.35 días.

Es necesario indicar que este resultado se ha obtenido usando únicamente los parámetros hidrogeológicos obtenidos a partir de la curva de agotamiento teórica para el manantial de la fuente de los Ángeles (nacimiento del Hontanija en la localidad de Villanubla), aunque posteriormente se hayan ajustado para el resto del páramo. No por la limitación de usar sólo una curva se debe despreciar el modelo, se trata de un modelo válido, ya que se comporta de forma semejante a la realidad observada, por lo que debe ser mejorado con el tiempo, mediante la adquisición de nuevos datos, la realización de ensayos de bombeo, la monitorización de nuevas fuentes, etc.

A partir de la mejora de los datos se tratará de ajustar una curva de agotamiento común para los hidrogramas de cada uno de los manantiales en el mismo periodo de tiempo, a pesar de que su comportamiento sea muy heterogéneo a lo largo de todo el año hidrológico. Algunos de ellos carecen de curvas claras de agotamiento, otros presentan fuertes alteraciones asociadas a las captaciones subterráneas, o incluso alguno tiene comportamientos completamente erráticos, con un descenso continuo del caudal a lo largo de los aforos realizados de forma puntual a lo largo de 5 años. Por este motivo ha sido imposible realizar la aproximación de Maillet para calcular una transmisividad válida para todo el páramo. Quizá disponiendo de series temporales largas se pudieran realizar ajustes estadísticos que permitan observar las tendencias de su comportamiento.

Este hecho, junto con la inexistencia de ensayos de bombeo o recuperación de pozos y de cualquier otra estudio hidrogeológico y geológico de detalle, que hubieran permitido determinar



una permeabilidad, porosidad y potencia real, hacen que el modelo sea una aproximación teórica a la realidad, más que un modelo predictivo en sí mismo.

A falta de corroborar los resultados obtenidos con las técnicas geofísicas e hidrogeológicas correspondientes, y como se trata de un modelo basado en aproximaciones sucesivas, se ha optado por considerar primero los datos bibliográficos existente, para posteriormente ir ajustando el modelo (con los cálculos teóricos) a las mediciones existentes de los puntos de control. De esta forma se puede observar claramente las diferencias existentes entre el modelo puramente teórico y bibliográfico de 2010, con el modelo actual con parámetros experimentales (Fig. 76).

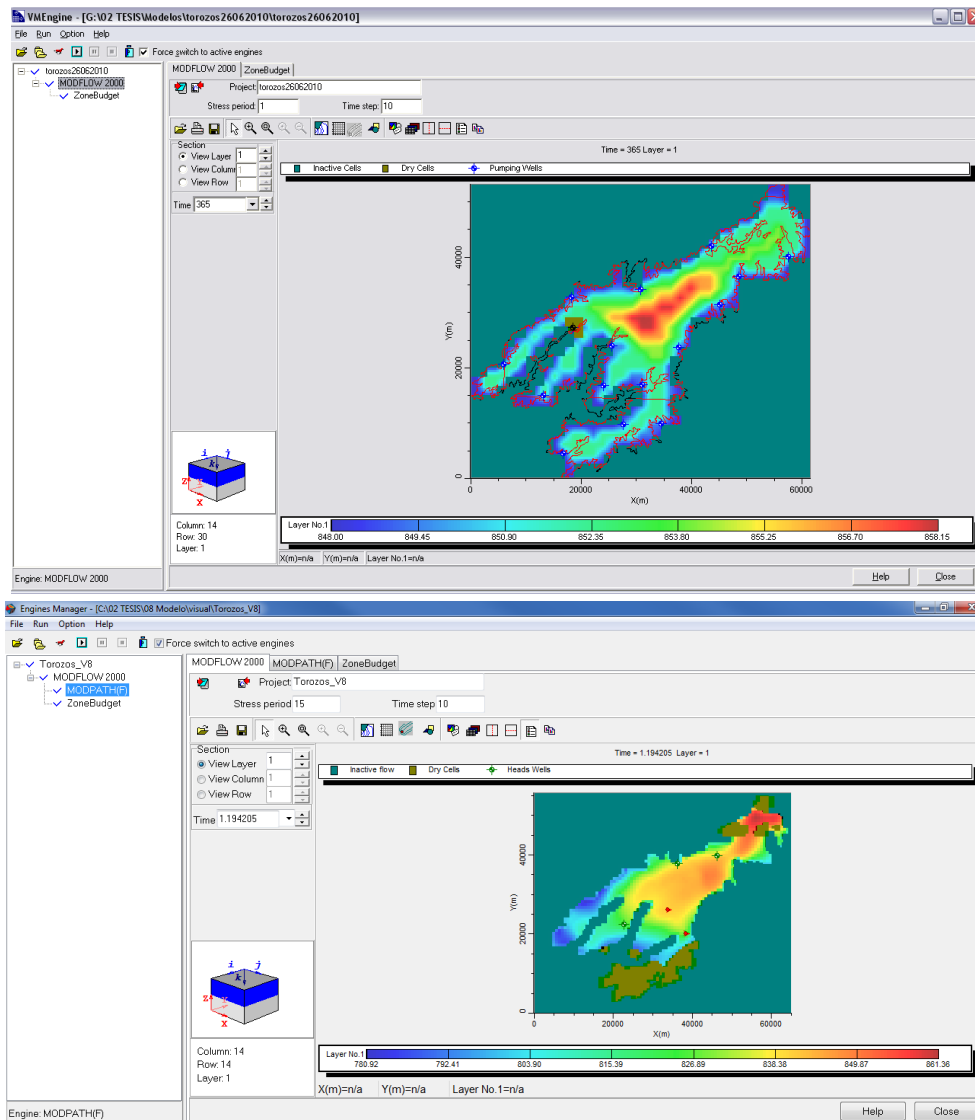


Fig. 76. Imagen comparativa de la piezometría calculada por el modelo de 2010 y 2014, modificado por aproximaciones sucesivas.

A partir de estos resultados de la calibración se puede dar el modelo como válido, ya que posee una incertidumbre menor al 5% y responde de la forma esperada a las acciones externas al sistema.



4.2 LA VULNERABILIDAD

Elsevier Editorial System(tm) for Science of the Total Environment
Manuscript Draft

Manuscript Number: STOTEN-D-14-00397

Title: Strategic spatio-temporal vulnerability assessment to enhance resilience urban groundwater systems in Spain

Article Type: Research Paper

Keywords: Groundwater management, Vulnerability, Remote sensing, Geostatistic, environmental Risk.

Corresponding Author: Dr. Teresa Albuquerque,

Corresponding Author's Institution: Polytechnic Institute of Castelo Branco

First Author: Germán Sanz, Master

Order of Authors: Germán Sanz, Master; Teresa Albuquerque; Roberto Martínez-Alegría, Ph.D; Javier Taboada, Ph.D

Abstract: Governance reforms are required to demonstrate adaptive and resilient urban water resource management that takes into account complexity, uncertainty and immediate and long term change.

The objective of this research is the study of vulnerability to pollution in an unconfined karstic aquifer. Aquifer vulnerability assessment to define critical zones of contamination is important for the structure of an effective monitoring network for groundwater management.

Mainly it is addressed vulnerability integration, in relation to policy, specifically in risk evaluation and risk-benefit considerations focusing the requirements of the European Community's Water Framework Directive 2000/60/EC (EC 2000) and the Groundwater Directive 2006/118/EC (EC 2006).

Contamination of groundwater is a complex process and full of uncertainty in regional scale.

Development of an integrated vulnerability assessment methodology can be useful to effectively manage (including prioritization of limited resource allocation to monitor high risk areas) and protect this valuable freshwater source. Land-use temporal evolution mapping was performed using a remote sensing based methodology, taking into account the aerial frames of the historical flights of 1956/59 and 1977/83 and CORINE (Coordination of information on the environment) Land Cover (1990, 2000 and 2006) as spatial information. The research insights suggest that the establishment of a pattern of effective governance is mandatory as the future highway, the prison and the airport are overlaying the most vulnerable areas of the aquifer and therefore provide policy makers guidance in overcoming urban water governance challenges.

Suggested Reviewers: Paulino Garcia Ph.D

Associated professor, Department of Mathematics, University of Oviedo, Spain, University of Oviedo
lato@orion.ciencias.uniovi.es

Research activity on statistics methodologies namely in environmental Assessment.

Petra Vrhovnik Ph.D

Associated professor, Department of Geology, Faculty of Natural Sciences and Engineering, University of Ljubljana, Slovenia

petra.vrhovnik@ntf.uni-lj.si



Strategic spatio-temporal vulnerability assessment to enhance resilience urban groundwater systems in Spain

Sanz G^a; Albuquerque MTD^{b*}; Martínez-Alegría R^c; Taboada J^d

a. Department of Natural Resources and Environmental Engineering. E.T.S. de Enxeñaría de Minas. Rúa Maxwell. Campus Universitario Lagoas-Marcosende. 36310 VIGO (Pontevedra). gsl9384@yahoo.com. Telephone: +34 649 963 822

b. Polytechnic Institute of Castelo Branco, AV. Pedro Álvares Cabral n.º 12, 6000-084 Castelo Branco, Castelo Branco, Portugal. [teresal@ipcb.pt], 00351968141801

c. European University Miguel de Cervantes (UEMC), C/Padre Julio Chevalier, nº2. 47012 Valladolid, Spain, and Civil Protection Services at the Spanish Government Delegation in the Castilla and León region. rmartinez@uemc.es

d. University of Vigo. Department of Natural Resources and Environmental Engineering. E.T.S. de Enxeñaría de Minas. Rúa Maxwell. Campus Universitario Lagoas-Marcosende. 36310 VIGO (Pontevedra). jtaboada@uvigo.es

Abstract

Governance reforms are required to demonstrate adaptive and resilient urban water resource management that takes into account complexity, uncertainty and immediate and long term change.

The objective of this research is the study of vulnerability to pollution in an unconfined karstic aquifer. Aquifer vulnerability assessment to define critical zones of contamination is important for the structure of an effective monitoring network for groundwater management.

Mainly it is addressed vulnerability integration, in relation to policy, specifically in risk evaluation and risk–benefit considerations focusing the requirements of the European Community's Water Framework Directive 2000/60/EC (EC 2000) and the Groundwater Directive 2006/118/EC (EC 2006). Contamination of groundwater is a complex process and full of uncertainty in regional scale. Development of an integrated vulnerability assessment methodology can be useful to effectively manage (including prioritization of limited resource allocation to monitor high risk areas) and protect this valuable freshwater source. Land-use temporal evolution mapping was performed using a remote sensing based methodology, taking into account the aerial frames of the historical flights of 1956/59 and 1977/83 and CORINE (Coordination of information on the environment) *Land Cover* (1990, 2000 and 2006) as spatial information. The research insights suggest that the establishment of a pattern of effective governance is mandatory as the future highway, the prison



and the airport are overlaying the most vulnerable areas of the aquifer and therefore provide policy makers guidance in overcoming urban water governance challenges.

Key words:

Groundwater management; Vulnerability; Remote sensing; *Kriging*; environmental Risk.

*Corresponding author: Tel.: +351 272339300, Fax: +351 272339399, e-mail address: teresal@ipcb.pt

1. Introduction

Cleaning and restoring contaminated groundwater has been often technically difficult and a considerable financial burden and searching for alternative sources for water supply is not always feasible. Consequently, the most effective and realistic solution is to prevent groundwater from contamination. A comprehensive regional approach, identifying vulnerability patterns of groundwater to contamination can be a useful tool to manage this valuable resource.

Vulnerability can be somewhat an ambiguous concept. Several authors provide a good overview of different definitions for vulnerability assessment (e.g. Bachmat and Collin, 1987; Foster, 1987; Singh et al. 2011; Ryan et al. 2012; Vishnu, P.P. et al. 2011). Vulnerability, as a relative aquifer's characteristic, is a non-measurable and dimensionless property and should be used as an indicator for risk assessment. The identification of "cold" and "hot" vulnerable spots, and the subsequent overlapping of impacting activities provides policy makers guidance in overcoming urban water governance challenges. The distinction between intrinsic vulnerability and specific (or extrinsic) vulnerability became a significant issue as anthropogenic activities started to affect considerably the environment in the last decades. Intrinsic vulnerability is a function of hydrogeological factors (Aller et al. 1987) whereas specific vulnerability refers clearly to the potential impacts of specific land use and contaminant dispersion (Ribeiro et al. 2003). In this paper, was used as intrinsic method the DRASTIC index (Aller et al. 1987), a parametric method widely used (e.g., Lobo-Ferreira and Oliveira 1993; Hamza et al. 2006; Jamrah et al. 2008; Moratalla et al. 2011). The



specific vulnerability assessment went through the Susceptibility Index (SI) computation (Ribeiro 2000). It is an adaptation of the DRASTIC method and was created for evaluating aquifer vulnerability to land use impact (Lobo-Ferreira and Oliveira 1993; Francés et al. 2002; Ribeiro et al. 2003; Stigter et al. 2006).

In the herein work the results of the vulnerability mapping (intrinsic and extrinsic), using both DRASTIC and the Susceptibility Index (SI), are used as an attribute for the sustainability study of the unconfined limestone aquifer of Montes Torozos, Duero river watershed. Torozos (total area= 10000 km²), is located in the central northwest of the Iberian Peninsula, stretching between the Spanish provinces of Valladolid and Palencia (Fig.1), encompassing 57 municipalities and parishes (Sanz. G 2010) with a population around 47000 inhabitants (Instituto Nacional de Estadística, 2013). The main human activities are agriculture and livestock. The anthropogenic impact has risen exponentially in the last fifty years, mainly due to changes in consumer habits which induced environmental changes and deferred direct effects on the exposed population.

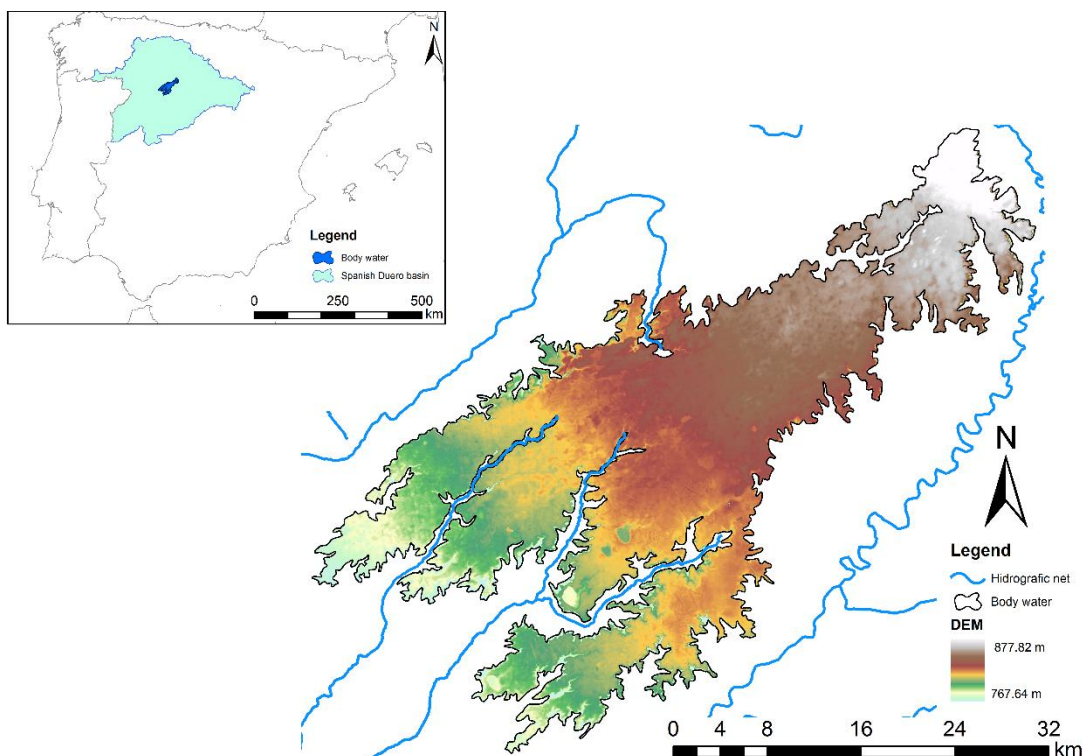


Fig.1



According to the Iberian Climate Atlas (Agencia Estatal de Meteorología de España and Departamento de Meteorologia e Clima, Instituto de Meteorologia de Portugal, 2011), the study area has a temperate weather with dry summers and middle temperature. For this characterization was used the daily average dataset, given by Agencia Estatal de Meteorología de España (AEMET), between 1936 and 2012 (Table.1) - 456 mm average rainfall/year and 11.14°C average temperature/year. The prevailing winds are North-East and land uses mainly extensive agriculture (Fig.2).

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sept	Oct	Nov	Dec
P [mm]	43.91	34.09	36.90	42.50	47.24	35.94	18.16	16.45	33.37	45.94	51.68	50.18
T^a [°C]	3.09	4.61	7.33	9.20	12.60	17.11	20.17	20.03	17.05	12.03	6.83	3.65

Table.1. Average data by serial climatic date.

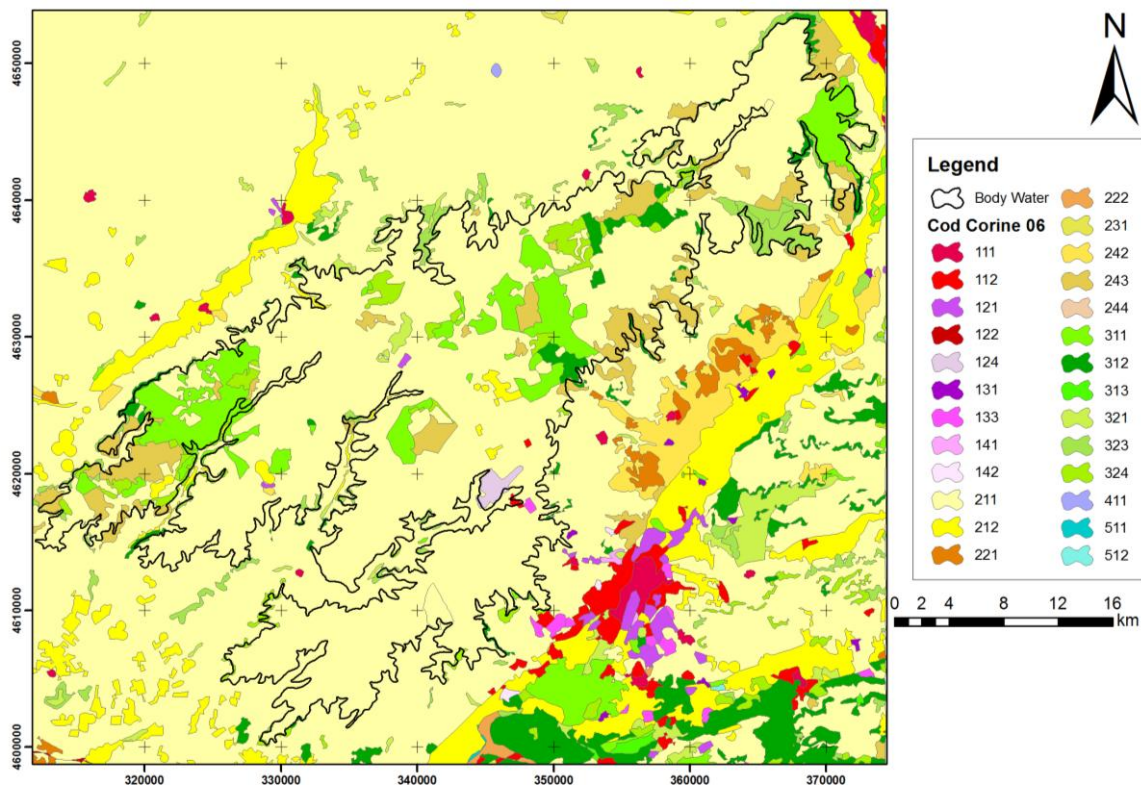


Fig.2

2. Material and Methods

Many different methods have been developed for assessing groundwater vulnerability (e.g. Vrba and Zoporozec, 1994). In this approach two vulnerability methods were used: DRASTIC index and the Susceptibility index (SI). The DRASTIC method is a point count system model (PCSM) method for measuring the intrinsic vulnerability (Aller et al., 1987). It takes into account seven parameters



in the geohydrological environment. The DRASTIC has been well accepted in many studies all around the world (e.g. Shukla et al., 2000, Zabet, 2002, M.T.D.,Albuquerque et al, 2013, Fernando et al, 2013). As DRASTIC stands for the watershed intrinsic vulnerability characterization, SI stands for the extrinsic or specific vulnerability. The specific vulnerability assessment method, named Susceptibility Index (SI) (Ribeiro 2000), is an adaptation of the DRASTIC method and was created for evaluating aquifer vulnerability to land use impact (Lobo-Ferreira and Oliveira 1993; Francés et al. 2002; Ribeiro et al. 2003; Stigter et al. 2006). Recent publications have shown the importance in the vulnerabilities computation in developing countries like China (Junjie Wang, et al 2012), Tunisia (Insaf Mike et al 2013), Iran (Elham Fijani et al 2013) etc. The impact of natural and anthropogenic activity assessment is a target issue to a sustainable groundwater resources' policy guidance in overcoming urban water governance challenges.

2.1 Layers Construction and Assumptions

The acronym DRASTIC synthesizes the parameters included in the method: Depth to water (**D**), net Recharge (**R**), Aquifer media (**A**), Soil media (**S**), Topography (**T**), Impact of vadose zone (**I**) and hydraulic Conductivity (**C**) of the aquifer. The calculated DRASTIC indices are roughly analogous to the likelihood that contaminants released in a region will reach groundwater: higher scores translate into a higher likelihood of contamination (Aller et al. 1987). The significant media types or classes of each parameter range between 1 (lower vulnerability) and 10 (higher vulnerability) based on their relative effect on the aquifer. The seven parameters are then assigned weights ranging from 1 to 5 reflecting their relative importance:

$$\text{DRASTIC} = D_i \times D_p + R_i \times R_p + A_i \times A_p + S_i \times S_p + T_i \times T_p + I_i \times I_p + C_i \times C_p$$

The SI method (Ribeiro 2000) provides an assessment of the specific vertical vulnerability to pollution, mainly originating from agricultural activities and defined to nitrates. Specific vulnerability is the term used to define groundwater vulnerability to a particular contaminant or group of contaminants. Its calculation is based on the DRASTIC method with the incorporation of four of the original parameters: depth to water (**D**), annual efficient recharge (**R**), aquifer media (**A**) and



topography (**T**). A fifth and new parameter is Land use. The parameter weights, ratings are different and were determined by a team of experts (Ribeiro 2000).

2.2. Parameters Computation-DRASTIC

The Depth to Water (**D**) parameter was obtained from piezometric head data recorded during 2010-2011 field campaign in 65 wells and 40 springs, homogeneously distributed in the study area (Fig.5) and interpolated through a geostatistics methodology. In any geostatistical study, an important consideration is the choice of an appropriate, repeatable, and objective search strategy that controls the nearby samples to be included in the location-specific estimation procedure. In order to achieve a better sampling design in 6 georeferenced points (Fig. 3-red dots) the piezometric level was estimated, by linear regression taking into account the geological contacts. Finally the estimated values were compared with the dataset available in the Confederación Hidrográfica del Duero (CHD) (site http://www.mirame.chduero.es/DMADuero_09/index.faces). The next step was to perform the spatial structural study by computing the experimental variogram and fit of the most suitable model.

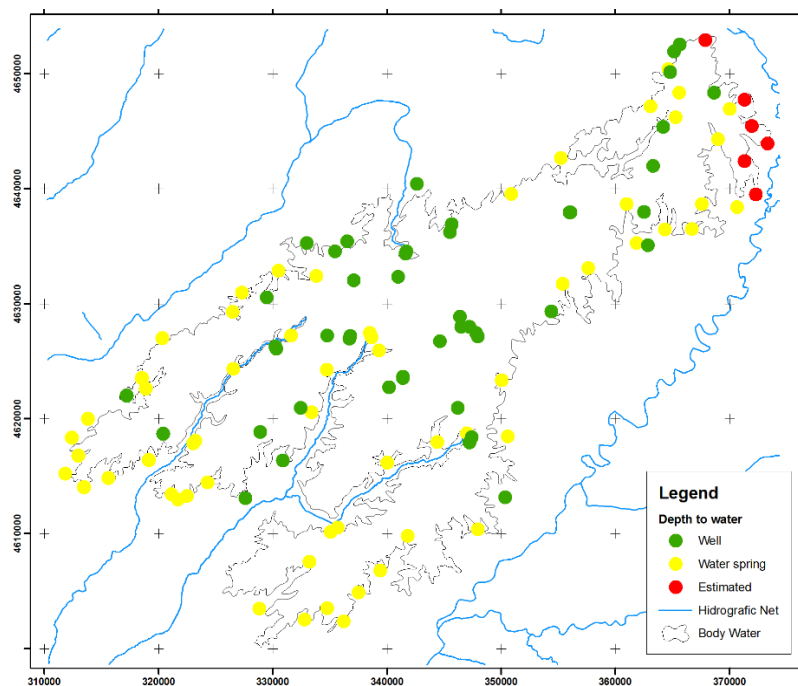


Fig.3



For a set of N observations $\{y(u_\alpha), \alpha=1, \dots, N\}$ at locations u_α , interpreted as a joint realization of a random function $Y(u)$ representing the attribute of interest, the classical estimator of the sample variogram $\hat{\gamma}$ is given by (Goovaerts, P., 1997):

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{\alpha=1}^{N(h)} [y(u_\alpha) - y(u_\alpha + h)]^2$$

Where the h denotes a lag vector separating data pairs and $N(h)$ is the number of pairs encompassed by a limited range of distances and directions centered in h . Sample variograms are computed specifying a series of lag vectors h , considering the distance and direction tolerances. The resulting plot of $\hat{\gamma}(h)$ indicates how observations of $\gamma(u)$ become dissimilar from one another as the distance between them increases (Fig.2). For a given lag h , smaller values of $\hat{\gamma}(h)$ imply strong spatial autocorrelation and a smooth texture, whereas a larger $\hat{\gamma}(h)$ implies a less coherent, more irregular spatial structure. A typical variogram, $\hat{\gamma}(h)$ increases with h only up to a certain distance, referred to as the range, beyond which the random variables $\gamma(u)$ and $\gamma(u+h)$ are no longer correlated with one another. For the 111 piezometric head data, was used a combination of nugget and two nested spherical models to capture variability in an omnidirectional experimental variogram (Table.2). The two nested structures points to a short distance correlation (range=18802 m) which is predominantly representative in the Northeast area and a second structure (range=43048 m) indicating a long distance correlation which is primarily represented in the southwestern portion of the aquifer (Fig.4).

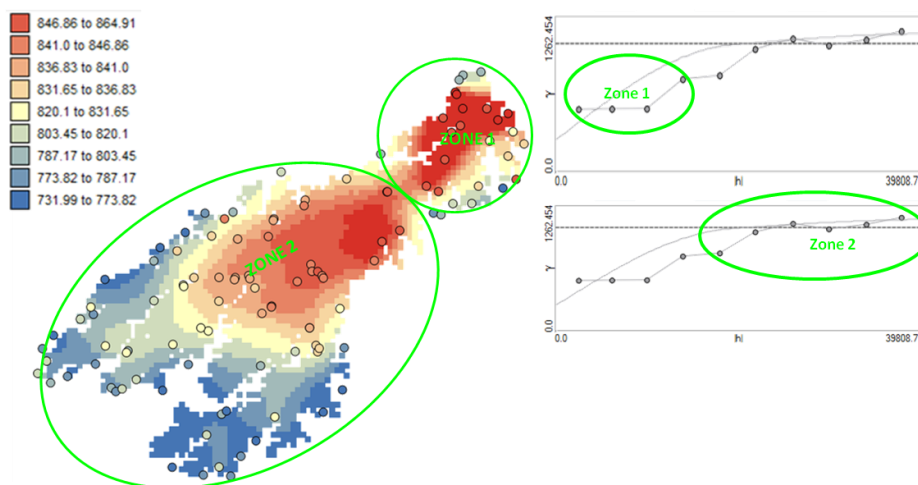


Fig.4



Parameters	Nugget	Model 1	Model 2
Nugget (C_0)	261.1159	-	-
Type	-	Spherical	Spherical
Sill (C_1)	-	617.3606	-
Sill (C_2)	-	-	254.8226
Min range (a_1)	-	18801.6903	-
Max range (a_2)	-	-	43048.2053

Table. 2. Vanogram parameters.

All climatic values have been calculated from Villanubla serial data. Other meteorological stations have been turned down as their temporal serial data were incomplete or inaccurate. The values of this meteorological station are useful for any place of Montes Torozos since there are not physiographic borders or micro-climate's worth notify. It is concluded, that Villanubla meteorological station is the most representative to calculate mean values of precipitation and temperature. The average precipitation and temperature data are the start parameters to calculate the recharge. The recharge has been calculated through useful rain data. The useful rain is the rest of average accumulated precipitation and average real evapotranspiration and was computed using Turc's methodology (Turc, L., 1961).

The aquifer's net recharge parameter (**R**) has been calculated taking into account the precipitation and the temperature serial data (1936-2006) from AEMET. The annual net recharge's values is 178 mm/year (Drastic level = 6), this value was contrasted with a value of Libro Blanco Del Agua (Ministerio de Medio Ambiente 2000). The DRASTIC value of ten shows a significant contribution of this parameter for vulnerability computation. Net recharge has been correlated with the flow of spring waters which drain to the karstic aquifer. The Pearson correlation index (0.91) was calculated between the natural logarithm of the flow measured on the water springs and the annual average precipitation observed on each spring nearest point using the meteorological Villanubla station's dataset (Mendes. E., 2006). In order to find out a relation between rainfall and discharge. As the correlation showed to be of 0.91 is possible to conclude that the difference between the rainfall amounts and the spring's flow corresponds to the recharge after the subtraction of the real Evapotranspiration (ET_0). In order to compute the ET_0 , the Turc's methodology (Turc, L., 1961) was used. The climatological variables used can be seen in Table 3:



	Month												Year Average
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
P [mm]	43.91	34.09	36.90	42.50	47.24	35.94	18.16	16.45	33.37	45.94	51.68	50.18	456.38
T^a [°C]	3.09	4.61	7.33	9.20	12.60	17.11	20.17	20.03	17.05	12.03	6.83	3.65	11.14
ETR Turc	19.45	20.48	22.40	23.82	26.70	31.21	34.76	34.59	31.14	26.19	22.04	19.83	312.60

Table.3. climate average data.

The ET_0 has been reckoned with the following equation:

$$ET_0 = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

$$L = 300 + 25t + 0,05t^3$$

Where:

ET_0 is the real Evapotranspiration [mm/yr]

P is the average accumulated rainfall [mm/yr]

t is the average temperature [°C]

An average real ET of 312 mm/year and an average Recharge of 178 mm/yr were computed and the correlation coefficients between the natural logarithm of the monthly accumulated rainfall and flow rate calculated. To avoid distortions from the extraction wells during times of irrigation, and taking into account periods of recharge and drought, only the months of October to February were used for of the years 2010-2011, as they accumulate more than 50% of the annual precipitation. There is an annual inertia (within the same hydrological year) where the maximum precipitation generates maximum flow and it is approximately of 4 months. The aquifer media parameter (**A**) was determined taking into account the lithostratigraphic layers (Instituto Geológico y Minero de España, 1991). The type of soil parameter (**S**) was evaluated using observations collected during the 2012 field campaigns. Since soil is rather superficial or absent throughout the entire study area, this parameter received the DRASTIC value of ten and will contribute significantly to the computation of vulnerability. The surface slope parameter (**T**) was established using the Digital Elevation Model (DEM) (Instituto Geográfico Nacional, Spain, 2009) for the study area, after



reclassification into the correspondent DRATIC's classes. There are not high slopes, only on borders could be observed slopes between 6-12 %. The vadose zone impact parameter (**I**) was computed taking into account the aquifer's lithological information. It is an acceptable assumption as groundwater has shallow characteristics, where water circulation is primarily controlled by the lithological characteristics. Limestone has the highest intrinsic vulnerability associated (Drastic level = 10). The hydraulic conductivity parameter (**C**) was assigned the value of $1.00 \times 10^{-4} \text{m/s}$ based on literature research (CHD, 2009) and corresponding to the DRASTICS's class number ten, so a low contribution in the subsequent vulnerability computation (Fig.5)

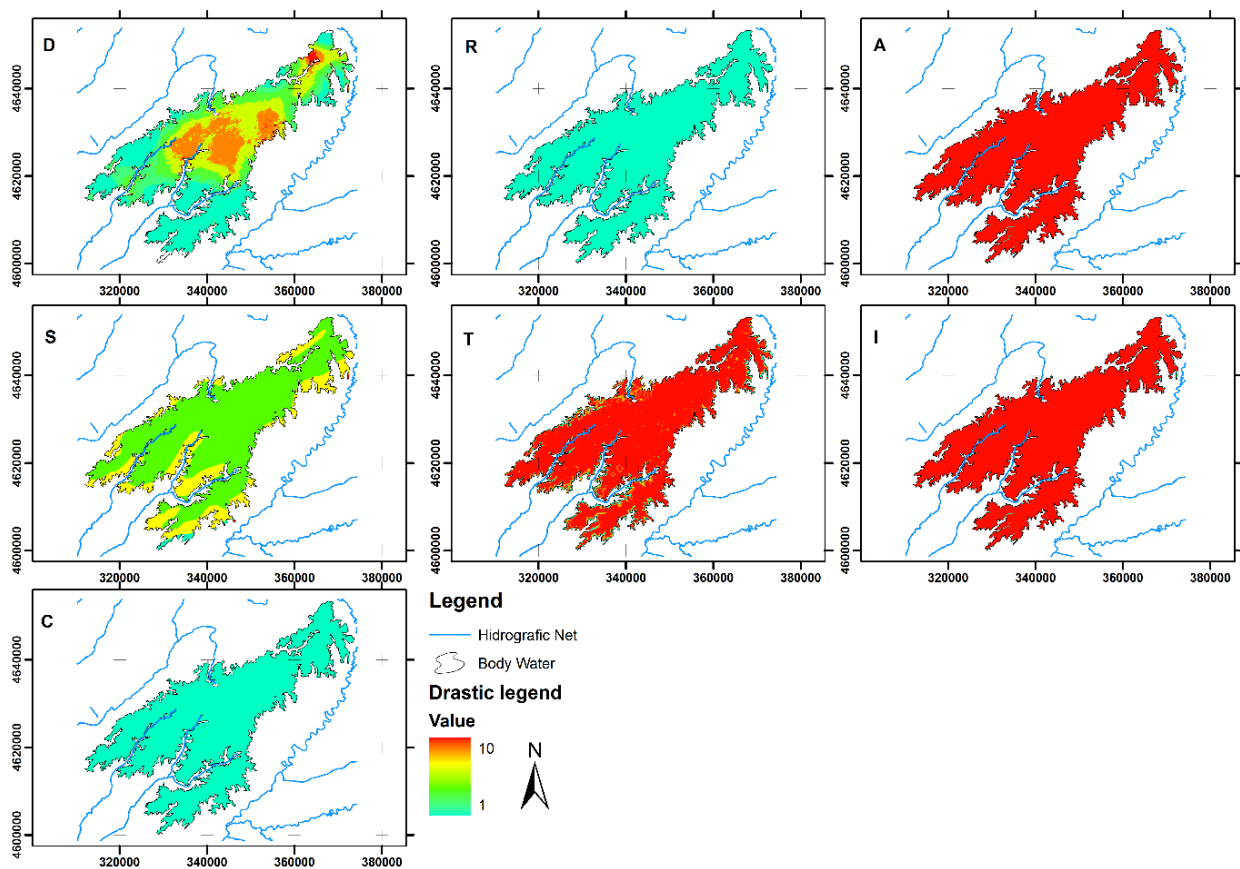


Fig.5

2.2.1. Land use – Susceptibility Index

The SI method (Paralta. E. A et al 2005) is an assessment method of the specific vertical vulnerability to pollution, mainly produced by agricultural activities and defined to nitrates. Specific vulnerability is the term used to define groundwater vulnerability to a particular contaminant or group of contaminants.



$$IS = D_i \times D_p + R_i \times R_p + A_i \times A_p + T_i \times T_p + L U_i \times L U_p$$

Where: LU is the land use weight; and LUp is the Land use range.

The IS method has been calculated with the same parameters of DRASTIC parameters and introducing a new attribute, corresponding to the anthropogenic activities. DRASTIC parameters are: Depth to water, net Recharge, Aquifer media and Topography. The parameters computation was determined by multiplying by 10 all the parameters. The Land use layer was estimated through the CORINE *Land Cover* 2006 (European Environmental Agency, 2012), taking into account its evolution in time, aiming a dynamic risk analysis and its spatial-temporal planning as a leverage to a better land use. For the multi-temporal land-use evolution the following procedure was adopted. In order to allow a wider analysis and future field validation, four different land-use maps were constructed utilizing a remote sensing based methodology. The aerial frames of the 1956/1957's historical American Flight; the 1977-83's Spanish IRYDA flight; and the 1998, 2002 and 2006 Ortofotography of Aerial National Ortofotografy Plan (PNOA) were downloaded by FTP of Instituto Tecnológico Agrario de Castilla y León (ITACyL 2013). The CORINE layers were downloaded from the European Environmental Agency (EEA 2012), the download was on *shape* file 2000 and 2006, and *. Grid format 1990. This digital cartography was used as spatial information for the 1959, 1977, 1990, 2000 and 2006's land-use layer construction. Four historical maps were then computed allowing a temporal visualization of the evolution of land consolidation and utilization.

The land use evolution suggests that there were not significant changes (Fig.6 and Table.4) concerning spatio-temporal distribution. Land consolidation shows, however small changes shown in (Fig.7).

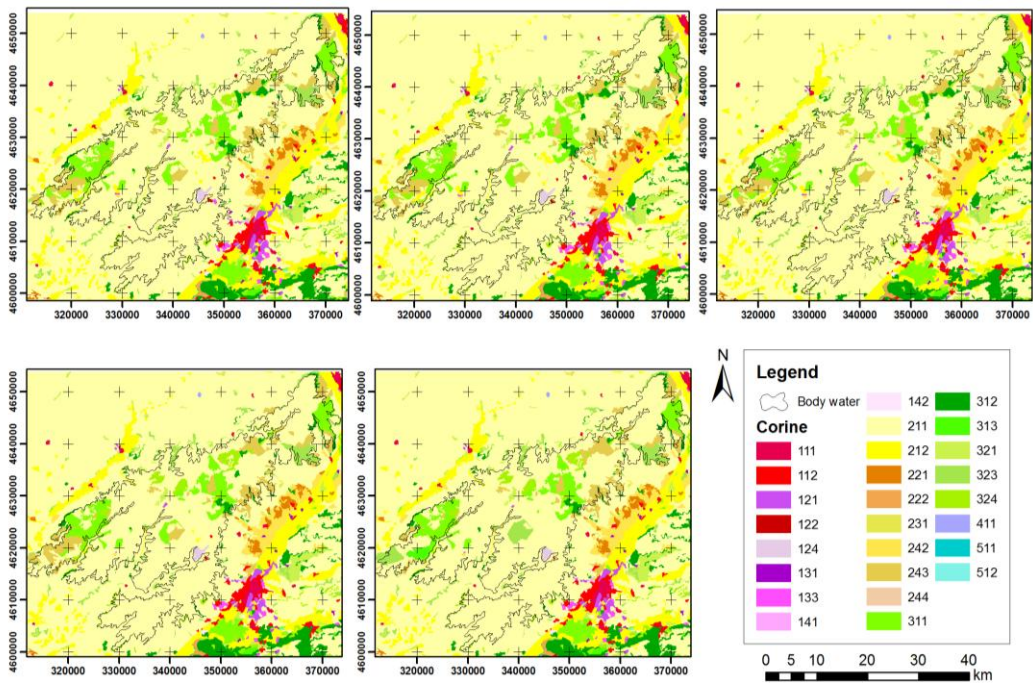


Fig.6

% Use	1959	1977	1990	2000	2006
Artificial	0.41	0.54	0.56	0.56	0.63
Agriculture	81.63	83.16	82.9	82.75	82.63
Semi-natural	17.96	16.28	16.99	16.99	16.99

Table.4. land use evolution in percentage.

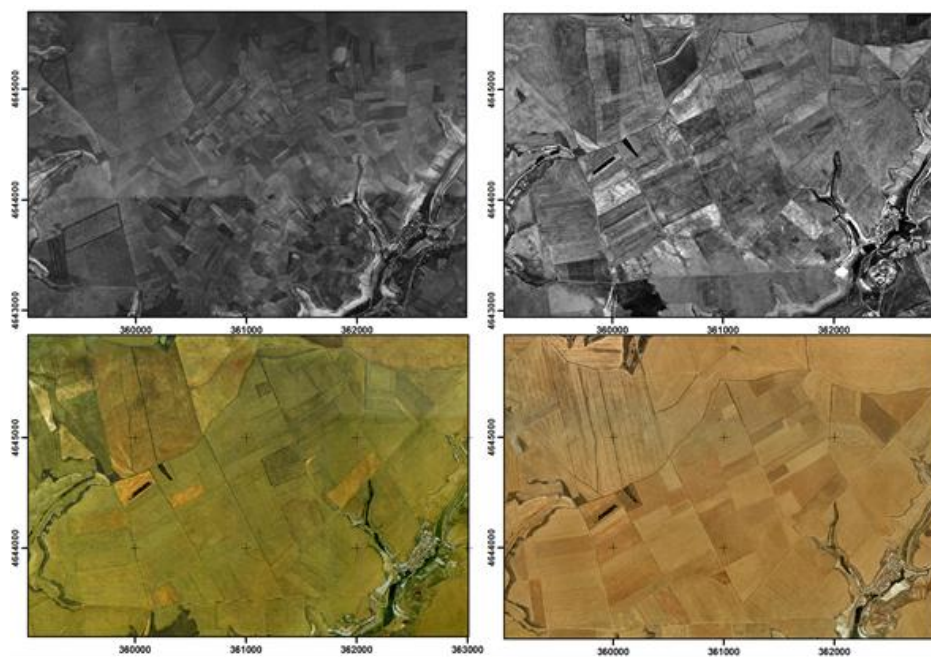


Fig.7



In general, land consolidation can be observed through the different historic flights. There are not any significant land use change, but there are important variation in size and form of plots (Fig.4). The consequences of the spatial distribution of the value of IS parameters are summarized in the following figure (Fig.8).

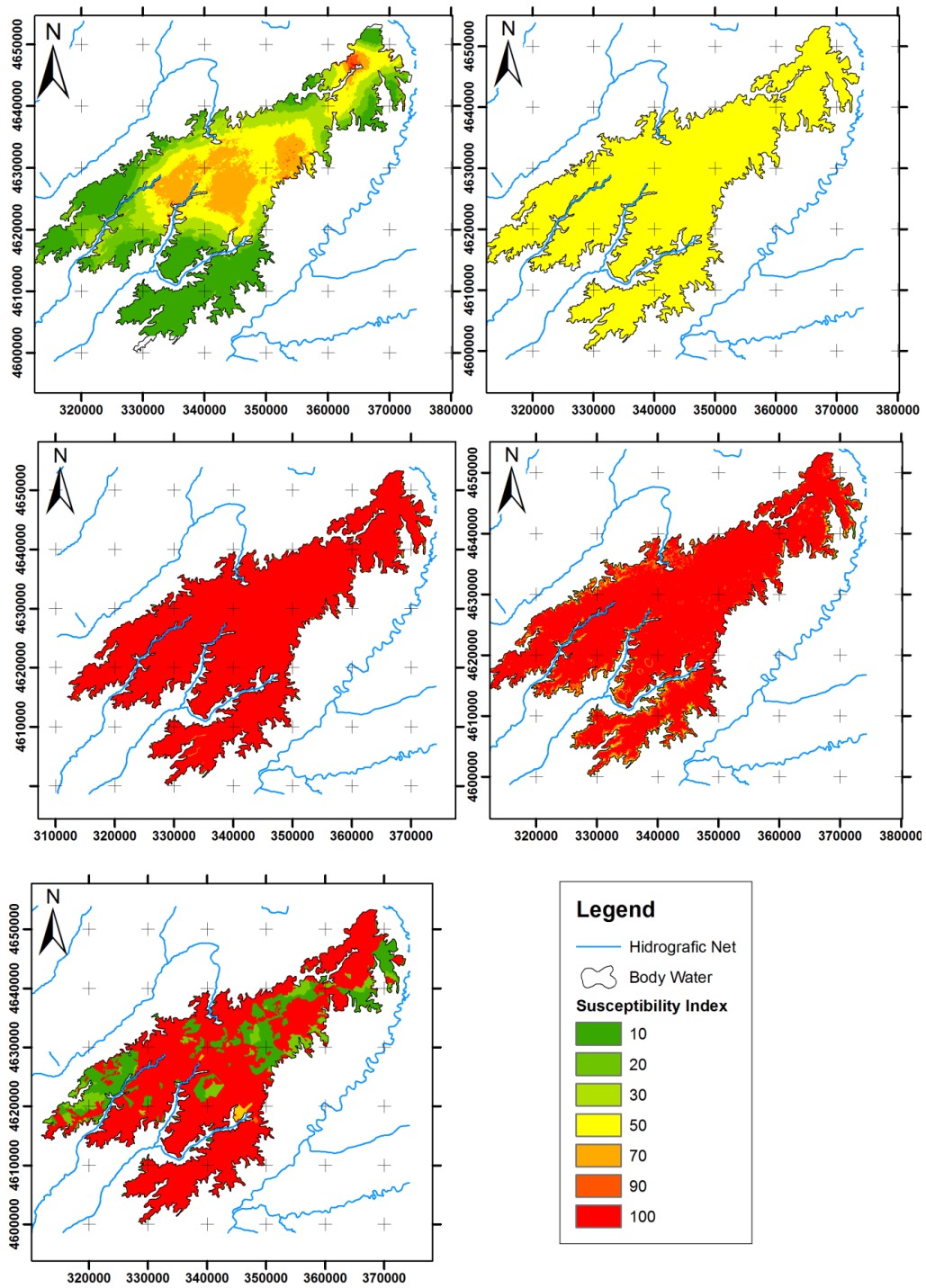


Fig.8



3. Discussion

The vulnerability maps are a strong tool for inferences and can be used for risk analysis. Taking into account the shown vulnerability patterns it is possible to formulate a sustainable territory management. In fact, the road network and other infrastructures are overlaying the most vulnerable areas (Martínez-Alegría, R. et al, 2003) (Fig.9) and the constructed vulnerability maps may help to design and plan some corrective, compensatory or protective measures.

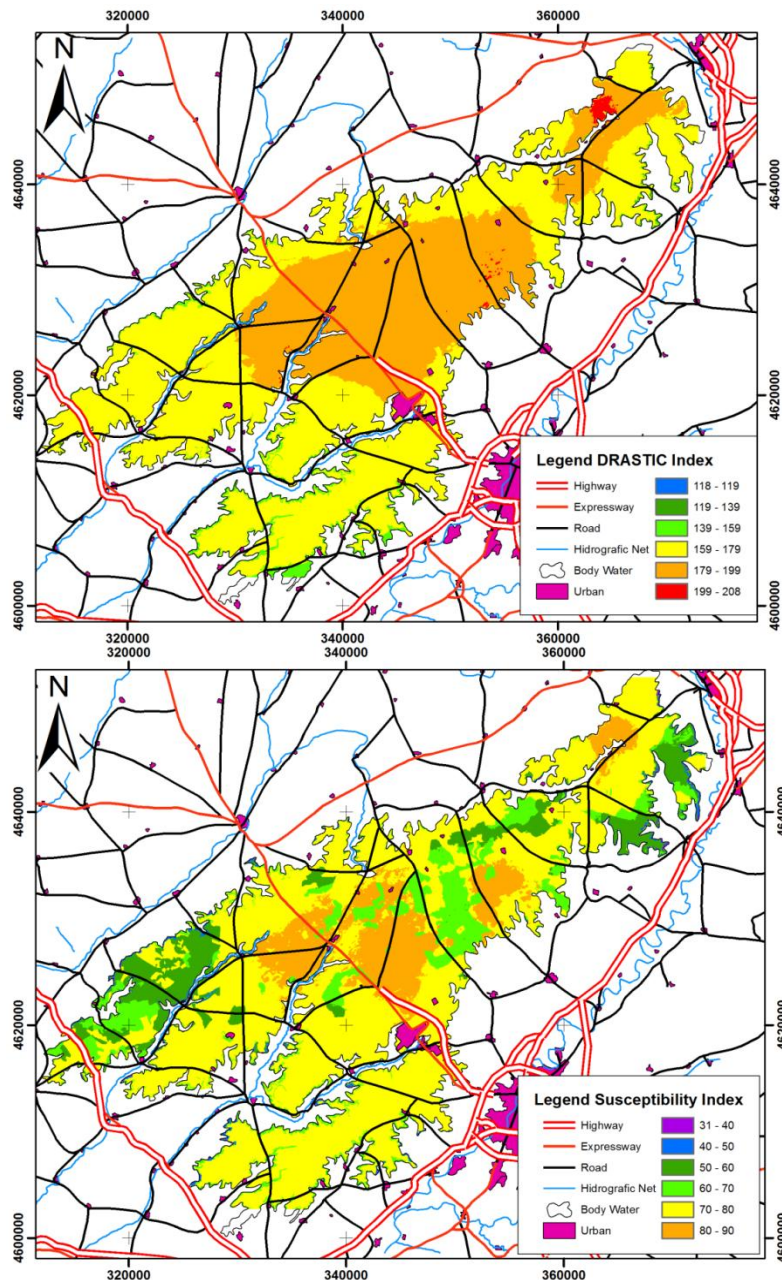


Fig.9



In both used methodologies, DRASTIC and Susceptibility Index (SI), it is possible to discover the existence of higher vulnerability in the central region of the aquifer and being overlaid in the south part (Fig.4 - zone 1) by hazardous infrastructures such as airport, industrial area and the principal highway. Near the electric plant there is a gas plant with potential leakage issues and dangerously close to the freshwater's spring La Mudarra (Fig.10).

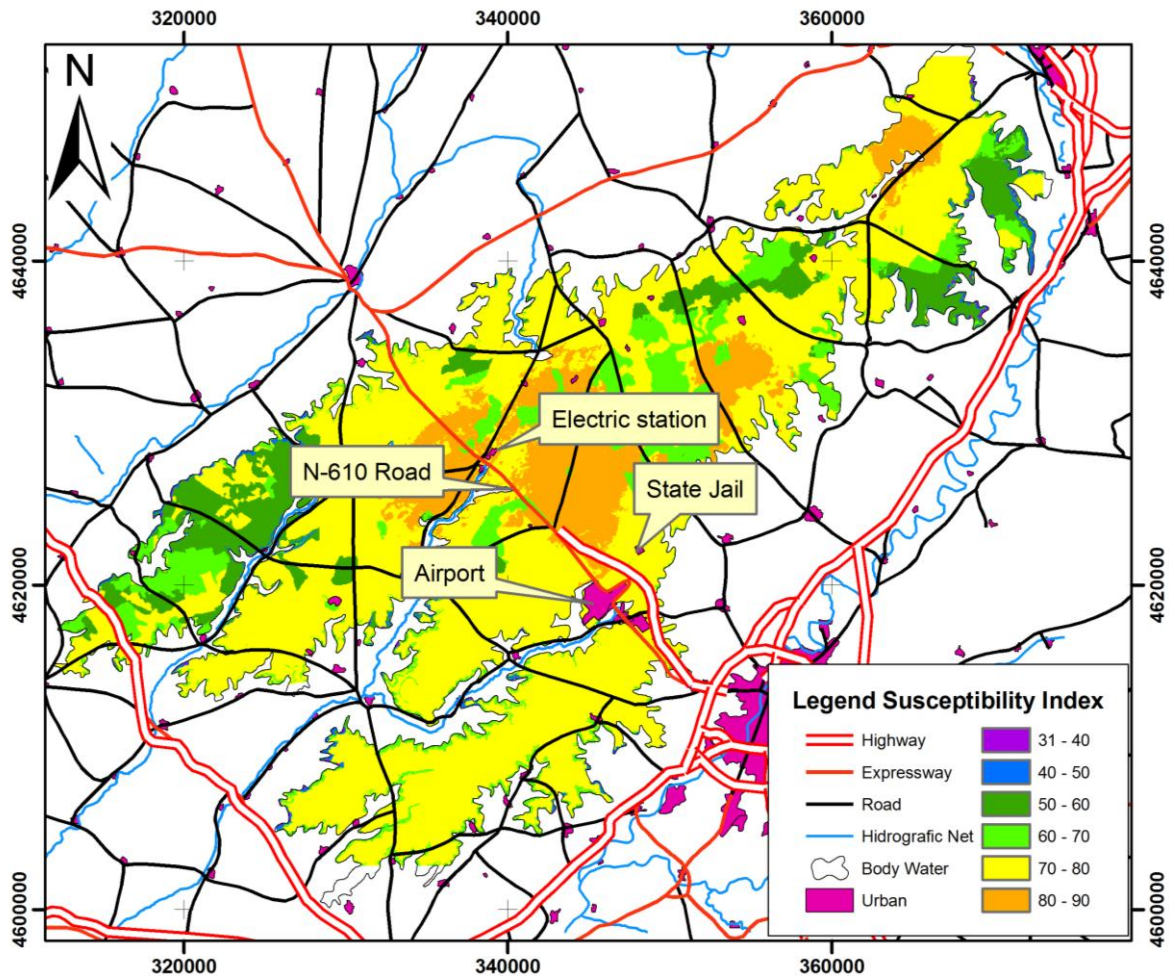


Fig.10

Another important issue to stress is the conflict of sensitivity shown by both methods. The large spatial variability introduced by the land use attribute in SI computation, shows in this second approach the presence of different vulnerability patches inside the biggest and homogenous DRASTIC's zones, which highlight the importance of the anthropogenic activities in the region. Concerning land use's temporal evolution (Fig.3) it is possible to conclude that there is no significant changes in the last 50 years, which allows to conclude that the vulnerability maps are accurate in this temporal lag perspective.



Finally to stress the geostatistical approach for the definition of the aquifer Depth. Taking as data the piezometric levels, it was possible to establish the spatial structure for this attribute. Although it was not possible to model the geometric anisotropy, the results showed up a good spatial correlation and an experimental variogram where two different structures stress the presence of two different hydraulic behavior, north and south respectively. Two spherical models were fitted, the first with an amplitude of 18801 m and the second of 43048 m, corresponding, the first one to the north zone (Fig.4 – zone 1) and the second one to the south zone (Fig.4 – zone 2). The differences in the hydraulic parameters can be explained by the geology and also due to the visible throat effect (Fig.4). The weight of this two spatial structure in the vulnerability computation must be underlined.

4. Conclusions

Vulnerability maps are a powerful tool for hazard analysis and territory's sustainable management. Mostly when in the presence of highly dangerous hazards, allowing consistent monitoring and adopting preventive and remediation measures.

Using different vulnerability indexes makes easier future validation and the fitting of more accurate predictive models able to show different scenarios at different stages of uncertainty.

The most vulnerable areas are located in the central part of the aquifer, which coincides with the highest phreatic level, where the water is closer to the surface. This proximity allows an easy access to groundwater and for that also the most requested for the placement of the hazardous equipment.

Comparing DRASTIC and SI outputs, notable differences can be seen as land use plays an important role in vulnerability assessment. The hazard equipment are overlaying the high vulnerable areas, which requires monitoring and taking protective and feasibility actions in future, related to urban activities, airport, roads and electrical plants' locations.

According to the DRASTIC parameters this aquifer has a high intrinsic vulnerability associated with its own hydrogeological nature. Anthropogenic activities are synthesized in the Susceptibility Index (SI) as land use is considered as a specific attribute. Urban, industrial and transport infrastructures



represents a liability in triggering processes of aquifer contamination (Fig.10) and may be regarded as risks associated with pollution episodes due to direct discharges, leaks, or topical accidents in consequence of dangerous goods transportation.

Land use allowed to enhance the DRASTIC's vulnerability spots as well as to conclude that the changes in Land use are not worth notify as the temporal evolution, concerning the last 50 years shows a variability less than 1%.

Lastly, it is important to underline the importance of the piezometric head data for the aquifer conceptual model design. The variographic study showed the presence of two different and independent hydraulic behaviors, concerning to the south and to the north zones of the aquifer, and it was essential to the aquifer geometry definition.

The results of using these methodologies to assess the intrinsic and specific (extrinsic) vulnerabilities are core knowledge for management optimization and planning, namely in which concerns for road winter maintenance (with massive discharges of brine), traffic of dangerous goods (mainly fuels), urban and industrial waste management, and leak control. Constituting a powerful tool, within the European framework of sustainable development, for the implementation of environmental emergency plans and the construction of prediction scenarios for outbreak crises associated with such activities.

Acknowledgements

This research was not possible without the collaboration of the Universidad Europea Miguel de Cervantes and Polytechnic Institute of Castelo Branco.

6. References

- Agencia Estatal de Meteorología de España and Departamento de Meteorologia e Clima, Instituto de Meteorologia de Portugal, IBERIAN CLIMATE ATLAS. ISBN: 978-84-7837-079-5. <http://www.aemet.es/documentos/es/conocermas/publicaciones/Atlas-climatologico/Atlas.pdf> Accessed 13 November 2013.
- Aller L, Bennet T, Lehr JH, Petty RJ, Hackett G, 1987. DRASTIC: a standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings. U.S. Environmental Protection Agency (Eds.), EPA/600/2-87/035, Oklahoma, 641 pp.
- Al-Zabet T, 2002. Evaluation of aquifer vulnerability to contamination potential using the DRASTIC method. *Environmental Geology*; 43: 203-208.
- Bachmat Y, Collin M, 1987. Mapping to assess groundwater vulnerability to pollution. Van Duijvenbooden W, Van Waegeningh HG (Eds) *Vulnerability of soil and groundwater to pollutants*.



- Proceedings and Information 38. TNO Committee on Hydrological Research, The Hague, pp 297–307.
- Confederación Hidrográfica del Duero. Plan Hidrográfico de la Cuenca Del Duero. http://www.mirame.chduero.es/DMADuero_09/masaSubterraneaHidrogeologia.faces. Accessed 12 July 2013.
 - Elham Fijani, Ata Allah Nadiri, Asghar Asghari Moghaddam, Frank TC Tsai, Barnali Dixon. 2013. Optimization of DRASTIC method by supervised committee machine artificial intelligence to assess groundwater vulnerability for Maragheh–Bonab plain aquifer, Iran. *Journal of Hydrology*. (2013) 503: 89-100. DOI 10.1016/j. 2013.08.038.
 - *European Environment Agency*. CORINE Land Cover. 1990, 2000 and 2006. http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/#c11=&c17=&c5=all&c0=5&b_start=0. Accessed 25 June 2012.
 - Fernando AL Pacheco, Luís F Sanches Fernandes, 2013. The multivariate statistical structure of DRASTIC model. *Journal of Hydrology* (2013) 476: 442-459. DOI 10.1016/j. 2012.11.020.
 - Foster SSD, 1987. Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. Van Duijvenbooden W, Van Waegeningh HG (Eds) *Vulnerability of soil and groundwater to pollutants*. Proceedings and Information 38. TNO Committee on Hydrological Research, the Hague, pp 69–86.
 - Francés A, Paralta E, Fernandes J, Ribeiro L, 2002. Development and application in the Alentejo region of a method to assess the vulnerability of groundwater to diffuse agricultural pollution: The susceptibility index. Ribeiro L (Eds) *FGR'01 - 3rd International conference on future groundwater resources at risk*, Lisbon. pp 35–44.
 - Goovaerts, P, 1997. *Geostatistics for natural resources evaluation*. New York: Oxford 338 University Press.
 - Hamza MH, Added A, Rodríguez R, Abdeljaoued S, Ben Mammou A, 2006. A GIS-based DRASTIC vulnerability and net recharge reassessment in an aquifer of a semi-arid region (Metline-Ras Jebel-Raf Raf aquifer, Northern Tunisia). *J Environ Manage* 84:12–19.
 - Insaf Mekki, Frederic Jacob, Serge Marlet, Wafa Ghazouani, 2013. Management of groundwater resources in relation to oasis sustainability: The case of the Nefzawa region in Tunisia. *Journal of Environmental Management*. (2013) 121: 142-151. DOI 10.1016/j. 2013.02.041.
 - Instituto Geográfico Nacional Spain. Modelo Digital Del Terreno – MDET25. Centro de Descargas del Centro Nacional de Información Geográfica. <http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/index.jsp>. Accessed 8 October 2012.
 - Instituto Geológico y Minero de España. Mapa Geológico de España. <http://www.igme.es/internet/cartografia/cartografia/magna50.asp?hoja=342&bis=>. Accessed 15 December 2012.
 - Instituto Nacional de Estadística. Padrón, Población por municipios. <http://www.ine.es/jaxi/menu.do?type=pcaxis&path=%2Ft20%2Fe260&file=inebase&L239=0>. Accessed 24 May 2013.
 - Instituto Tecnológico Agrario de Castilla y León. Cartography-Ortofotografía. http://ftp.itacyl.es/cartografia/01_Ortofotografia/. Accessed 14 January 2013.
 - Jamrah A, Al-Futaisi A, Rajmohan N, Al-Yaroubi S, 2008. Assessment of groundwater vulnerability in the coastal region of Oman using DRASTIC index method in GIS environment. *Environ Monit Assess* 147:125–138. DOI:10.1007/s10661-007-0104-6.
 - Junjie Wang, Jiangtao He, Honghan Chen, 2012. Assessment of groundwater contamination risk using hazard quantification, a modified DRASTIC model and groundwater value, Beijing Plain, China. *Science of the Total Environment*. (2012) 432: 216-226 DOI 10.1016/j. 2012.06.005.
 - Lobo-Ferreira JP, Oliveira MM, 1993. Development of an inventory of the groundwater resources of Portugal: characterization of groundwater resources and DRASTIC vulnerability mapping of the aquifers of Portugal (in Portuguese). LNEC Report 194/93, GIAS/DH.
 - Mendes E, 2006. *Perímetros de Proteção de Captações de Água Subterrânea para Consumo Humano em Zonas de Montanha. Caso de estudo da Cidade da Covilhã*. Universidade da Beira Interior. Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura. Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre.
 - Ministerio de Medio Ambiente. 2000. *Libro Blanco del Agua en España*, España.
 - Moratalla Á, Alday JGG, Sanz D, Castaño S, Heras JDL, 2011. Evaluation of a GIS-Based integrated vulnerability risk assessment for the mancha oriental system (SE Spain). *Water Resour Manag* 25: 3677–3697. DOI:10.1007/s11269-011-9876-0.



- M. T. D. Albuquerque, G. Sanz, S. F. Oliveira, R. Martínez-Alegría & I. M. H. R. Antunes, 2013, Spatio-Temporal Groundwater Vulnerability Assessment - A Coupled Remote Sensing and GIS Approach for Historical *Land Cover* Reconstruction, *Water Resour Manage* (2013) 27:4509–4526 DOI 10.1007/s11269-013-0422-0
- Paralta EA, Francés AP, Ribeiro LF, 2005. Avaliação da Vulnerabilidade do Sistema Aquífero dos Gabros de Beja e Análise Crítica das Redes de Monitorização no Contato da Directiva da Água. 7º SILUSBA - Simpósio Internacional de Hidráulica e Recursos dos Países de Língua Oficial Portuguesa. Évora.
- R Martínez-Alegría, C Ordóñez, J Taboada, 2003. A Conceptual Model for Analyzing the Risks Involved in the Transportation of Hazardous Goods: Implementation in a Geographic Information System. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*. Volume 9, Issue 3.
- Ribeiro L, 2000. Desenvolvimento de um índice para avaliar a susceptibilidade dos aquíferos à contaminação. ERSHA-CVRM (Unpublished results) pp 8.
- Ribeiro L, Serra E, Paralta E, Nascimento J, 2003. Nitrate pollution in hard rock formations: vulnerability and risk evaluation of geomathematical methods in Serpa-Brinches aquifer (South Portugal). Krasny, J., Hrkal, Z., Bruthans, J. (Eds), *Proceedings of International Conference on Groundwater in Fractured Rocks*: 377–378.
- Ryan P, Loe R, Armitage D, 2012. A systematic review of water vulnerability assessment tools. *Water Resour Manag* 26:4327–4346. DOI:10.1007/s11269-012-0147-5.
- Sanz G, 2010. Modelo Hidrogeológico para la Gestión Sostenible del Acuífero Superficial Calcáreo de los Montes Torozos. University of Vigo. Department of Natural Resources and Environmental Engineering. E.T.S. de Enxeñaría de Minas. Proyecto de fin de Master.
- Shukla S, Mostaghimi S, Shanholt VO, Collins MC, Ross BB, 2000. A County-Level Assessment of Ground Water Contamination by Pesticides. *Ground Water Monit. Rev.*, 20(1): 104– 119.
- Singh CK, Shashtri S, Mukherjee S, Kumari R, Avatar R, Singh A, Singh RP, 2011. Application of GWQI to assess effect of land use change on groundwater quality in lower Shiwaliks of Punjab: remote sensing and GIS based approach. *Water Resour Manag* 25:1881–1898. DOI:10.1007/s11269-011-9779-0.
- Stigter TY, Ribeiro L, Carvalho Dill, 2006. Application of a groundwater quality index as an assessment and communication tool in agro-environmental policies—two Portuguese case studies. *J Hydrol* 327:578–591.
- Turc L, 1961. Estimation of irrigation water requirements, potential evapotranspiration: a simple climatic formula evolved up to date. *Annals of Agronomy* 12: 13-49.
- Vishnu, P.P., Shrestha, S., Chapagain, S.K. and Kazama, F. 2011. A framework for measuring groundwater sustainability, *Environmental Science & Policy*. (2011) 14, 4: 396-407, DOI 10.1016/j.2011.03.008.



4.3 SIMULACIÓN DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES

Respecto a la simulación de contaminantes, se han realizado dos simulaciones, una teórica de mercancías peligrosas basada en el modelo, y otra basada en ensayos de campo prácticos sobre sustancias peligrosas. Los trabajos de simulación y dispersión de contaminante han sido posibles gracias a la colaboración de la oficina de Protección Civil de la Delegación del Gobierno en Castilla y León.

4.3.1 Unconfined aquifer vulnerability related to topical pollution episodes – Montes Torozos (Spain)

International workshop “Uranium, Environment and Public Health”, UrEnv 2013

Unconfined Aquifer Vulnerability Related to Topical Pollution – Montes Torozos (Spain)

Martínez-Alegría R^a, Sanz G^{b*}, Taboada, J^b, Albuquerque MTD^c, Antunes IMHR^c

^aUniversidad Europea Miguel de Cervantes, Valladolid 47002, Spain

^bUniversidad de Vigo, Vigo 36310, Spain

^cPolytechnic Institute of Castelo Branco and CIGAR, Castelo Branco 6000, Portugal

Abstract

In this paper it is shown the vulnerability model fitted to the unconfined aquifer of Montes Torozos (Spain). The most dangerous elements were taken under consideration (e.g. Hydrocarbons, explosives, radioactive materials). The identification of their source location and the transportation of dangerous goods across them has been the starting point of this study. The simulations took into consideration the connection between the capital of the province (Valladolid) to Villanubla airport and between Valladolid to the electrical transformer substation, located in the south-west edge of the hydrogeological unit of the Montes Torozos.

© 2014 The Authors. Published by Elsevier B.V.

Selection and peer-review under responsibility of the Instituto Politécnico de Castelo Branco.

Keywords: Vulnerability; Hazardous goods; DRASTIC; Susceptibility index (SI); Transportation; Radioactive materials

1. Introduction

The perception of water as a limited and fragile resource, due to deterioration by human actions, represents a limiting factor when considering the region's sustainable development.

The volume of water in Monte Torozos belongs to the Douroriver watershed and goes through the provinces of Valladolid and Palencia (Spain), occupying an area of 1000 km² (Fig.1). The population exceeds 47000 inhabitants

* Corresponding author. Tel.: +34 983 001 000; fax:+34 983 278 958.

E-mail address: gsanz@uemc.es

spread over 48 municipalities. A dry Mediterranean climate predominates in the study area, with a median temperature value of 11.14°C, precipitation of 456 mm/year and evapotranspiration of 312 mm/year, as the main climatic features^{1,2}.

The water balance shows 178 mm/year of useful rainfall that can reach and recharge the aquifer. Through processes of infiltration the substances present on the surface, accordingly to the respective dissolution constants and the particle size are transported, reaching the groundwater.

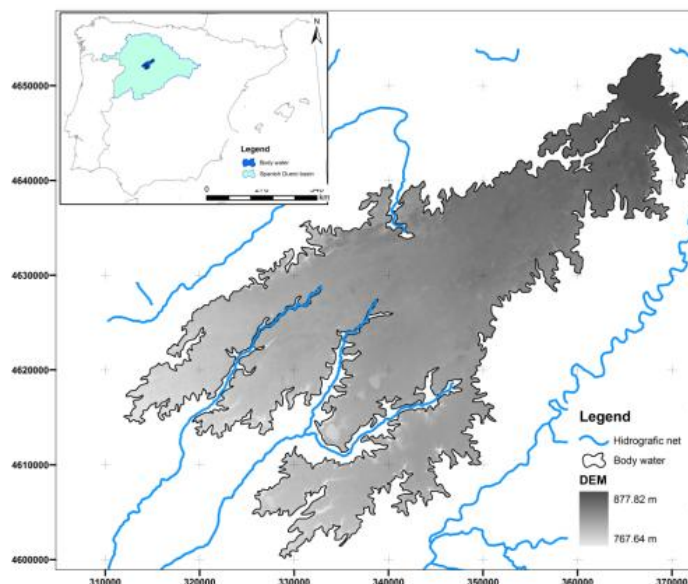


Fig. 1. Montes Torozos study area.

The Tertiary sedimentary free aquifer is included in the Douro river watershed with a slight tilting towards southwest. Geologically, could be considered as a horizontal limestone strata laying on a detrital mixed formation of evaporate facies of the Facies Cuestas³. The Facies Cuestas is the lower substrate formed by limestone and a series of soft clay loam-gypsum materials. The limestones are grey, hard and showing a microcrystalline structure in banks of varying thickness separated by marly intercalations. The area corresponds to a tectonic zone³ only modified by diagenetic fracturation, allowing the development of karst channels⁴.

The aquifer is included in the Watershed's Management Plan 2009 corresponding to the old unit 07 of the Hydrological Plan for the Douro Watershed⁵. The Torozos aquifer (ID 400032), consists on horizontal limestone (Miocene) with loamy collations supported on the detrital Tertiary (units 06 and 08)⁵. Its overall thickness is approximately 6-10 meters, but can reach 30 meters promptly and works as an unconfined aquifer. The aquifer recharge is due to rainfall and drains radially, along the aquifer's perimeter, through spring and feeding the river's base flow and the extraction wells. The aquifer shows issues of quick crack of the water levels due to its low regulatory capacity. The amount of water resources is enough, showing an annual or biennial regulatory capacity, depending on rainfall to sustain the supply of the population, though. Due to its nature, the unconfined aquifer is extremely vulnerable to topical and diffuse pollution⁶.

The occurrence of dangerous substances in core sites such as the airport of Villanubla, the electrical transformer plant of Mudarra, the Villanubla prison and the Villanubla industrial area combined with the traffic of dangerous goods through the entire area makes the Torozos aquifer a sensitive unit in need of accurate monitoring strategies.

The aim of this paper is a risk analysis and potential effects of an accidental spillage into the vulnerable aquifer of Montes Torozos using the DRASTIC⁷ index map (Fig. 2). Considering the different nature of the impacting substances a contaminant type was chosen for the dispersion inferences mapping.

The regulatory framework governing road transport of dangerous goods in Spain is regulated by the European Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road (ADR) in its latest version of 2013. The Royal Decree 551/2006 laying down transport operations of dangerous goods by road in Spanish territory are regulated, and Royal Decree 1566/1999 safety advisers for the transport of dangerous goods by road, rail or in land waterway, as amended by the final first provision of the Royal Decree 551 / 2006 as stated in the National Institute for Safety and Health at Work. Dangerous goods are defined as substances and articles which transport by road is prohibited or authorized only under the conditions laid down in ADR or other specific provisions.

The identification of dangerous goods source location and the transportation of them has been the starting point of this study. This work aims the fitting of a numerical dispersion model for the most likely sources of emission and impact of pollutants into groundwater. The dispersion simulations took into consideration the connection between Valladolid,

the capital of the province, to Villanubla airport and between Valladolid to the electrical transformer substation, located in the south-west edge of the hydrogeological unit of the Montes Torozos.

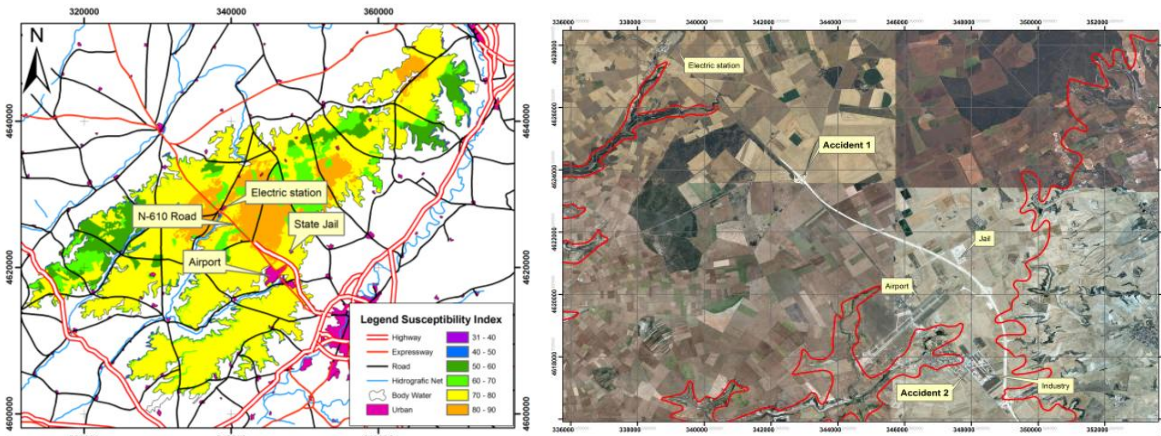


Fig. 2. Location map of vulnerability index and accident examples.

2. Methodology

The presented work is the result of a cross-sectional analysis of the processes of topical source pollution, associated with the transport of dangerous goods. In a first step, vulnerability was computed following the DRASTIC approach methodology⁸. Risk assessment related to the transport of dangerous goods was computed following the methodology described⁹ and summarized in the equation (1).

$$R = P_{HG} \left[P_e \left[n_a \left(\frac{(H_i + H_r + H_p)}{3} + H_{GO} \right) + \left(\frac{\sum_i^n Vp_i}{n} + \frac{\sum_j^m Va_j}{m} \right) \right] \right] \quad (1)$$

Where: R Estimated risk level; P_{HG} occurrence probability; P_e Hazard level per accident; n_a is a weighting factor; H_i , H_r , H_p y H_{GO} Hazard level per product; V_p y V_a population and environmental's intrinsic and extrinsic vulnerability.

Taking into consideration the legal background and simulacrum experiences carried out by the community of Castilla and Leon¹⁰ it is possible to validate this methodology concerning the risk analysis associated to accidental releases of dangerous goods (class 7 of ADR).

The traffic of dangerous goods in the N-610 road (Fig. 2) has been estimated through the evaluation of the tax maps of 2012 (Ministry of Economic Development 2012)¹¹. This itinerary has been selected as it is particularly sensitive and vulnerable with moderate traffic (4500 vehicles a year). Therefore, it is possible to see that it has a priority path, although not the first choice one as it is a national road only partially utilized. Supply trucks cross through targeting the four major consumers such as the power plant, airport, prison and Villanubla's industrial area (Fig. 2). In the remaining study area, the road network shows mainly capillary flow of oil and gas supply.

A virtual topical discharge was considered for the pollutants simulation fitting. After choosing the emission focus, the pollutants' dispersion model was constructed accordingly to a steady-state model, previously fitted to the aquifer. Generally, the spread of contaminant propagation will be determined by the main flow direction, hydrogeological parameters and physico-chemical characteristics of the pollutants under consideration. For the hydrogeological model construction was used the Visual Modflow¹² supported by a geographic information system developed in gv-SIG software¹³.

3. Results and Discussion

3.1 The hydrogeological model

The aquifer's hydrogeological conceptual model can be represented by the following scheme (Fig. 3), where the existing inputs and outputs are represented.

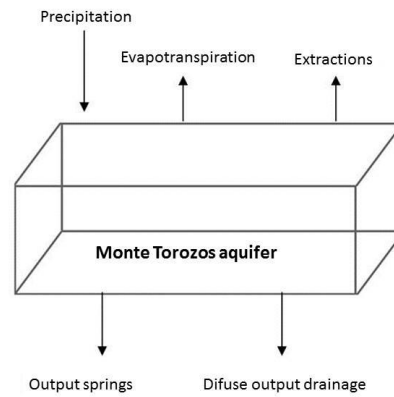


Fig.3. Aquifer's hidrogeological conceptual model.

The starting dataset concerns to the following attribute¹:

- ETR - homogeneous and isotropic, estimated from the Turc's equation (312 mm/year)
- Recharge - homogeneous and isotropic precipitation, minus the ETR (178 mm/year)
- Edge Drainage - estimated (10 hm³/year)
- Initial Piezometric has been computed using visual modflow
- 211 pumping wells grouped into 63 wells fields (total extracted volume 9 hm³/year)
- 32 perimeter springs (output 10 hm³/year)

The computed outputs are: parametric evolution, flow vectors, fluid balance, and direction of the particles over a year (Fig. 4).

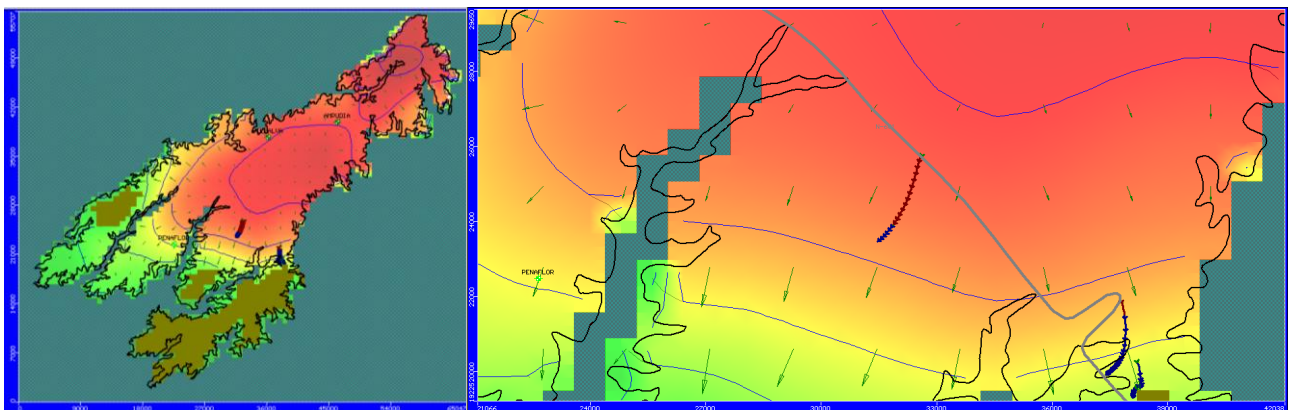


Fig. 4. Model outputs..

The nature of studied dangerous goods is highly variable. Adopting a theoretical constant solubility it is possible to study the dispersion rates for the substances under consideration. Taking into account the insolubility of the four major types of oxidized uranium, it was adopted an average solubility of 0.006g per 100 ml of uranium which is the solubility of the di-hydrate UO_4 at 20° C. This low solubility, along with the very low frequency of accidents involved in transporting such goods, shows one accident for more than 74 transport operations in 2012 where more than 350000 kilograms of uranium oxides travelled throughout the Spanish territory¹⁴.

3.2 Risk Analysis

Considering the boundary conditions, the simulated worst scenario for the proposed accident shows:

- When the accident has occurred, the probability is $P_{HG} = 1$
- The worst possible accident considered would carry a maximum value $P_e = 6$
- The hazard by product type is considered as the maximum envelope of the materials of Class 7 and it would be $R_{mp} = 3.5$
- The used weighting factor n_a takes a value of 4.
- The estimated vulnerability have an estimated value of $V = 28$ (scale of 1 to 32), considered as extremely high

Therefore, the level of severity and risk estimated would be: $R = 252$ on a scale of 0 to 288, considered as very high.



4. Conclusions

1. The studied aquifer is very vulnerable to contamination processes;
2. Due to the hydrogeological dynamics of the aquifer, the accidental releases of ADR's Class 7, have a very high gravity;
3. Despite the very low probability of an accident, there is a high risk due to the high vulnerability and slow pollutant's dispersion;
4. This slowness means lower short-term risk, but a very high long-term risk for both accumulation of such substances and it's deferred over long periods of time effects.

Acknowledgements

This research was carried out by Polytechnic Institute of Castelo Branco (Portugal) and the European University of Miguel Cervantes from Valladolid UEMC (Spain).

References

1. Sanz G. *Modelo Hidrogeológico para la gestión sostenible del acuífero superficial calcáreo de los Montes Torozos*. Proyecto Fin de Máster. Universidad de Vigo. Escola Técnica Superior de Enxeñeiros de Minas; 2010.
2. Spiro GT, Stigliani WM. *Química Medioambiental*. 2nd Ed, Cap. 3, 14; 2003.
3. García FJ, Moreno F, Nozal F. *Neotectonic and Associate Seismicity in Northwestern Duero Basin*. Inst Geográfico Nacional-España; 1991.
4. SIEMCALSA - Sociedad de Investigación y Explotación Minera de Castilla y León, S.A. *Mapa Geológico y Minero de Castilla y León*, 1:400000. SIEMCALSA, Valladolid. ISBN 84-7846-643-6; 1997.
5. CHD - Confederación Hidrográfica del Duero. *Plan Hidrográfico de la Cuenca Del Duero*. http://www.mirame.chduero.es/DMA Duero_09/masaSubterraneaHidrogeologia.faces, last access 12/07/2013; 2009.
6. Sánchez FJ. *Los grandes acuíferos de la Cuenca del Duero*. Hidrología e Hidrogeología del Departamento de Geología de la Universidad de Salamanca. <http://www.unizar.es/fnca/duero/docu/p105.pdf>, last access 19/11/2013; 2013.
7. Aller L, Bennet, T, Lehr, JH, Petty, RJ, Hackett, G (1987) DRASTIC: a standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings. U.S. Environmental Protection Agency (Eds), EPA/600/2-87/035, Oklahoma, 641 pp.
8. Albuquerque MTD, Sanz G, Oliveira SF, Martínez-Alegría R, Antunes IMHR. Spatio-Temporal Groundwater Vulnerability Assessment - A Coupled Remote Sensing and GIS Approach for Historical Land Cover Reconstruction, *Water ResourManag* 2013; **27**:4509-4526.
9. Martínez-Alegría R, Ordóñez C, Taboada J. A Conceptual Model for Analyzing the Risks Involved in the Transportation of Hazardous Goods: Implementation in a Geographic Information System. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal* 2003; **19**:3.
10. Servicio de Protección y Asistencia Ciudadana de la Agencia de Protección Civil. *Simulacro Accidente en el Transporte de Mercancías Peligrosas por Carretera Villalpando (Zamora)*. Plan Especial de Protección Civil Ante Emergencias por Accidentes en el Transporte de Mercancías Peligrosas por Carretera y Ferrocarril. MPCyL. Comunidad Autónoma de Castilla y León. Junta de Castilla y León. http://www.jcyl.es/web/jcyl/binarios/532/806/SIMULACRO%20MMPP_ZAMORA_2013_web.pdf?blobheader=application%2Fpdf%3Bcharset%3DUTF-8&blobheadername1=Cache-Control&blobheadername2=Expires&blobheadername3=Site&blobheadervalue1=no-store%2Cno-cache%2Cmust-revalidate&blobheadervalue2=0&blobheadervalue3=JCYL_ProteccionConsumo&blobnocache=true; last access 15/11/2013.
11. Ministerio de Fomento. 2012. Mapa de Tráfico Nacional. Disponible en: <http://www.fomento.es/NR/rdonlyres/6B349269-A03D-45CA-8AEC-0AF11A7EA168/119364/MapaIntensidad2012.pdf>. Consultado 15/11/2013
12. Schlumberger Water Services. Visual MODFLOW 2011.1, User's Manual; 2011.
13. gvSIG Association. 2010. gvSIG Desktop 1.11. Manual de usuario. http://downloads.gvsig.org/download/gvsig-desktop/dists/1.11.0/docs/gvSIG-1_11-man-v1-es.pdf, last access 19/11/2013; 2010.
14. CSN - Consejo de Seguridad Nuclear. Informe del Consejo de Seguridad Nuclear al Congreso de los Diputados y al Senado del Año 2012. Colección: Informes del CSN, referencia INF-01.12- ISSN: 1576-5237; 2012.



4.3.2 Vulnerabilidad del acuífero de los Montes Torozos por procesos de contaminación de soluciones egelantes



VIII Congreso Ibérico
de Geoquímica
XVII Semana
de Geoquímica

VULNERABILIDAD DEL ACUÍFERO DE LOS MONTES TOROZOS POR PROCESOS DE CONTAMINACIÓN DE SOLUCIONES EGELANTES

Sanz Lobón, G^{1*}; Sánchez González, S²; Montequi Martín, I³; Martínez-Alegria Lopéz, R⁴.

^{1*} Consultor Independiente, Licenciado en Ciencias Ambientales: gsanz@uemc.es

² Consultor Independiente, Licenciado en Ciencias Ambientales: ssanchez@uemc.es

³ Universidad Europea Miguel de Cervantes (UEMC); Dra. Ciencias Químicas; imontequi@uemc.es

⁴ UEMC & Delegación del Gobierno en Castilla y León; Dr. Ingeniero de Minas; rmartinez@uemc.es

Resumen

El estudio plantea identificar y comprobar los posibles impactos ambientales debidos al empleo de sustancias salinas egelantes (cloruro sódico y cloruro cálcico) para el mantenimiento de las condiciones de adherencia y seguridad en la red de carreteras.

La utilización de estas sales, reduce la temperatura de congelación del agua y evita en el invierno la formación de placas de hielo sobre las superficies asfaltadas. No obstante su frecuente y extendido uso puede ser una fuente de inmisión de contaminantes sobre los suelos y las masas de agua existentes en las proximidades.

En esta comunicación se exponen los resultados analíticos encontrados en las zonas contiguas a la carretera N-601, de la red nacional del Estado, en el término municipal de La Mudarra (Valladolid, España), que discurre sobre el acuífero libre del páramo de los Montes Torozos.

Los resultados muestran la existencia de apreciables concentraciones de dichas sustancias en los suelos edáficos, lo que parece indicar la existencia de un cierto impacto de estas sales. Sin embargo, no se han detectado aumentos significativos de estas sustancias en las aguas que drenan el páramo tras infiltrarse por el suelo, por lo que se plantean distintas hipótesis que permitan explicar este comportamiento.

Palabras clave: cloruro cálcico, cloruro sódico, contaminación de suelos, sustancias egelantes, vulnerabilidad

Abstract

The aim of this paper is the identification and corroboration of environmental impacts arising from the use of sodium chloride and calcium chloride in the maintenance of safe roads. These saline substances produce the decrease of the water freezing temperature to prevent ice forms on the asphalt. However, its use is can often be considered as a source of diffuse pollutants emission.

The analytical results were obtained in the adjacent areas of the N-601 in the municipality of La Mudarra (Valladolid, Spain), passing over the unconfined aquifer Montes Torozos Plateau. The results show the existence of significant concentrations of these substances in soil, suggesting the possible existence of an impact due to these salts. However, it was not detected a significant increase of these substances, in the waters draining the unconfined aquifer after infiltrating into the ground.

Keywords: calcium chloride, sodium chloride, soil contamination, vulnerability.



VULNERABILIDAD DEL ACUÍFERO DE LOS MONTES TOROZOS POR PROCESOS DE CONTAMINACIÓN DE SOLUCIONES EGELANTES

Sanz Lobón, G^{1*}; Sánchez González, S²; Montequi Martín, I³; Martínez-Alegría López, R⁴.

^{1*} Consultor Independiente, Licenciado en Ciencias Ambientales: gsanz@uemc.es

² Consultor Independiente, Licenciado en Ciencias Ambientales: ssanchez@uemc.es

³ Universidad Europea Miguel de Cervantes (UEMC); Dra. Ciencias Químicas; imontequi@uemc.es

⁴ UEMC & Delegación del Gobierno en Castilla y León; Dr. Ingeniero de Minas; rmartinez@uemc.es

Resumen

El estudio plantea identificar y comprobar los posibles impactos ambientales debidos al empleo de sustancias salinas egelantes (cloruro sódico y cloruro cálcico) para el mantenimiento de las condiciones de adherencia y seguridad en la red de carreteras.

La utilización de estas sales, reduce la temperatura de congelación del agua y evita en el invierno la formación de placas de hielo sobre las superficies asfaltadas. No obstante su frecuente y extendido uso puede ser una fuente de inmisión de contaminantes sobre los suelos y las masas de agua existentes en las proximidades.

En esta comunicación se exponen los resultados analíticos encontrados en las zonas contiguas a la carretera N-601, de la red nacional del Estado, en el término municipal de la Mudarra (Valladolid, España), que discurre sobre el acuífero libre del páramo de los Montes Torozos.

Los resultados muestran la existencia de apreciables concentraciones de dichas sustancias en los suelos edáficos, lo que parece indicar la existencia de un cierto impacto de estas sales. Sin embargo, no se han detectado aumentos significativos de estas sustancias en las aguas que drenan el páramo tras infiltrarse por el suelo, por lo que se plantean distintas hipótesis que permitan explicar este comportamiento.

Palabras clave: cloruro cálcico, cloruro sódico, contaminación de suelos, sustancias egelantes, vulnerabilidad.

Abstract

The aim of this paper is the identification and corroboration of environmental impacts arising from the use of sodium chloride and calcium chloride in the maintenance of safe roads. These saline substances produce the decrease of the water freezing temperature to prevent ice forms on the asphalt. However, its use is can often be considered as a source of diffuse pollutants emission.

The analytical results were obtained in the adjacent areas of the N-601 in the municipality of La Mudarra (Valladolid, Spain), passing over the unconfined aquifer Montes Torozos Plateau. The results show the existence of significant concentrations of these substances in soil, suggesting the possible existence of an impact due to these salts. However, it was not detected a significant increase of these substances, in the waters draining the unconfined aquifer after infiltrating into the ground.

Keywords: calcium chloride, sodium chloride, soil contamination, vulnerability.

1. Introducción y objetivos

Las condiciones meteorológicas extremas de este invierno (2010/2011) en la Península Ibérica se han caracterizado por unas bajas temperaturas alcanzando valores, que en algunos casos han rebasado el límite de -10 °C durante periodos de tiempo más o menos largos, que junto con las cuantiosas precipitaciones y fenómenos relacionados como nieblas y la humedad relativa de la baja atmósfera, y la altitud, han dado como resultado la formación de hielo en las infraestructuras de comunicación.

Obviamente las placas de hielo en la superficie de las carreteras, supone un gran del peligro para la seguridad vial y no aceptable para vías muy transitadas. Para reducir el riesgo de accidentes se aplican sustancias egelantes a la calzada, como cloruro sódico y cloruro cálcico, estas sustancias evitan la formación de placas de hielo y favorecen el deshielo. Pero su utilización puede tener consecuencias ambientales, debido a su gran solubilidad y movilidad iónica. La solución salina resultante puede penetrar en el suelo y difundirse a través de él, siguiendo gradientes de concentración y presión hidráulica, pudiendo crear efectos de contaminación difusa a lo largo de las zonas colindantes a las infraestructuras lineales.

Esta problemática ha sido estudiada en la carretera Nacional N-601 (Valladolid-León), en el término municipal de La Mudarra, sobre el borde del páramo de los Montes Torozos, en la provincia de Valladolid. Este emplazamiento se ha seleccionado debido a la gran vulnerabilidad que presenta el acuífero, sobre el que se sitúa la carretera y por la proximidad de manantiales que lo drenan.



2. Materiales y Métodos

Para la caracterización de la problemática del uso de los cloruros sódicos y cálcicos en las carreteras, se ha estudiado una serie de variables ambientales, principalmente edáficas, geológicas e hidrológicas, planteando un sistema de análisis de cada una de ellas, de tal forma que permitan acometer los objetivos del proyecto.

El proceso metodológico aplicado responde a:

- Trabajo de Campo:
 - o Descripción de la zona.
 - o Muestreo
- Trabajo de Gabinete:
 - o Documentación cartográfica.
 - o Revisión y documentación bibliográfica.
 - o Procesado de datos.
 - o Incorporación a un Sistema de Información Geográfica.

2.1 Descripción de la zona

La selección del emplazamiento de la zona de estudio y la localización más adecuada de los puntos de muestreo se ha realizado mediante un estudio preliminar de la zona teniendo en cuenta la topografía, la geología y geomorfología, y el comportamiento hidrológico de la zona. Esta labor se ha apoyado en el análisis de la cartografía geológica del Instituto Geológico y Minero de España (IGME) en la serie MAGNA 1:50.000 (2ª Serie) en la hoja 342 de Villabragima (8), en la altimetría disponible en el enlace FTP del Instituto tecnológico Agrario de Castilla y León (10), y las ortofotografías del Plan Nacional de Ortofotografía (PNOA) de la hoja 342 del año 2009 con un *pixel* de 50cm de lado en RGB proyectadas en el huso 30 del sistema de referencia ETRS89.

La zona de estudio se ubica al borde del páramo de los Montes Torozos, en el núcleo urbano de La Mudarra, junto al nacimiento del río Hornija. La región se encuentra al Este de la cuenca del Duero, en el área comprendida por las cuencas de los ríos Pisuerga, Carrión y Sequillo en la subregión Centro o de los Páramos.

2.1.2 Climatología

La caracterización del clima se ha realizado con series temporales desde 1937 a 2011, medidos en la estación meteorológica de Villanubla (código 539) (Valladolid) de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) (21).

La caracterización climática se ha realizado un análisis estadístico basado en el cálculo de medias y desviaciones estándar, usando Microsoft Office Excel 2007. El cálculo de las variables físicas se realizó con la base teórica de la Web de Hidrología e Hidrogeología del Departamento de Geología de la Universidad de Salamanca, Javier Sánchez (18), analizándose las siguientes variables: precipitación, temperatura, evapotranspiración y lluvia útil.

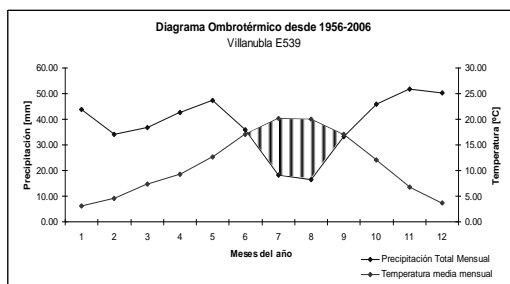


Figura 1: diagrama ombrotérmico de la estación meteorológica de Villanubla. Datos de la AEMET.

Los resultados obtenidos permiten clasificar el clima como mediterráneo continentalizado, que se corresponde con una pluviometría de 400 a 450 mm/año, una temperatura de 11,11° C, una Evapotranspiración por Thornthwaite de 350 mm/año y por Turc de 300 mm/año, y unos vientos dominantes de componente Norte-Este. Estos datos se traducen en el diagrama ombrotérmico de la figura 1, que se coinciden con los bibliográficos de Ballester et al 1983 (1).

Del análisis de estos datos se desprende, como se puede observar en la tabla 1, el mes de febrero ha sido especialmente frío pero la falta de precipitaciones hace que el estudio de la difusión de las sales sea muy complicado.

Tabla 1: valores de temperatura y precipitación medios mensuales y medios de la serie de larga

TEMPERATURA	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
2010-11	5.70	3.50	4.20	5.60	7.40
Media 1936-2011	6.84	3.63	3.13	4.68	7.31
PRECIPITACION	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
2010-11	32.60	109.00	42.80	19.10	40.20
Media 1936-2011	50.57	51.54	43.45	34.13	36.10



Por otra parte las temperaturas moderadas de noviembre y marzo, hace que las heladas sean puntuales de poco prolongadas en el tiempo, por lo que los datos utilizados han sido los de diciembre y enero.

2.1.2 Geología

La geología de los Montes Torozos ha sido dibujada durante el Terciario, siendo modificada en los últimos momentos de la Orogenia Alpina, dando lugar a un cierto basculamiento de la unidad geo-estructural hacia el oeste. El páramo está constituido por una superficie estructural de calizas sensiblemente horizontales, que reposan sobre una capa de materiales impermeables de origen mixto detrítico evaporítico de la Facies Cuestas, tal y como se observa en el perfil geológico (figura 2). La Facies de las Cuestas constituye el substrato inferior a las calizas y está formado por una serie de materiales blandos arcillosos margoso-yesíferos. Las calizas son de color gris, duras y con una estructura microcristalina, y se encuentran en bancos de espesor variable separados por intercalaciones margosas. Se trata de una zona atectónica, únicamente modificada por la fracturación diagenética, que permite el desarrollo de formaciones y canales kársticos por la acción erosiva del agua (22).

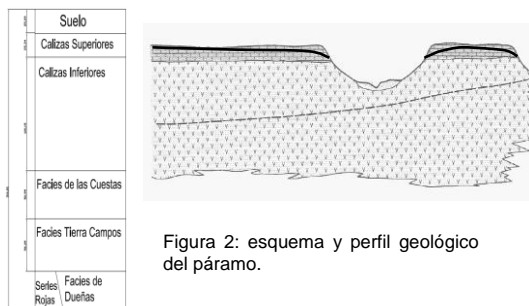


Figura 2: esquema y perfil geológico del páramo.

2.1.3 Edafología

Los suelos de la zona han sido clasificados de acuerdo con la clasificación del United States Department of Agricultura (USDA). Los suelos que encontramos en el Páramo de los Torozos, según el Atlas Nacional de suelos, son: Inceptisol Ochrept Xerochrept Xerorthent Haploxeralf, en nuestro caso, posee menos de un 8% de arcilla en uno o más subhorizontes entre los 20 y 50 cm a partir de la superficie mineral; un contacto lítico situado a menos de 35 cm, un epipedón Ócrico; un régimen de precipitaciones Xeric; una textura areno-limosa; un color pardo rojizo, debido a los óxidos de hierro, a la materia orgánica y a la arcilla; un pH que se sitúa entre 7 y 8 (característico de los suelos agrícolas); una concentración de nitratos alta (mayor a 25 ppm) y baja de amonio (menor de 12 ppm); y una concentración de fosfatos, sulfatos, calcio, y cloruros bajas, lo que confiere al suelo una estructura estable bien drenada y aireada (19).

2.1.4 Hidrogeología

La unidad hidrogeológica se corresponde según el Plan Hidrológico de la Cuenca del Duero 2009, con la masa de agua superficial el Páramo de Torozos (identificador 400032), situada en el centro de la cuenca, próxima al cauce del Duero, está constituida por calizas Pontienenses (Mioceno Superior) horizontales con intercalaciones margosas apoyadas sobre el Terciario detrítico (Unidades 06 y 08). Su espesor general es de 6 a 10 metros, aunque puntualmente puede alcanzar los 30 metros. Funciona como un acuífero libre colgado. El agua del acuífero procede de las precipitaciones, que se drenan radialmente por manantiales perimetrales alimentando el caudal base de los ríos y por extracciones de pozos. Presenta problemas de descenso rápido de los niveles debido a su poca capacidad reguladora. Por estas características se puede decir que el acuífero dispone de una cantidad de recurso hídrico suficiente con una capacidad reguladora anual o bianual según las precipitaciones, para sustentar el abastecimiento de la población y sus actividades, pero debido a su naturaleza de acuífero libre es muy vulnerable a la inmisión directa de contaminantes (14).

Respecto al poblamiento y sus características decir que la población existente dentro del área de estudio, en el año 2008, era de 196 habitantes con una densidad de población de 10 habitantes por km² (9). El municipio posee una tasa de crecimiento prácticamente nula, y solo en el último año ha experimentado un crecimiento en la población debido a la proximidad a la ciudad de Valladolid (28 km, por la N-601). La población se caracteriza por un fuerte envejecimiento y masculinización de la población (2).

A partir de esta caracterización, se determinaron seis puntos de muestreo de suelo, siguiendo la orientación y pendiente de la zona para la recepción y recogida del agua de lluvia que lava la carretera, y un punto de toma de muestra de agua que coincide con la emanación de agua del acuífero libre, situado en el contacto de los horizontes permeable-impermeable, en la fuente de San Antonio (La Mudarra).

2.2 Muestreo

Para la selección de los puntos de muestreo se ha teniendo en cuenta: la localización del foco contaminante, que coincide con la calzada de la carretera N-601, la accesibilidad al resto de puntos de muestreo; y la orientación y pendiente de la zona para la recepción y recogida del agua de lluvia que lava la carretera.

El muestreo se realizó en los meses de diciembre y enero de 2010 y 2011 respectivamente, coincidiendo con los meses más fríos, tras periodos en los que se registraron temperatura inferiores a 0° y fenómenos de precipitación que



permitieran la solubilización de las sales de cloro y su difusión por el medio edáfico, en forma disuelta en el agua de lluvia.

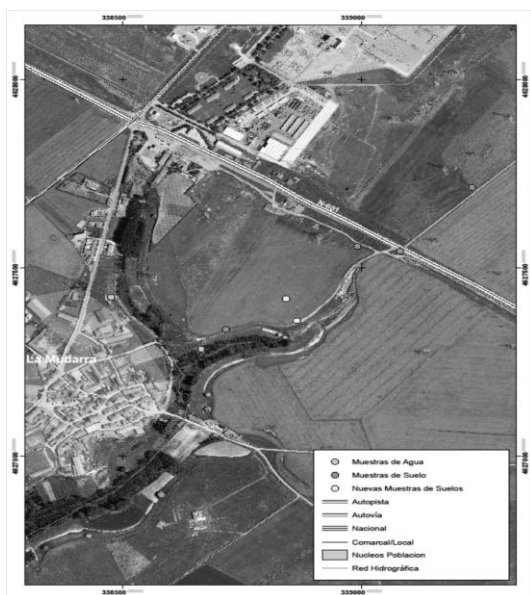


Fig 3 - localización de los puntos de muestreo. Mapa en ETRS89 UTM huso 30 N

Se recogieron muestras de: suelos, siguiendo las especificaciones establecidas en la obra “Técnicas de Análisis de Suelos” de Guitián Ojea, F y Carballas Fernández, T (4); y de agua, según (16). Para el método de suelos se recogen al menos, 2 kg representativos de cada perfil, tomados con cuchillo de campo, completando la descripción del perfil utilizando la ficha modelo del libro, basada en la clasificación de la Soil Taxonomy (S.T.). Respecto al procedimiento de la toma de muestras de agua este manual se basa en el método descrito en el B.O.E. 20-1-1982, estableciendo para la toma de muestra en fuentes, que es necesario dejar fluir el agua durante el período de tiempo, para que la muestra sea verdaderamente representativa, y el recipiente se enjuagará con el agua objeto del muestreo para evitar interferencias externas.

2.3 Documentación cartográfica

Se ha usado como base cartográfica de referencia la información contenida en la Infraestructura de el Sistema de Información Territorial de la Junta de Castilla y León (IDECYL) (12), de la cual se han obtenido las bases de datos alfanuméricas. Las bases gráficas georreferenciadas se han obtenido del FPT del Instituto Tecnológico Agrario de Castilla y León (11).

El estudio geológico de la zona se ha realizado a partir del Mapa Geológico y Minero de Castilla y León a escala 1:400.000 (22) de la Sociedad de Investigación y Explotación Minera de Castilla y León, S.A. (SIEMCALSA) y del MAGNA 1:50.000 (8) del Instituto Geológico y Minero de España (IGME) en concreto la hoja 342 de Villabrágima.

2.4 Revisión bibliográfica

Las principales fuentes documentales en las que se fundamenta este estudio se exponen a continuación.

Para la descripción del entorno se ha utilizado información procedente de la ponencia de “Uso Sostenible de los Recursos Hídricos del Acuífero Libre de los Montes Torozos” del “Congreso sobre Tecnologías del Agua Water’09” (20); y el proyecto fin de carrera “Caracterización y sostenibilidad del acuífero libre de los Montes Torozos” (19).

La metodología empleada para el desarrollo del estudio se ha obtenido del proyecto fin de carrera “Evolución multitemporal de usos en el entorno de las lagunas de Villafáfila” (18).

Los métodos de recogida de muestras en campo y los procedimientos analíticos de suelo en laboratorio se han basado en el libro “Técnicas de Análisis de Suelos” de Francisco Guitián Ojea y Tarsy Carballas Fernández (4). Esta labor ha sido completada con una búsqueda a través de Internet usando el buscador científico Science Direct, obteniéndose 7000 resultados aproximadamente entre los años 2000 y 2010, de los cuales se han utilizado:

- Donald E. Garrett. 2004. Handbook of Lithium and Natural Calcium Chloride (3).
- F.A.M. de Haan y P.J. Zwerman. 1976. Developments in Soil Science (5).
- José A. Morales, Ligbel S. de Graterol y Johan Mesa. Determination of chloride, sulfate and nitrate in groundwater samples by ion chromatography. 2000 (15).
- Weon Joon Leea y Seung-Hyun Kimb. 1999. Methods for Measuring Total Organic Chloride concentrations in soil as Inorganic Chloride Concentrations Using UV Irradiation and Ion Chromatography. (13).
- R. Impensa. 1987. Automotive Traffic Risks for the Environment. Studies in Surface Science and Catalysis (7).



- Beatriz Helena, Rafael Pardo, Marisol Vega, Enrique Barrado, José Manuel Fernández y Luis Fernández. 2000. Temporal evolution of groundwater composition in an alluvial aquifer (Pisuerga River, Spain) by principal component analysis (6).

2.5 Procesado de datos y análisis

La caracterización climática se ha realizado un análisis estadístico basado en el cálculo de medias y desviaciones estándar, usando Microsoft Office Excel 2007. El cálculo de las variables físicas se realizó con la base teórica de la Web de Hidrología e Hidrogeología del Departamento de Geología de la Universidad de Salamanca, analizando: la precipitación, la temperatura, la evapotranspiración y la lluvia útil.

En el laboratorio se ha determinado el pH, la conductividad, la concentración de nitratos y nitritos, y se ha realizado los análisis de las muestras de suelos y de agua para determinar la concentración de cloruros.

Durante los reconocimientos del terreno, la toma de muestras y los análisis de las muestras se realizaron varias fotografías con el fin de documentar y completar todo el proceso.

2.5.1 Técnicas y análisis de laboratorio

Los equipos que se han utilizado para determinar los parámetros de pH, de conductividad, de análisis de suelo, de la concentración de nitratos y nitritos han sido:

- El conductímetro portátil Crison® modelo CM 35 con sensor de temperatura incorporado.
- El pH-metro portátil Crison® modelo PH 25.
- Test de Nitratos 1.10020.0001 1.10020.0002 nitrat-test Merckoquant
- Equipo de Análisis de Suelos de la casa Tecnología y Equipos Diagnósticos S.A. (antigua Enosa. José Gumuzzio. 1987), permite determinar: la textura, el color, el pH, nitratos y amonio, fósforo, calcio, sulfatos, y cloruros.

a) Análisis y Caracterización de los suelos

La determinación de la textura se realizó siguiendo el Método semicuantitativo de Tames; que determina la plasticidad que presenta el suelo, mediante formación de filamentos de suelo de un determinado diámetro y con unas condiciones de humedad características. La estimación del color se realizó por comparación con las tablas de color existentes en el manual del equipo de análisis. La cuantificación del pH se hizo de modo aproximado, el método se fundamenta en la extracción de los iones H⁺ por parte del agua destilada. La determinación de los nitratos, el amonio, el fósforo, el calcio, los sulfatos y los cloruros se basan en distintas reacciones químicas, con numerosos reactivos.

b) Detección de iones solubles

Después del secado y tamizado de las muestras de suelo, para obtener los iones solubles presentes en el suelo, se realizó una disolución con la fracción menor de 2 mm del suelo tomando unas cantidades de 50 g de suelo y de 200 ml de agua Milli-Q de 18,2 MΩ.cm, la cual se agitó durante 5 minutos. Tras la agitación, se filtró el extracto a través de una membrana de nitrocelulosa de 0,45 μm.

Sobre el extracto se determinó: la conductividad eléctrica, el pH, el contenido de ión cloruro y el contenido en NO₃⁻ y NO₂⁻². En la tabla 2 se muestran los valores de conductividad, pH, y concentración de cloruros.

Tabla 2 de resultados del análisis de los suelos.

Código Muestra	pH	Conductividad (μs/cm)	Concentración Cl ⁻ (ppm)
290101	7.06	517	3.23304
290102	7.02	560	4.87792
290103	7.45	438	3.23304
290104	7.58	420	3.28976
290105	7.74	475	3.85696
290106	7.65	447	3.23304
81201	7.37	414	1.24784
81202	7.62	354	1.07768
81203	7.4	405	1.36128
81204	7.44	345	1.1344
81205	7.46	405	1.418
81206	7.52	355	1.1344

c) Análisis de muestras de agua

Para obtener los iones solubles presentes en la muestra de agua, se tomó una muestra de 10 ml, que se valoró directamente mediante el método de Mohr. En la tabla 3 se muestran los resultados obtenidos junto con los análisis realizados *in situ* de: la conductividad eléctrica, el pH, y el contenido en NO₃⁻ y NO₂⁻².



Tabla 3: de resultados del análisis del agua.

Código Muestra	pH	Conductividad (µs/cm)	Concentración Cl ⁻ (ppm)
290101A	7.14	108	0.17016
81202A	7.83	150	0.79408

2.5.3 Toma fotográfica

Durante los reconocimientos del terreno y las tomas de muestras, se realizaron varias fotografías tanto del emplazamiento de las tomas de muestras como del perfil del suelo.

Las fotografías se realizaron con una cámara digital de Canon modelo Digital IXUS 900 Ti, cuyas características técnicas son las siguientes: un sensor de Imagen tipo CCD de 1/1,8", con aproximadamente 10,0 M píxeles efectivos; un procesador de imagen de tipo DIGIC III con tecnología iSAPS; y un objetivo de longitud focal 7,7 - 23,1 mm.

2.6 Sistema de Información Geográfica (SIG)

La modelización digital del terreno se ha empleado el software específico que permita la superposición de bases de datos alfanuméricas y bases gráficas. S ha empleado el software ArcGIS 9.2.

Con el fin de hacer más manejables y adaptar la información alfanumérica a las necesidades del estudio, se han realizado modificaciones sobre las bases de datos mediante las herramientas algebraicas de las aplicaciones. Por último, para reflejar los datos obtenidos en el estudio, se han creado nuevas capas de datos alfanuméricos.

3 Resultados y Discusión

La localización de los puntos de muestreo permiten tener en cuenta la variable espacial de los resultados, así se puede trazar una línea paralela a la línea de flujo subterráneo de agua, que determina la dirección de la difusión de los contaminantes.

Los resultados de los análisis obtenidos de conductividad muestran como la conductividad del terreno aumenta según nos acercamos a la carretera, manteniéndose más o menos estables hasta alcanzar el máximo en el punto de muestreo número cinco, ubicado en el centro de una tierra de cultivo, con lo que este aumento puede estar relacionado por el uso de fertilizantes inorgánicos solubles, para después descender de nuevo en el punto seis cercano a la fuente de San Antonio.

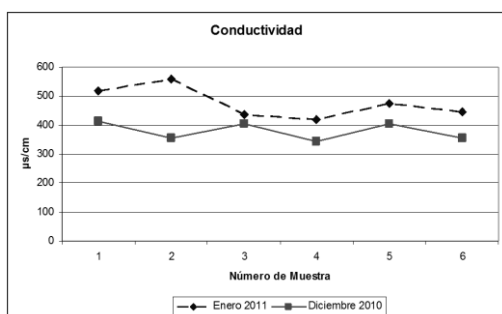


Figura 4: grafico que recoge variación de la conductividad a lo largo de la línea de muestreo

Respecto al contenido de cloruros observamos que existe una relación lógica en el comportamiento de la conductividad y la concentración de cloruros.

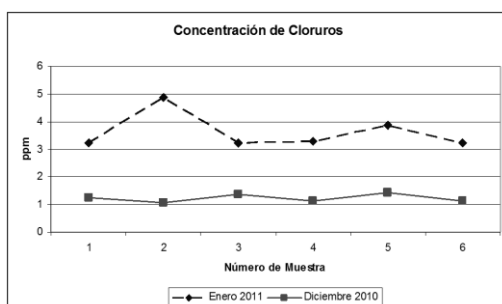


Figura 5: grafico que recoge variación de la concentración de cloruros a lo largo de la línea de muestreo.



Por otro lado, en la figura 5 se observa la variación de los cloruros desde el punto de origen (muestra nº1), hacia los bordes del páramo, como consecuencia del gradiente hidráulico del agua y a la pendiente del terreno, produciéndose una acumulación intermedia (muestra nº6) por la velocidad de transporte de los solutos, formando una línea de difusión del cloruro.

La concentración anómalamente baja del 2º punto de muestreo (junto a la cuneta de la carretera) obtenido en la campaña de diciembre, se justificar por la dilución de la concentración de los iones de cloro en el suelo gracias en parte a las abundantes precipitaciones en forma de lluvia caídas inmediatamente después a las heladas, y en parte a la recogida de la escorrentía de la superficie asfaltada.

Respecto de los resultados del análisis de agua (fuente de San Antonio) *in situ* y de laboratorio, no se ha podido apreciar ninguna variación significativa ni en la conductividad, ni en la concentración de cloruros de otras muestras de aguas tomadas del resto del páramo.

Al no existir contaminación por cloruros en las aguas, de una manera apreciable mediante la aplicación de estas técnicas analíticas, no se han contemplado medidas de remediación y recuperación de suelos.

Destacar que se han encontrado virutas de hierro en los suelos analizados, que pueden proceder del desgaste de la maquinaria agrícola.

Otro aspecto reseñable es la acumulación de la concentración de cloruros a lo largo del año, ya que en enero y después del empleo de sal durante prácticamente dos meses, la cantidad de iones detectados es sensiblemente superior. Por otra parte este hecho también sugiere que los iones de cloro tienen una cierta capacidad de acumulación, pero de escasa duración en el tiempo, ya que no se acumula de un año a otro.

4 Conclusiones

1. El uso de sustancias egelantes en las carreteras conlleva procesos de contaminación difusa detectables en el suelo.
2. La gravedad y el riesgo de los procesos de contaminación de las aguas subterráneas está en función de la vulnerabilidad que presentan las masas de agua existentes en la zona.
3. El acuífero libre de Torozos se trata de una unidad muy vulnerable, con una rápida respuesta ante procesos contaminantes, aunque no se refleje en la calidad de las aguas, por este motivo se puede deducir que los contaminantes queden retenidos en los óxidos de hierro o aluminio, o en las arcillas existentes en las grietas de fisuración del acuífero kárstico.
4. No se han detectado cantidades significativas de cloro en las muestras de agua.
5. La existencia de cloruros en el suelo y no en el agua, significa que posee una importante capacidad de retención, lo que supone una efectiva medida de protección natural ante la contaminación de las aguas.
6. La relación entre la conductividad y de la concentración de cloruros presenta patrones de comportamiento espacial similares, que responden a los parámetros hidráulicos de difusión del suelo.

Agradecimientos

En primer lugar A la Dra. Teresa Rivas Brea, quien puso a nuestra disposición todos los medios a su alcance, y lo más importante sus dilatados conocimientos y experiencia en la materia. Y en segundo lugar y no menos importante a la Universidad Europea Miguel de Cervantes, en especial a la Escuela Politécnica, institución que nos ha facilitado todos los medios técnicos para realizar este trabajo.

Referencias Bibliográficas

1. Ballester A., Herranz J.M., Monterde J.,A. 1983, Estudio Hidrogeológico del Páramo de los Torozos, III Simposio de Hidrogeología, Madrid.
2. Caja España. Estudios de Datos Económicos y Sociales de Caja España. 2009. Municipio de La Mudarra. Secretaría General Técnica. Servicio de Estudios, Caja España. Con la colaboración técnica de CYLSTAT, Asesoramiento Estadístico S.L. Información sobre Caja España, Estudios Caja España, Datos Económicos y Sociales de los Municipios de España. <Disponible en URL: <http://www.cajaespana.es/corporativo/nwinfocajaespana/estudioscajaespana/datoseconomicos/index.jsp>>. Consultado el 02-09-2010
3. Garrett, D.E. 2004. Handbook of Lithium and Natural Calcium Chloride. Their Deposits, Processing, Uses and Properties. Páginas 237-457.
4. Guitián, F y Carballas, T. 1976. Técnicas de Análisis de Suelos. Editorial Pico Sacro, Santiago de Compostela. 2ª Edición. ISBN 84-85170-09-1.
5. Haan, F.A.M y Zwerman P.J. 1976. Developments in Soil Science. Volumen 5, Parte 1, Páginas 192-271. Soil Chemistry - A. Basic Elements.



6. Helena B., Pardo R., Vega M., Barrado E., Fernández J.M. y Fernández L. 2000. Temporal evolution of groundwater composition in an alluvial aquifer (Pisuerga River, Spain) by principal component analysis. *Water Research*. Volumen 34, Páginas 807-816.
7. Impens R. 1987. Automotive Traffic Risks for the Environment. *Studies in Surface Science and Catalysis. Catalysis and Automotive Pollution Control, Proceedings of the First International Symposium (CAPOC I)*. Páginas 11-29
8. Instituto Geológico y Minero de España (IGME). Serie MAGNA 1:50.000 (2ª Serie), hoja número 342, Villabrágima.
9. Instituto Nacional de Estadística (INE). *Web del INE*. <Disponible en URL: http://www.ine.es/inebmenu/mnu_cifraspob.htm>. Consultado el 12-04-2011
10. Instituto tecnológico Agrario de Castilla y León. 2009. FTP Plan Nacional de Ortofotografía y Mapa Digital de Elevaciones.. Hoja 342. Disponible en: < <ftp.itacyl.es>> Consultado 09-04-2011
11. Instituto tecnológico Agrario de Castilla y León. FTP. 2009. Plan Nacional de Ortofotografía. Hoja 342. Disponible en: < <ftp.itacyl.es>> Consultado 09-04-2011.
12. Junta de Castilla y León. 2009. Infraestructura de Datos Espaciales de Castilla y León. *Web del IDECYL*. Disponible en URL: <http://www.sitcyl.jcyl.es/sitcyl/home.sit>>. Consultado el 12-04-2011.
13. Leea W.J. y Kimb S.H. 1999. Methods for Measuring Total Organic Chloride Concentrations in Soil as Inorganic Chloride Concentrations Using UV Irradiation and Ion Chromatography. *Microchemical Journal*. Volumen 63, Páginas 187-195.
14. López-Geta J.A., Del Barrio V., Vega L. 2005. Explotación de Aguas Subterráneas en el Duero: Retos de la Cuenca. Congreso Homenaje al Duero Douro y sus ríos, memoria cultura y porvenir. Zamora.
15. Morales, J.A., Graterol L.S. y Mesa J. 2000. Determination of chloride, sulfate and nitrate in groundwater samples by ion chromatography. *Journal of Chromatography A*. Volumen 884, Páginas 185-190.
16. Panreac. Analíticos en Alimentaria, Métodos Oficiales de aguas potables de consumo público y aguas de bebida envasada Disponible en la *Web* en: <http://www.usc.es/caa/MetAnalisisStgo1/aguas.pdf>. Consultado el 20-05-2011.
17. Sánchez González, S. 2009. Evolución multitemporal de usos en el entorno de las lagunas de Villafáfila. Proyecto fin de Carrera, Universidad Europea Miguel de Cervantes.
18. Sánchez San Román, F. J *Web de Hidrología e Hidrogeología del Departamento de Geología de la Universidad de Salamanca*.. Departamento de Geología. Universidad de Salamanca (España). Temas Precipitaciones y Evapotranspiración. <Disponible en URL: <http://web.usal.es/~javisan/hidro/>>. Consultado el 10-04-2008
19. Sanz Lobón, G. 2007. Caracterización y sostenibilidad del acuífero libre de los Montes Torozos. Proyecto fin de Carrera, Universidad Europea Miguel de Cervantes.
20. Sanz, G.; Montequi, I; Laguna, R.; Martínez-Alegría,R; Sánchez, S. 2009. Uso Sostenible de los Recursos Hídricos del Acuífero Libre de los Montes Torozos. *Tecnologías del Agua*. Organizado por. Instituto para la Sostenibilidad de los Recursos. Madrid.
21. Sección de Climatología de la Delegación Territorial de Castilla y León de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). Información sujeta a tasas según la Ley 13/96 de 30 de Diciembre (BOE nº 315 de 31 de Diciembre).
22. Sociedad de Investigación y Explotación Minera de Castilla y León, S.A. (SIEMCALSA). 1997. Mapa Geológico y Minero de Castilla y León a escala 1:400.000. SIEMCALSA, Valladolid. ISBN 84-7846-643-6.

CAPÍTULO V:

Sostenibilidad, conclusiones y futuros
desarrollos



5.1 LA SOSTENIBILIDAD

Desde la óptica de la gestión de recursos hídricos, la sostenibilidad implica una situación de equilibrio que simultáneamente satisfaga la demanda de agua en cantidad y calidad y la conservación del sistema hídrico, en este caso el acuífero del páramo de los Montes Torozos [16, Cai et al. 2003].

La evaluación de la sostenibilidad en la gestión de los recursos hídricos se efectúa a partir de la ponderación de los siguientes indicadores:

- fiabilidad del sistema de abastecimiento de agua,
- resiliencia
- vulnerabilidad y riesgos del sistema
- integridad del sistema ambiental,
- equidad en la distribución del agua,
- viabilidad económica de la explotación.

Estos indicadores se evalúan independientemente para cada unidad de gestión y explotación, en este caso concreto estarían limitadas al acuífero libre de los Montes Torozos.

5.1.1 Fiabilidad del sistema de abastecimiento de agua

Se estima a partir de la probabilidad de garantía de abastecimiento en cantidad y calidad de las demandas planteadas. En términos de la Directiva Marco, equivaldría al Buen Estado global.

A partir de los resultados obtenidos con el modelo se puede decir que el acuífero dispone de una cantidad de recurso hídrico suficiente con una capacidad reguladora anual o bianual según las precipitaciones, para sustentar el abastecimiento de la población y sus actividades, es decir presenta un estado cuantitativo bueno, incluso en el peor de los escenarios simulado.

Sin embargo, desde el punto de vista cualitativo, es decir de la calidad físico-química, presenta una notable deficiencia asociada a la elevada concentración de nitratos, lo que reduce drásticamente los usos potenciales de los recursos hídricos subterráneos. Si además de estas limitaciones de uso asociadas a la calidad, se tienen en cuenta las restricciones ambientales del 7,4% de los recursos establecidas por la Confederación Hidrográfica del Duero (9 hm³) y se acepta una merma del 6% como medida de precaución frente al cambio climático (7,3 hm³) [25, Confederación Hidrográfica del Duero 2009], la sostenibilidad entendida como recursos en buen estado disponibles conduce a un balance positivo con una reserva de recursos estimada en 105,54 hm³.

Por tanto en este caso la garantía en cantidad es muy alta, partiendo de un recurso anual de 141,10 hm³/año, unas explotaciones de 9,02 hm³/año, un drenaje perimetral de 10,22 hm³/año y una escorrentía superficial de 8,23 hm³/año. Lo que supone balance hídrico anual positivo en 113,63 hm³/año. Dadas unas reservas estimadas no inferiores a 62,7 hm³/año, como estima la



Confederación en su último estudio para el Plan de Cuenca 2009 - 2015 en fase de elaboración [74, Instituto Geológico y Minero de España. 2014].

La garantía de abastecimiento en términos de calidad es bastante menor en el caso de usos para abastecimientos urbanos, por las concentraciones de $(NO_3)^-$ que las hacen inviables para el consumo humano

5.1.2 Resiliencia

Estimada como la capacidad de recuperación del sistema a partir de un fallo en él. En este caso concreto sería la capacidad de autodepuración ante un problema de contaminación y se estimaría a partir de la inercia del sistema, ya que este sería el tiempo máximo de recorrido de un contaminante, y a partir de la peligrosidad del producto considerado [46, Fiering. 198].

En este caso la inercia o tiempo de respuesta máximo del sistema es de unos 4 meses, con una tasa de recuperación del acuífero prácticamente bianual, estimada a partir de la relación entre la recarga anual media $141,10 \text{ hm}^3/\text{año}$ y unas reservas estimadas de $62,7 \text{ hm}^3$. en estas condiciones la tasa de renovación del acuífero es de unos 2 años, con lo que la capacidad de recuperación del acuífero será alta para los productos más comunes que no presentan una excesiva peligrosidad (combustibles, fertilizantes o sustancias egeles para la conservación de las carreteras).

5.1.3 Vulnerabilidad y riesgos

Representada por la susceptibilidad de fallo del sistema.

5.1.3.1 Vulnerabilidad intrínseca

De acuerdo a los parámetros DRASTIC este acuífero posee una elevada vulnerabilidad intrínseca asociada a su propia naturaleza hidrogeológica, sobre todo con los parámetros relativos al medio acuífero calcáreo de fácil difusión de contaminantes, la mínima pendiente de la superficie del páramo y el impacto sobre la zona no saturada (vadosa).

5.1.3.2 Vulnerabilidad extrínseca

La vulnerabilidad extrínseca (IS) asociada a las actividades desarrolladas es alta, a excepción de las zonas con usos seminaturales de acuerdo a la clasificación de usos CORINE. Además, las actividades humanas asociadas a usos urbanos, industriales y de infraestructuras de comunicación representan elementos de alto riesgo en el desencadenamiento de procesos de contaminación tanto puntual como difusa del acuífero.

Sobre el páramo se localizan: el aeropuerto de Villanubla, la carretera nacional N-601 con varias gasolineras, el polígono industrial de Villanubla, la subestación eléctrica de transformación de la Mudarra, y varios núcleos de población. Estas actividades representan elementos de riesgo que



aumentan la vulnerabilidad, aunque sea de manera puntual, de la masa de agua, ya que presentan un aumento significativo en el riesgo, sobre todo vinculado a la probabilidad de ocurrencia de algún episodios de contaminación puntual asociados sobre todo a: vertidos directos, vertidos indirectos por filtraciones, o el simple accidente de un transporte de mercancías peligrosas.

5.1.3.3 Riesgos

Al comparar el IS frente al DRASTIC, es decir la vulnerabilidad extrínseca frente a la intrínseca, se aprecian diferencias notables y semejanzas razonables. Además al superponer los elementos susceptibles de causar un impacto, muchos de ellos aparecen en zonas determinadas como de alta vulnerabilidad, lo que requiere una monitorización y la adopción de medidas protectoras y correctoras. Entre los elementos que cabe monitorizar se encuentran cascos urbanos, el aeropuerto, las carreteras y la subestación eléctrica.

Pero ni los incendios, ni las roturas de tierras, ni estos elementos especialmente peligrosos, han supuesto una gran amenaza desde el punto de vista medioambiental y de la sostenibilidad de esta zona hasta la fecha. El principal problema detectado han sido las elevadas concentraciones de nitratos encontradas en los manantiales que drenan el acuífero. Esta situación supone un riesgo potencial, no sólo para el entorno natural, sino también para la salud humana, ya que existe población que sigue usando el agua de las fuentes para consumo doméstico.

En lo referente a los riesgos para la salud, la contaminación del agua por nitratos afecta a una considerable extensión de las aguas, sobre todo subterráneas. Estos hechos pueden afectar a la salud de los hombres de diferentes maneras [150, Villanueva & Iglesias 1984]. Los nitritos y los nitratos ingeridos de las aguas potables contaminadas pueden inducir metahemoglobinemia en seres humanos, particularmente en niños, bloqueando la capacidad del oxígeno que lleva la hemoglobina. Los nitritos y los nitratos ingeridos también tienen un papel potencial en cánceres a través de la formación de nitrosaminas. Además, algunas evidencias científicas sugieren que los nitritos y los nitratos ingeridos pudieran dar lugar a defectos de mutagenicidad, de teratogenicidad y de muerte súbita del lactante. Pueden contribuir a elevar los factores de riesgo para la aparición de linfomas no-Hodgkin, cáncer de vejiga y de ovario, desempeñar un papel en la etiología de la diabetes mellitus insulino-dependiente, en el desarrollo de la hipertrofia del tiroides, o causar abortos espontáneos e infecciones de la zona respiratoria. Los peligros para la salud indirectos pueden ocurrir como consecuencia del desarrollo de algas [18, Camargo & Alonso 2006].

5.1.4 Integridad del sistema ambiental

El criterio a seguir para evaluar el indicador de integridad del sistema ambiental es aquél que permita prever y regular los efectos sobre las masas de agua y su comportamiento frente a las presiones. Para evaluar este criterio se consideran los subcriterios que comprendan el marco regulatorio, las condiciones y control de la explotación de las masas de agua, la respuesta a la evolución de las presiones sobre el sistema



5.1.4.1 Marco regulatorio

En este caso la explotación (extracciones) de dicha masa de agua está sometida a un régimen de concesión administrado por parte del organismo de cuenca (Confederación Hidrográfica del Duero) a través del Plan Hidrológico en vigor.

Pero además la zona estudiada está también amparada por diversas figuras de protección ambiental de ámbito comunitario. Y así con la puesta en marcha del programa Red Natura 2000, la UE se inició un proceso de declaración de numerosas áreas como Lugares de Interés Comunitario (LIC). Dentro de este marco, en 2004, se propuso la creación de una figura de protección sobre el páramo de los Montes Torozos. Las autoridades optaron por la creación de un LIC con una extensión de 22982,1 ha que englobara parte de los páramos de Torozos y Torquemada-Astudillo. El LIC recibió el nombre de "Montes Torozos y Páramo de Torquemada-Astudillo" -Cod. ES4140129- [119, Red Natura 2000 2014], su creación está motivada por ser un lugar que recoge los escasos bosques isla de masas residuales de encinares y quejigares (en algunas ocasiones en formaciones mixtas con *Pinus pinea*), y el pequeño embalse de "La Santa Espina". Con esta figura de protección se ha tratado de proteger estas masas arbóreas de incendios y de las roturaciones agrícolas. Pero este LIC aún no ha sido aprobado por la UE, a pesar de ello la normativa dice que hasta que no se haya pronunciado la autoridad competente, la zona debe ser considerada como un LIC a todos los efectos.

5.1.4.2 Evolución multitemporal

Desde 1959 hasta la actualidad no existe una tendencia significativa de cambio de uso a nivel de todo el páramo. Se puede observar un ligero descenso de las categorías pertenecientes a superficies agrícolas en favor de las categorías de las semi-naturales. También existe un aumento de la superficie regada, aunque a efectos del de la superficie total es insignificante (en torno al 0,7%). A pesar de ello la agricultura es la actividad con mayor demanda de recursos hídricos subterráneos, con un volumen superior a los 6 hm³. En función del modelo usado esta demanda representa entre el 20% o el 50% de los recursos existentes, lo que se traduce en una baja eficiencia de uso, asociada sobre todo no con la falta de recursos, sino por la dificultad de su extracción, debido a la naturaleza anisótropa del sistema, lo que obliga a realizar para obtener un volumen suficiente numerosas captaciones de pequeño tamaño.

5.1.4.3 Eco-condicionalidad

Las roturaciones de las masas vegetales autóctonas con fines agrarios han sido numerosas, a pesar de que en los últimos años esta práctica se haya estancado, el aumento de la superficie agrícola ha supuesto una disminución de la calidad ambiental, debido por un lado a la homogenización del espacio, y por otro, al aumento del uso productos fertilizantes y fitosanitarios. Por este motivo la Comunidad Europea se puso como objetivo alcanzar un justo equilibrio entre la producción agrícola competitiva, el respeto de la naturaleza y el medio ambiente. El proceso de integración de estas tres componentes se basa en la introducción de medidas para la protección del medio ambiente en los diferentes campos de actuación comunitaria y lleva consigo la firme resolución de alcanzar la coherencia entre la política ambiental y la agrícola. El Consejo Europeo



invita a todas las formaciones competentes a establecer sus propias estrategias para integrar el medio ambiente y el desarrollo sostenible en sus respectivas áreas de actividad. Así dio comienzo en 1998 lo que se conoce como Proceso de Cardiff a raíz del cual posteriores Consejos reafirmaron el compromiso de integrar las consideraciones medioambientales y de desarrollo sostenible en todas las políticas comunitarias y de introducir indicadores adecuados para supervisar esa integración.

Posteriormente el Consejo Europeo de Viena (diciembre de 1998) vino a confirmar el compromiso emanado de Cardiff. En enero de 1999 la Comisión publicó la comunicación «Orientaciones para una agricultura sostenible» que marcó el primer paso para el sector. En diciembre de 1999 El Consejo Europeo de Helsinki, adoptó la Estrategia para la integración de la dimensión ambiental en la Política Agraria Común de la Unión Europea (PAC) en la que se fijan objetivos concretos: calidad y uso equilibrado del agua, reducción del riesgo de los productos agroquímicos, disminución de la degradación del suelo, cambio climático y calidad del aire y preservación del paisaje y de la biodiversidad. En junio de 2001 El Consejo Europeo de Gotemburgo respaldó la estrategia de la Unión Europea hacia el desarrollo sostenible, añadiendo la dimensión ambiental a las sociales y económicas, e hizo suyas las conclusiones del Consejo de Agricultura sobre la integración medioambiental y el desarrollo sostenible en la PAC.

Pero los resultados no fueron satisfactorios y la UE puso en marcha una iniciativa conocida como eco-condicionalidad, que junto al pago único y la modulación, son los ejes claves de la nueva PAC. Se trata de un conjunto de disposiciones que deben cumplir los agricultores y ganaderos para poder recibir íntegramente las ayudas. El principio de que los agricultores deben cumplir los requisitos de protección medioambiental como condición para beneficiarse de las ayudas se incluyó en la reforma de la Agenda 2000. La reforma de la PAC de 2003 hizo mayor hincapié en la eco-condicionalidad, que adquirió carácter obligatorio.

Los Estados miembros disponen de tres opciones para cumplir esta obligación: otorgar ayuda para compensar los compromisos agroambientales, fijar requisitos preceptivos generales (basados en la legislación medioambiental), e introducir normas medioambientales específicas. En los casos en que los agricultores no respeten los requisitos medioambientales, habrán de aplicarse las correspondientes sanciones, incluida la posible reducción o incluso la retirada de las ayudas directas.

Por otra parte la Unión Europea ha propuesto una serie de medidas agroambientales en apoyo de prácticas agrarias específicamente concebidas, que trascienden el nivel básico de las «buenas prácticas agrarias» y que contribuyen a proteger el medio ambiente y a conservar el paisaje. Estas medidas han permitido el desarrollo de planes agroambientales como instrumentos de apoyo a prácticas agrarias específicas que contribuyen a proteger el medio ambiente y a mantener los espacios naturales. Con la reforma de la PAC de 1992, la aplicación de programas agroambientales se hizo obligatoria para los Estados miembros en sus planes de desarrollo rural; y la reforma de la PAC de 2003 mantiene el carácter obligatorio de los planes agroambientales para los Estados miembros, mientras que siguen siendo optativos para los agricultores.



En lo que atañe a la política de mercados y renta, el instrumento clave es la eco-condicionalidad. La reforma de la PAC de 2003 supone también desvincular de la producción la mayor parte de las ayudas directas. A partir de 2005, se instauró un régimen de pagos únicos tomando como referencia las cantidades concedidas históricamente. Esto significa reducir muchos de los incentivos para la producción intensiva que han venido relacionándose a riesgos cada vez mayores para el medio ambiente. El segundo paquete de reformas (2004) de los regímenes de mercado para los sectores agrícolas de la cuenca mediterránea ha confirmado el cambio de dirección adoptado por la PAC en 2003. Para estos sectores: aceite de oliva, algodón, tabaco y lúpulo, una parte importante de los pagos actualmente vinculados a la producción se trasladará al régimen de pago único disociado.

Por lo que respecta a la política de desarrollo rural, la observancia de unas normas mínimas medioambientales es condición necesaria para poder acogerse a diversas ayudas previstas en una serie de medidas de desarrollo rural, tales como inversiones para la creación de explotaciones agrarias, establecimiento de jóvenes agricultores y mejora de la transformación y comercialización de productos agrícolas. De igual modo, sólo un compromiso para con el medio ambiente que supere el nivel de referencia del código de buenas prácticas agrarias (BPA) podrá optar a los pagos agroambientales. Las ayudas a zonas desfavorecidas están también supeditadas al cumplimiento de los códigos de BPA.

La complejidad de la relación entre agricultura y medio ambiente ha condicionado el planteamiento de la integración medioambiental en la PAC. El principio fundamental para comprender esta relación es el de las buenas prácticas agrarias que corresponden al tipo de actividad agraria que un agricultor responsable deberá poner en práctica en una determinada región. Ello incluye como mínimo la observancia de la legislación comunitaria y nacional sobre medio ambiente. Las buenas prácticas agrarias implican, por ejemplo, el cumplimiento de la Directiva de nitratos y el uso de productos fitosanitarios.

5.1.4.4 Ordenación territorial

Con el modelo se ha determinado la existencia de un recurso suficiente para la demanda actual, pero su distribución espacial hace que sea necesario plantear de serie de directrices que permitan el aprovechamiento racional de los recursos hídricos, con el fin conseguir una ordenación y articulación territorial que fomente el desarrollo socio-económico del entorno, ya que sin el apoyo social, ningún proyecto ni medida de mejora planteada podrá ser aceptada por la población, y por lo tanto tampoco podrá ponerse en marcha.

Dichas directrices, deberán elaborarse en función de los objetivos perseguidos incentivando aquellas actividades con mayor repercusión socioeconómica y menor impacto ambiental, con la finalidad de evitar alteraciones del medio natural tan drásticas como la modificación de la red hidrográfica realizada por la concentración parcelaria.

Finalmente, en lo tocante a las "nuevas energías renovables" la solar y la eólica, a pesar que su funcionamiento no representa ningún impacto sobre los recursos hídricos, si lo puede suponer su



puesta en funcionamiento. Por lo que se deben establecer una serie directrices que permitan aunar los intereses eléctrico-económicos y los ambientales.

5.1.5 Equidad en la distribución del agua

El concepto de equidad en la gestión de los recursos hídricos es básico en el marco del desarrollo sostenible, dado que el agua es un recurso esencial, su uso conlleva también otro tipo de connotaciones, en ocasiones no consuntivas pero igualmente importantes, como puede ser el soporte de los ecosistemas acuáticos o su valor para fines recreativos o de esparcimiento.

En este caso la evolución de este indicador está asociada a la determinación de las prioridades y régimen de compatibilidades de usos establecidas en el Plan Hidrológico. Debido al volumen de recursos suficiente que presenta el acuífero, y dado que las jerarquías son de carácter normativo, se puede hablar de que el reparto está asegurado, a pesar de su condicionante económico intrínseco.

5.1.6 Viabilidad económica de la explotación

Si se entiende la viabilidad de las explotaciones como la facilidad con en términos de recursos necesarios para acceder al agua subterránea, en el contexto de mercado actual, la puesta en marcha de una nueva captación está asegurada, tanto en el aspecto volumétrico como en el aspecto económico del precio. Pero la existencia de un volumen elevado no significa que esté disponible todo él, ya que el acuífero presenta fuertes limitaciones de conductividad hidráulica, es decir, el recurso existe, se puede acceder a él, pero la conductividad va a limitar el caudal continuo disponible.

5.1.7 Sostenibilidad integral

De una valoración ponderada *ad hoc* de estos indicadores se obtiene un sostenibilidad que integra todos los aspectos descritos a lo largo de este trabajo (Fig. 77)

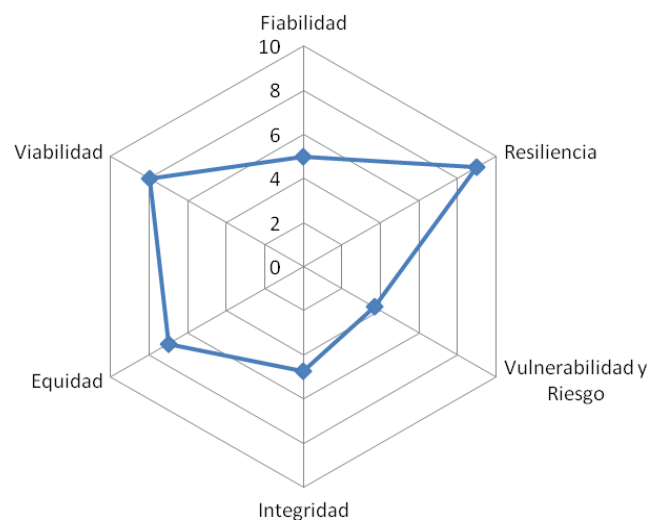


Fig. 77. Gráfico de sostenibilidad.



A partir del gráfico se deduce que la sostenibilidad del acuífero es **buena**. Pero hay que prestar especial atención a aquellos indicadores con valores menores, ya que son los que van a determinar la evolución del sistema. La elevada resiliencia del acuífero junto con la viabilidad de su explotación y la equidad en el reparto de los recursos existentes, hacen que todas las medidas que se adopten en términos de conservación se deban vincular a la protección del acuífero mediante la aplicación de medidas que minimicen los riesgos y/o no aumenten la vulnerabilidad del sistema, aumentando la fiabilidad del suministro, garantizando la satisfacción de todas las demandas, sin limitaciones de uso.



5.2 CONCLUSIONES

Las conclusiones más relevantes extraídas del presente trabajo se sintetizan en:

1. Las calizas del páramo de los Montes Torozos configuran un acuífero libre, colgado topográficamente y aislado de otras unidades acuíferas; que se recarga directamente por lluvia; y se drena por: a) drenaje perimetral a través de manantiales; b) el efecto goteo difuso a lo largo del contacto entre las calizas del páramo superiores y el nivel impermeable de las arcillas de la Facies Cuestas; y c) a través de explotaciones de pozos.
2. El resultado del balance hídrico del acuífero es positivo con un recurso anual de 100 hm³, superiores a las salidas estimadas en 20 hm³. Cifra similar al Plan Hidrológico de la Cuenca del Duero.
3. El acuífero del Páramo posee una inercia del orden de 4 meses y un periodo de renovación estimado en 2 años.
4. A partir de resultados de los análisis físicos-químicos del agua se puede concluir que en el estado actual el agua no es apta para el consumo humano, por no cumplir con los umbrales legales de concentración de nitratos.
5. El modelo de flujo, la concentración de las aportaciones superficiales, la dinámica geomorfológica, la disposición y magnitud de la red fluvial junto con reconstrucción topográfica del MDET, corroboran las hipótesis de acuñamiento con engrosamiento y basculamiento de las calizas del páramo hacia el SO.
6. Geodinámicamente este basculamiento es el resultado de los movimientos tectónicos Finineógenos durante la fase Iberomanchega en la que además se originan tres alineaciones de pequeñas fracturas NE-SO, SE-NO y ESE-OSE.
7. La recarga del sistema se efectúa preferentemente a través de la red de fisuración. Por este motivo se ha desarrollado un sistema kárstico que en superficie está constituido por un sistema de dolinas, que se ajusta con las alineaciones de la red de fracturas, NE-SO y SE-NO. Esto permite que la acción erosiva del agua dibuje una red hidrográfica que drena el páramo hacia el SO dando lugar a amplios valles paralelos en forma de artesa.
8. El flujo preferente hacia el SO, responsable del trazado de la red fluvial y su mayor desarrollo hacia el SO, también es consecuente con la red de fisuración Finineógena.
9. La reconstrucción geoestadística de la superficie piezométrica del páramo ha permitido diferenciar dos zonas en el acuífero, la NE limitada por el drenaje dominante del arroyo del Valle hacia Ampudia, y la zona SO de mayor desarrollo, que conforma una cúpula con los niveles más elevados en el NO en la zona de Villalba de los Alcores y los más bajos en el SO, en las cabeceras de los ríos Hornija, Hontanija y Bajoz.



10. A partir de la reconstrucción piezométrica del régimen de extracciones y del aforo de manantiales, se ha modelizado y simulado el comportamiento del flujo del acuífero en régimen estacionario y transitorio. Los resultados obtenidos corroboran diversas hipótesis sobre el acuífero, entre las que está el flujo dominante hacia el SO alimentando los manantiales y arroyos más caudalosos del acuífero (Bajoz, Hornija y Hontanija).
11. La validación y calibración conseguida en el modelo de flujo, con fiabilidades del 95%, permiten utilizarlo para realizar nuevas inferencias de explotación y la predicción de sus efectos previsibles. Aportando una herramienta válida de apoyo a los planes de racionalización del uso de los recursos hídricos y la adecuación a las demandas socioeconómicas existentes en la zona.
12. Respecto a la fragilidad ambiental del acuífero está condicionado por sus características intrínsecas y por las actividades antrópicas desarrolladas en su área de influencia. El acuífero de los Montes Torozos presenta una gran vulnerabilidad por estar en contacto directo con las actividades desarrolladas en su superficie. Presenta elevados valores de vulnerabilidad intrínseca y extrínseca.
13. A pesar de la existencia de un volumen suficiente, debido su escasa calidad, presenta fuertes restricciones para su aprovechamiento y gestión. Por ser un acuífero libre es muy vulnerable a la inmisión directa de contaminantes de focos puntuales, difusos, directos e indirectos.
14. Se ha observado una alta sensibilidad en la variación estacional de los recursos hídricos, ya que responden de forma directa a los cambios. Esta respuesta permite calificar al acuífero de fácilmente recuperable sin necesidad de intervención, por lo que su recuperación pasa por unas buenas prácticas agrícolas.
15. La sostenibilidad integral del acuífero es buena, debido sobre todo a su elevada resiliencia y a la viabilidad de su explotación. Sin embargo presenta serios problemas asociados con su vulnerabilidad y fiabilidad.



Conclusions

The principal conclusions achieved were:

1. The Torozos Limestone aquifer is unconfined and a hydrogeological isolated structure. It is recharged is directly due to rainfall and drawn by: a) hydrographic radial net, b) trickle drainage between limestone and clays, and c) pumping wells.
2. The hydrological balance is positive, with estimated resources around 100 hm³/year, which is more than the total annual withdraw and recharge (20 hm³/year).
3. The watershed shows an annual inertia of four months and a water renovation period of two years.
4. There are physical and chemical water parameters exceeding the legal allowed limits. For this reason most of this water is unfit for human consumption, mostly due to the high nitrate concentrations, twice the maximum allowed in many places.
5. The current model, the runoff contribution, the geomorphological dynamic, the hydrological net orientation, and topography reconstruction of Digital Elevation Model (DEM), are indirect evidences that provides the needed data proving minting of the moorland towards the SW.
6. This tilt is the result of tectonic Finineogene (end of Messinian) movements, during Iberomanchega tectonic phase (Messinian) and moreover, the origin of the small fracture's alignments: NE-SW, NW-SE and ESE-WSE.
7. The body water recharge's system is primarily kept in line by the fracture network. A karstic fracturatuion system was adjusted simulating the sinkhole system alignments NE, SW and SE-NW. The alignment of the surface found on the moor allows that the water erosion and the river network drains the moor towards the SW and almost parallel and generating large valleys.
8. Therefore, this preferential flow towards South-west has determined the course of the hydrographic network, likewise coherent by the fracture network. Direction.
9. Geostatistical methodologies, namely Gaussian kriging with backtransform, allowed the reconstruction of the moor's piezometric level, smoothing the outliers and a representation in the original variable unit. It was possible to distinguish two zones with different structural behavior in the aquifer. The first one is in the NE area and is limited by the River valley and close to Ampudia. The second field is the SW one, making a dome with the highest scores near the Villalba de Los Alcores village and lower ones in the headwaters of the Hornija, Bajoz and Hontanija rivers.



10. Piezometric level, extraction system and water spring distribution, allowed the aquifer behavior simulation such as flow steady and transient state. The results validated a dominant flow towards the SO.
11. The flow model calibration is fairly good, with a feasibility validation around 95%. For this reason, model can be used for scenarios predictions for different management situations..
12. The aquifer environmental characteristics are defined by its intrinsic characteristics as well as the anthropogenic activities. Montes Torozos' aquifer Shows high values of intrinsic and extrinsic vulnerability.
13. Despite the existence of enough water volume it must be stressed its low quality since there are strong restrictions on its use and management. Being an unconfined aquifer is extremely vulnerable to direct emission of pollutants from topical and diffuse.
14. High sensitivity could have been observed concerning seasonal variation. Montes Torozos aquifer can easily be retrieved without intervention, showing good farming practices.
15. The sustainability of the water body is good, primarily due to its high resilience and viability management.



5.3 FUTUROS DESARROLLOS

Cuando se trata del agua, “es necesario alegar primero una experiencia y después una razón” (*Water Theory: on the origin and fate of water* Leonardo da Vinci 1690 – 1730), por este motivo es importante no intentar adaptar el modelo a la realidad, sino buscar la causa porque el modelo no se adapta a lo observado. A la hora de hacer modelos hay que tratar de tener una visión holística, tratando de no dar nada por sentado e incluyendo el mayor número de parámetros que afecten al modelo.

Utilizando esta afirmación como punto de partida, de este trabajo se desprenden cuatro futuras líneas de investigación:

1. Es necesario crear y mantener registros históricos completos y fiables. En este sentido, otra tarea importante es el mantenimiento y obtención de nuevos datos que puedan retroalimentar el modelo permitiendo una aproximación más exacta. Por otra parte los nuevos datos deben asociarse a nuevas técnicas de modelización geoestadística, que nos permitan detectar heterogeneidades, anisotropías, alineamientos, o cualquier fenómeno de distribución espacial relacionado con la génesis, los elementos geomorfológicos o con la distribución espacial de cualquier parámetro del acuífero.
2. La estratificación vertical y la distribución espacial son el objetivo principal de los futuros modelos, para ello una potente herramienta son las aproximaciones " *Multiple-point statistics*" (MPS) las cuales permiten un modelado en detalle de acuíferos de esta naturaleza.
3. El seguimiento y monitorización del caudal y la calidad de los manantiales debe estudiarse con más detalle, es decir en más puntos y durante más tiempo, con el fin de ajustar mejor la dinámica que presenta la masa de agua. Además, se ha detectado la existencia de elvedas concentraciones de nitratos en principio relacionadas con las actividades agrícolas, que podrían suponer un importante riesgo, pero no se ha podido establecer una relación causa-efecto inequívoca, por lo que supone otro potencial campo de investigación.
4. Finalmente, pero no menos importante, se debe aplicar la metodología aquí expuesta a los páramos colindantes de Astudillo, Cuellar y el Cerrato, con el fin de corroborar las conclusiones geoestructurales e hidrodinámicas aquí expuestas, y así facilitar una gestión más sostenible de los recursos hídricos disponibles en el conjunto de estos acuíferos de páramos calcáreos de la cuenca del Duero.



FUTURE WORK

“Remember, when you speak about water, to show first the experience and then the interpretation” (Water Theory: on the origin and fate of water. Leonardo da Vinci 1690 – 1730). In fact, it is more important to look for the causes of deviations, between model and material universe than to modify the model to conform it. For this reason, a model must be constructed from a holistic point of view, knowing the parameters and without any assumption nor contested.

This is the beginning point for future study. Four works lines can be seen:

1. The Model's maintenance and improve need a completed historical serial dataset. This involves a good statistical sampling design which must be monitored for a long time. The new and continuous information together with geologist expertise allows testing the model based in an attempt/error approach until a reasonable spatial uncertainty is achieved. Moreover, other geostatistics approaches should be examined in order to study the spatial and temporal distribution, of some chemistry pollutants like nitrates, with an accurate spacio-temporal uncertainty visualization.
2. Vertical stratification and horizontal distribution are the main future core that will be modeled using a "Multiple-point statistics" (MPS) approach.
3. The monitoring of spring water volume should be known and the dynamic of the aquifer and its processes too. It has been possible to corroborate the existence of nitrate concentrations as an important hazard and its direct relation to farming.
4. Last but not least, this methodological body must be validated taking into account other similar moorland data, like the Astudillo, Cuellar and Cerrato ones. The resultant comparison will allow the knowledge of how, why and what are the consequences of neotectonic processes and their importance above water resources management on the Duero basin moorland aquifers.

BIBLIOGRAFÍA



- [1] Agencia Estatal de Meteorología de España & Departamento de Meteorología e Clima, Instituto de Meteorología de Portugal. 2011. Iberian Climate Atlas. Agencia Estatal de Meteorología. Madrid. ISBN: 978-84-7837-079-5. Disponible en <http://www.aemet.es/documentos/es/conocermas/publicaciones/Atlas-climatologico/Atlas.pdf> [Consultado: 13/10/2013].
- [2] Aguirre, E. 1976. Datos paleomastológicos y fases tectónicas en el Néogeno de la Meseta Central Española. Trabajo Neógeno-Cuaternario 6: 7-29. Instituto Lucas Mallada. Centro Superior de Investigaciones Científicas.
- [3] Albuquerque, M.T.D., Sanz, G., Oliveira, S.F., Martínez-Alegría, R. & Antunes, I.M.H.R., 2013. Spatio-temporal groundwater vulnerability assessment - a coupled remote sensing and GIS approach for historical *Land Cover* reconstruction. *Water Resource Management* 27: 4509–4526.
- [4] Aller, L., Bennet, T., Lehr, J.H., Petty, R.J. & Hackett, G. 1987. DRASTIC: a standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings. U.S. *Environmental Protection Agency (Eds.)*, EPA/600/2–87/035, Oklahoma.
- [5] Arauzo, M., Valladolid, M. & Martínez-Bastida, J.J. 2011. Spatio-temporal dynamics of nitrogen in river-alluvial aquifer systems affected by diffuse pollution from agricultural sources: Implications for the implementation of the Nitrates Directive, *Journal of Hydrology* 411 (1–2): 155-168.
- [6] Auge, M. 2004. Vulnerabilidad de Acuíferos. *Revista Latino-Americana de Hidrogeología* 4: 85-103.
- [7] Baalousha, H. 2010. Assessment of a groundwater quality monitoring network using vulnerability mapping and geostatistics: A case study from Heretaunga Plains, New Zealand. *Agricultural Water Management* 97 (2): 240-246.
- [8] Ballester, A., Herranz, J.M. & Monterde, J.,A. 1983. Estudio Hidrogeológico del Páramo de los Torozos. III Simposio de Hidrogeología. Plan de Investigación de Aguas Subterráneas (PIAS) Madrid.
- [9] Barroso, C. & Monteiro, I. 2010. Monitoring Vegetation From Space. EUMeTrain Project. Disponible en <http://www.eumetrain.org/data/3/36/index.htm> [Consultado: 21/02/2014].
- [10] BioMedware. 2013. SpaceStat. Disponible en: <http://www.biomedware.com/?module=Page&SID=spacestat> [Consultado: 21/07/2013].
- [11] Boletín Oficial del Estado. 1982. Orden de 1 de diciembre por la que se establecen los métodos oficiales de análisis de aguas, aceites y grasas, carne y productos cárnicos, fertilizantes, productos fitosanitarios, leche y productos lácteos, productos orgánicos, suelos y productos derivados de la uva y similares. BOE 17: 1275-1284. Referencia BOE-A-1982-1323. Disponible en: https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-1982-1323 [Consultado: 07/03/2014].



- [12] Boletín Oficial del Estado. 1987. Orden de 1 de julio de 1987 por la que se aprueban los métodos oficiales de análisis físico-químicos para aguas potables de consumo público. BOE 163: 20911-20919. Referencia: BOE-A-1987-15871. Disponible en: http://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-1987-15871 [Consultado: 07/03/2014].
- [13] Boy-Roura, M., Nolan, B.T., Menció, A. & Mas-Pla, J. 2013. Regression model for aquifer vulnerability assessment of nitrate pollution in the Osona region (NE Spain). *Journal of Hydrology* 505: 150-162.
- [14] Bradley, D.M., Unnikrishnan, R., & Bagnell, J. 2007. Vegetation Detection for Driving in Complex Environments. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp. 503-508.
- [15] Brita Paja, M. 1991. Guía de los Montes Torozos. Edición de la Junta de Castilla y León, Palencia.
- [16] Cai, X., McKinney, D.C. & Rosegrant, M.W. 2003. Sustainability analysis for irrigation water management in the Aral Sea region. *Agricultural Systems* 76 (3): 1043-1066.
- [17] Caja España. 2009. Estudios de Datos Económicos y Sociales de Caja España. Secretaría General Técnica. Servicio de Estudios, Caja España. Con la colaboración técnica de CYLSTAT, Asesoramiento Estadístico S.L. Información sobre Caja España, Estudios Caja España, Datos Económicos y Sociales de los Municipios de España. Disponible en: <http://www.cajaespana.es/pubweb/decyle.nsf> [Consultado: 02/09/2009].
- [18] Camargo, J.A. & Alonso, A. 2006. Ecological and toxicological effects of inorganic nitrogen pollution in aquatic ecosystems: A global assessment. *Environment International* 32(6):831-849.
- [19] Carper Tewinkel, G. 1984. History of Photogrammetric Mapping in C&GS. In NOAA History-NGS Shoreline
- [20] Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico del Agua. 2013. Métodos Oficiales de análisis físico-químicos para aguas potables de consumo público. Disponible en: <http://cidta.usal.es/calidad/documentos/leg/05Metodos%20oficiales%20de%20analis%20fq.pdf> [Consultado: 12/12/2013].
- [21] Centro Nacional de Información Geográfica, Centro de Descargas. 2013. Cartografía. Disponible en: <http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/index.jsp> [Consultado: 15/01/2014].
- [22] Chica-Olmo, M., Luque-Espinar, J.A., Rodriguez-Galiano, V., Pardo-Igúzquiza, E. & Chica-Rivas, L. 2013. Categorical Indicator *Kriging* for assessing the risk of groundwater nitrate pollution: The case of Vega de Granada aquifer (SE Spain). *Science of The Total Environment* 470–471: 229-239.
- [23] Chow, V.T., Maidment, D.R. & Mays, L.W. 1993. Hidrología Aplicada. McGraw-Hill Interamericana S.A. ISBN: 958-600-171-7.



- [24] Cole, J. 2013. Freshwater in flux. *Nature Geoscience* 6: 13-14. Nature Publishing Group, a division of Macmillan Publishers Limited.
- [25] Confederación Hidrográfica del Duero. 2009. Plan Hidrográfico de la Cuenca del Duero. Disponible en: <http://www.chduero.es/Inicio/Planificaci%C3%B3n/Planhidrol%C3%B3gico2009/PlanHidrol%C3%B3gico/Memoria/tabid/551/Default.aspx> [Consultado 09/04/2013].
- [26] Confederación Hidrográfica del Duero. 2013. Sistema de Información MÍRAME-IDEDuero. Páramo de Torozos. DU -400032. Disponible en: http://www.mirame.chduero.es/DMA Duero_09/resultadosBusquedaCodigo.faces [Consultado: 13/01/2013].
- [27] Consejo Europeo. 2000. Directiva Marco del Agua 60/2000 del Consejo Europeo. Disponible en: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2000:327:0001:0072:es:PDF> [Consultado: 25/7/2009].
- [28] Corral Castanedo, A. 1999. Los montes de torozos (Aproximaciones a una comarca). Publica Valladolid, Caja España. ISBN 8487739776.
- [29] Crippen, R.E. 1990. Calculating the vegetation index faster. *Remote Sensing of Environment*, vol. 34, pp. 71–73,.
- [30] CRISON Instruments S.A. 2010a. Manuales de usuario de equipos de campo. Disponibles en: <http://www.crisoninstruments.com/es/parametros/conductividad-electrica/instrumentos-portatiles> [Consultado: 11/12/2013].
- [31] CRISON Instruments S.A. 2010b. Manuales de usuario de equipos de campo. Disponibles en: <http://www.crisoninstruments.com/es/parametros/ph/instrumentos-portatiles> [Consultado: 11/12/2013].
- [32] CRISON Instruments S.A. 2010c. Manuales de usuario de equipos de campo. Disponibles en: <http://www.crisoninstruments.com/es/parametros/oxigeno-disuelto-o-d-oximetro-portatil> [Consultado: 11/12/2013].
- [33] Custodio, E. & Llamas, M.R. 2001. Hidrología Subterránea. Editorial Omega. Barcelona. Segunda Edición Corregida. ISBN: 84-282-0446-2.
- [34] Deutsch, W.J. 1997. Groundwater Geochemistry: Fundamentals and Applications to Contamination. *CRC Press*.
- [35] Díaz Lezcano, M.I. 2007. Modelización de la contaminación difusa por nitratos en las aguas subterráneas de la cuenca del río Henares. Tesis Doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes. Universidad Politécnica de Madrid.
- [36] Dirección General de Obras Hidráulicas & Instituto Geológico y Minero de España. 1988. Plan Nacional de Investigación de Aguas Subterráneas (PIAS).
- [37] Dirección General de Protección Civil y Emergencias. 2006 Catálogo Nacional de Inundaciones Históricas. Cuencas de Baleares, Duero y Segura. Fascículo 1. Solicitud por correo electrónico a: documentacion@procivil.mir.es. Nipo:126-06-075-9.



- [38] Doorenbos, J. & Pruitt, W.O. 1977. Guidelines for predicting crop water requirements. Irrigation and Drainage Paper No.24., FAO, Rome.
- [39] El Yaouti, F., El Mandour, A., Khattach, D. & Kaufmann, O. 2008. Modelling groundwater flow and advective contaminant transport in the Bou-Areg unconfined aquifer (NE Morocco). *Journal of Hydro-environment Research* 2 (3): 192–209.
- [40] Ente Regional de la Energía de Castilla y León. 2013. Datos sobre energías Renovables. Disponible en: <<http://www.energia.jcyl.es/>> [Consultado: 03/09/2013].
- [41] European Environment Agency. 2012. Coordination of Information on the Environment Project (CORINE). Disponible en: <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/#c11=landuse&c17=&c5=all&c0=5&b_start=0&c12=CORINE> [Consultado: 17/11/2012].
- [42] Eurostat (European Commission). 2012. Statistics. Disponible en: <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/statistics/search_database> [Consultado: 28/6/2012].
- [43] Fernández, J.A., Martínez, C. & Magdaleno, F. 2012. Application of indicators of hydrologic alterations in the designation of heavily modified water bodies in Spain. *Environmental Science & Policy* 16: 31-43.
- [44] Fernando-Pacheco, A.L. & Sanches Fernandes. L.F. 2013. The multivariate statistical structure of DRASTIC model. *Journal of Hydrology* 476 (7): 442-459.
- [45] Fetter, C. W. 1999.- Contaminant Hydrogeology. Prentice-Hall, 2ª edición. Reimpresión: Waveland Press, 2008.
- [46] Fiering, M.B. 1982. Alternative indices of resilience. *Water Resources Research* 18(1):33–39.
- [47] Fijani, E., Nadiri, A.A., Moghaddam, A.A., Tsai, F.T-C. & Dixon, B. 2013. Optimization of DRASTIC method by supervised committee machine artificial intelligence to assess groundwater vulnerability for Maragheh–Bonab plain aquifer, Iran. *Journal of Hydrology*. 503: 89-100.
- [48] Fitts, C. R. 2002. Groundwater Science. Academic Press. ISBN: 978-0122578557.
- [49] Fitzpatrick, E. A. 1987. An Introduction to Soil Science. Longman; 2nd Ed. Revised edition. ISBN: 978-0582301283.
- [50] Fraser, R.H., Fernandes, R. & Latifovic, R. 2003. Multi-temporal mapping of burned forest over Canada using satellite-based change metrics. *Geocarto International* 18: 37-47.
- [51] Freeze, R. A. & Cherry, J.A. 1979. Groundwater. Prentice-Hall. ISBN: 978-0133653120
- [52] García, F.J., Moreno, F. & Nozal, F. 1991. Neotectonics and associate seismicity in Northwester Duero Basin. Publicación IGN. Serie Monografías 8: 255-267.
- [53] García-Franchini, C. 2005. Modelado por medio de ecuaciones diferenciales. Instituto Tecnológico de Puebla. Disponible en: http://www.anfei.org.mx/revistas/Revista_38.pdf. Último acceso: 13/01/2013.



- [54] García-Merino, L.V. 1988. Análisis del Medio Físico de Valladolid. Delimitación de unidades y estructura territorial. Consejería de Fomento. Dirección General de Urbanismo, Vivienda y Medio Ambiente Edita EPYSA. ISBN: 84-86996-00-7
- [55] Ghoraba, S.M., Zyedan, B.A. & Rashwan, I.M.H. 2013. Solute transport modeling of the groundwater for quaternary aquifer quality management in Middle Delta, Egypt. *Alexandria Engineering Journal* 52 (2):197–207.
- [56] Goovaerts, P. 1997. Geostatistics for Natural Resources Evaluation. Oxford Univ. Press, New York, USA.
- [57] Goovaerts, P., AvRuskin, G., Meliker, J., Slotnick, M., Jacquez, G.M., & J. Nriagu. 2005. Geostatistical modeling of the spatial variability of arsenic in groundwater of Southeast Michigan. *Water Resources Research*, 41(7):1-19.
- [58] Goovaerts, P., Sonnet, P.H. & Navarre, A. 1993. Factorial *kriging* analysis of springwater contents in the Dyle river basin, Belgium. *Water Resources Research*, 29(7): 2115-2125.
- [59] Guerra, J.C. 2000. Análisis Biogeográfico de los Montes Torozos en Relación con el Medio Físico y la Actividad Humana. Tesis Doctoral. Universidad de Valladolid. Departamento de Geografía. Valladolid.
- [60] Guerra, J.C. 2001. La Acción Humana, el Paisaje Vegetal y el Estudio Biogeográfico. Departamento de Geografía. Universidad de Valladolid. Valladolid.
- [61] Guitián, F. & Carballas, T. 1976. Técnicas de Análisis de Suelos. Editorial Pico Sacro, Santiago de Compostela. 2ª Edición. ISBN 84-85170-09-1.
- [62] Gutiérrez, M. 2008. Geomorfología. Pearson Educación S.A. Pearson, PrenticeHall. ISBN: 978-84-8322-389-5
- [63] Han, D., Tong, X., Currell, M.J., Cao, G., Jin, M. & Tong, C. 2013. Evaluation of the impact of an uncontrolled landfill on surrounding groundwater quality, Zhoukou, China. *Journal of Geochemical Exploration* 136: 24–39.
- [64] Hassan, AIU. 2012. Comparative Analysis of MODIS, SPOT 5 and WorldView-2 during Wheat Growing Season. Space Applications Research Center (SPARCENT), Ed. Intergraph, Erdas - Intergraph.
- [65] Heejun Chang. 2008. Spatial analysis of water quality trends in the Han River basin, South Korea. *Water Research* 42 (13): 3285–3304.
- [66] Hernández-Pacheco, E. 1915. Geología y Paleontología del Mioceno de Palencia. Comisión de Investigaciones Paleontológicas y Prehistóricas, 5.
- [67] Hill, M.C., Banta, E.R., Harbaugh, A.W., & Anderman, E.R. 2000, MODFLOW-2000, the U.S. Geological Survey modular ground-water model - User guide to the Observation, Sensitivity, and Parameter-Estimation Processes and three post-processing programs: U.S. Geological Survey Open-File Report 00-184.
- [68] Huan, H., Wang, J. & Teng, Y. 2012. Assessment and validation of groundwater vulnerability to nitrate based on a modified DRASTIC model: A case study in Jilin City of northeast China, *Science of The Total Environment* 440 (1): 14-23.



- [69] Infraestructura de Datos Espaciales de Castilla y León. 2013. Servicio *Web* de Mapas. Medio Físico. Geología. Disponible en: http://www.cartografia.jcyl.es/web/jcyl/Cartografia/es/Plantilla66y33_100/1284244103044//> [Consultado: 28/10/2013].
- [70] Instituto Geográfico Nacional. 2014. Atlas Nacional de España. Edición facsímil digital del Atlas Nacional de España. Grupos temáticos. 1986- 2008. Instituto Geográfico Nacional - Centro Nacional de Información Geográfica. Ministerio de Fomento. Disponible en: <http://www.ign.es/ane/ane1986-2008/> [Consultado: 21/02/2014].
- [71] Instituto Geológico y Minero de España. 1981. Aguas Subterráneas. Programa Nacional de Gestión y Conservación de los Acuíferos. Evolución Piezométrica de los Acuíferos en la Cuenca del Duero. Análisis del periodo 1972–1981. Estudio publicado por la Secretaria de la Energía y Recursos Mineros (Ministerio de Industria y Energía).
- [72] Instituto Geológico y Minero de España. 2012. Mapa Geológico de España. Disponible en <http://www.igme.es/internet/cartografia/cartografia/magna50.asp> [Consultado: 15/12/2012].
- [73] Instituto Geológico y Minero de España. 2014. Apoyo a la caracterización adicional de las masas de agua subterránea en riesgo de no cumplir los objetivos medioambientales en 2015. Demarcación Hidrográfica del Duero. Masa de agua subterránea: 32 Páramo de Torozos. Disponible en: http://www.igme.es/INTERNET/SIDIMAGENES/139000/899/139899_0000011.PDF [Consultado: 23/02/2014].
- [74] Instituto Geológico y Minero de España. 2014. Estudio Neotectónico. Hoja de Burgos (200 - (19/10). Disponible en: <http://www.igme.es/internet/sidimagenes/magna/20200/estudio%20neotectonico/estudio%20neotectonico.pdf> [Consultado: 15/01/2014].
- [75] Instituto Nacional de Estadística. 2013. Padrón, Población por municipios. <http://www.ine.es/jaxi/menu.do?type=pcaxis&path=%2Ft20%2Fe260&file=inebase&L> [Consultado: 24/05/2013].
- [76] Instituto Tecnológico Agrario de Castilla y León. 2011. Edafología. Mapa de Suelos FAO 1:400.000. Disponible en: <ftp://ftp.itacyl.es/Edafologia> [Consultado: 14/02/2014].
- [77] Instituto Tecnológico Agrario de Castilla y León. 2013. Cartography-Ortofotografía. http://ftp.itacyl.es/cartografia/01_Ortofotografia/ [Consultado: 14/01/2013].
- [78] Instituto tecnológico Agrario de Castilla y León. 2014. FTP Atlas Agroclimático. Disponible en: ftp://ftp.itacyl.es/Atlas_Agroclimatico/ [Consultado: 21/02/2014].
- [79] Junta de Castilla y León. 2013. Infraestructura de Datos Espaciales de Castilla y León (IDECYL). Servicio de mapas de la Junta de Castilla y León, Medio físico, Geología. Disponible en: <http://www.idecyl.jcyl.es/IGCyL/services/MedioFisico/Geologia/MapServer/WMSServer> [Consultado: 07/03/2014]



- [80] Kauth, R.J. & Thomas, G.S. 1976. The tasseled cap - a graphic description of the spectral-temporal development of agricultural crops as seen by landsat. In LARS: Proceedings of the Symposium on Machine Processing of Remotely Sensed Data, West Lafayette.
- [81] Koo, M. & Leap, D.I. 1998. Modeling Three-Dimensional Groundwater Flows by the Body-Fitted Coordinate (BFC) Method: I. Stationary Boundary Problems. *Transport in Porous Media* 30 (2): 217-239.
- [82] Kreigler, F.J., Malila, W.A., Nalepka, R. & Richardson, W. 1969. Preprocessing transformations and their effects on multispectral recognition. In Proc. of the Sixth International Symposium on Remote Sensing of Environment.
- [83] Kyung-Soo, J., Eun-Sung, C., Young-Gyu, K. & Yeonjoo, K. 2013. A fuzzy multi-criteria approach to flood risk vulnerability in South Korea by considering climate change impacts. *Expert Systems with Applications* 40 (4): 1003-1013.
- [84] Lemke, L.D., Abriola, L.M., & Goovaerts, P. 2004. DNAPL source zone characterization: influence of hydraulic property correlation on predictions of DNAPL infiltration and entrapment. *Water Resources Research* 40(1).
- [85] Lemke, L.D., Barrack II, W.A., Abriola, L.M. & Goovaerts, P. 2004b. Matching solute breakthrough with deterministic and stochastic aquifer models. *Ground Water* 42(6-7):920-934.
- [86] Li, K.B., Goovaerts, P., & L.M. Abriola. 2007. A geostatistical approach for quantification of contaminant mass discharge uncertainty using multi-level sampler measurements. *Water Resources Research* 43 (6).
- [87] Liangping, L. 2009. Three-Dimensional Steady-State Groundwater Flow Modeling with Full Tensor Conductivities Using Finite Differences. Máster Thesis. Group of Hydrogeology Universidad Politécnica de Valencia.
- [88] Liu, H.H., Li, L. & Birkholzer, J. 2012. Unsaturated properties for non-Darcian water flow in clay. *Journal of Hydrology* 430–431: 173–178.
- [89] Lobo-Ferreira, J.P. & Oliveira, M.M. 1993. Development of an inventory of the groundwater resources of Portugal: characterization of groundwater resources and DRASTIC vulnerability mapping of the aquifers of Portugal (in Portuguese).
- [90] López-Geta, J.A., del Barrio Beato, V. & Vega Martín, L. 2005. Explotación de las aguas subterráneas en el Duero: los retos de la cuenca. Instituto Geológico y Minero de España. Disponible en: <<http://www.unizar.es/fnca/duero/docu/p207.pdf>> [Consultado: 04/03/2013]-
- [91] Loucks, D.P. & Gladwell, J.S. 1999. Sustainability Criteria for Water Resource Systems. International Hydrology Series. Cambridge University Press. UNESCO. ISBN: 0 521 56044 6 hardback. Disponible en: <<http://catdir.loc.gov/catdir/samples/cam032/98029507.pdf>> [Consultado: 21/02/2014].
- [92] Maidment, D.R. 1993. Handbook of Hydrology. Mc.Grawhill. ISBN: 9780070397323



- [93] Mair, A., Aly, I. & El-Kadi. 2013. Logistic regression modeling to assess groundwater vulnerability to contamination in Hawaii, USA. *Journal of Contaminant Hydrology* 153: 1-23.
- [94] Martínez-Alegría, R., Ordóñez, C. & Taboada, J. 2003. A Conceptual Model for Analyzing the Risks Involved in the Transportation of Hazardous Goods: Implementation in a Geographic Information System. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal* 9 (3).
- [95] Martínez-Alegría, R. 2012. Inteligencia Ambiental, Evolución Histórica. En Ciencia para todos: La Química del Medio Ambiente. Col. Clastrum. Ed. UEMC. ISBN:978-84-939729-2-9.
- [96] Martínez-Alegría, Ra, Sanz, Gb*, Montequi. Ia. Albuquerque, MTDc, Antunes, IMHRC. 2014. Unconfined aquifer vulnerability related to topical pollution episodes – Montes Torozos (Spain). International workshop “Uranium, Environment and Public Health”, UrEnv 2013. *Procedia Environmental Sciences*. Manuscript.
- [97] Maynard, S.J. 1968. *Mathematical Ideas in Biology*. Cambridge University Press. ISBN 0-521-07335-9
- [98] McDonald, M.G., & Harbaugh, A.W. 1984. A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model: U.S. Geological Survey.
- [99] McGonigle, D.F., Harrisa, R.C., McCamphilla, C., Kirka, S., Dilsb, R., Macdonaldc, J. & Bailey, S. 2012. Towards a more strategic approach to research to support catchment-based policy approaches to mitigate agricultural water pollution: A UK case-study. *Environmental Science & Policy* 24: 4–14.
- [100] McWhorter, D.B. & Sunada, D.K. 1977. *Ground-Water Hydrology and Hydraulics*. Water Resources Publications.
- [101] Mediavilla, R.M. & Dabrio, C.I. 1988. Controles Sedimentarios Neógenos en la Depresión del Duero (Sector Central). *Revista de la Sociedad Geológica de España* 1 (I-2).
- [102] Mekki, I., Jacob, F., Marlet, S. & Ghazouani, W. 2013. Management of groundwater resources in relation to oasis sustainability: The case of the Nefzawa region in Tunisia. *Journal of Environmental Management*. 121: 142-151.
- [103] Mendes, E. 2006. Perímetros de Protecção de Captações de Água Subterrânea para Consumo Humano em Zonas de Montanha. Caso de estudo da Cidade da Covilhã. Universidade da Beira Interior. Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura. Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre.
- [104] Merckoquant. 2013. Nitrat-test .Disponible en:< http://www.chemdat.merck.de/is-bin/INTERSHOP.enfinity/WFS/Merck-ES-Site/es_ES/-/EUR/ViewPDF> [Consultado: 11/12/2013].
- [105] Ministerio de Medio Ambiente. 2000. Libro Blanco del Agua en España, España. Disponible en: <<http://hispaagua.cedex.es/node/66958>> [Consultado: 21/02/2014].



- [106] Ministerio de Obras Públicas. 1972. Seminario sobre Modelos Analógicos y Digitales para la Explotación y Administración de Recursos Hidráulicos Subterráneos. Ministerio de Obras Públicas Dirección General de Obras Hidráulicas. Servicio Geológico. Boletín N. 37. Informaciones y estudios. Madrid.
- [107] Montero de Burgos, J.L. & González Rebollar, J.L. 1983. Diagramas Bioclimáticos. Instituto Nacional para la Conservación de la Naturaleza.
- [108] Moral, F.J. 2004. Aplicación de la geoestadística en las ciencias ambientales. Asociación Española de Ecología Terrestre. Disponible en: <http://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/viewFile/582/550> [Consultado: 07/03/2014].
- [109] Morán, E. 2012. Impactos recientes de los cambios ambientales en los recursos hídricos superficiales de la cuenca del Duero. Pirineos. Revista de Ecología de Montaña 167: 107-142.
- [110] Nikolaidis, N.P., Bouraoui, F. & Bidoglio, G. 2013. Hydrologic and geochemical modeling of a karstic Mediterranean watershed. *Journal of Hydrology* 477- 16: 129–138.
- [111] Ninyerola, M., Pons, X. & Roure, J.M. 2005. Atlas Climático Digital de la Península Ibérica. Metodología y aplicaciones en bioclimatología y geobotánica. ISBN 932860-8-7. Universidad Autónoma de Barcelona, Bellaterra.
- [112] Ordóñez, C. & Martínez-Alegría, R. 2002. Sistemas de Información Geográfica. Aplicaciones prácticas con Idrisi32 al análisis de riesgos naturales y problemáticas medioambientales. Editorial Ra-Ma. ISBN: 84-7897-534-8.
- [113] Pandey, V.P., Shrestha, S., Chapagain, S.K. & Kazama, F. 2011. A framework for measuring groundwater sustainability. *Environmental Science & Policy* 14 (4): 396–407.
- [114] Pizzol, M., Scotti, M. & Thomsen, M. 2013. Network Analysis as a tool for assessing environmental sustainability: Applying the ecosystem perspective to a Danish Water Management System. *Journal of Environmental Management* 118: 21-31.
- [115] Raj Pathak, D. & Hiratsuka, A. 2011. An integrated GIS based fuzzy pattern recognition model to compute groundwater vulnerability index for decision making. *Journal of Hydro-environment Research* 5 (1): 63-77.
- [116] Ramírez, G. & Reguera, J.M. 1995. Atlas del territorio de Castilla y León. Valladolid: Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio.
- [117] Real Academia de la Lengua Española. Diccionario de la Real Academia de la Lengua Española. Disponible en: http://buscon.rae.es/drae/?type=3&val=modelo&val_aux=&origen=REDRAE [Consultado: 10/4/2010].
- [118] Rebelo, L.M., Matthew, P., McCartney, M. & Finlayson, C. 2011. The application of geospatial analyses to support an integrated study into the ecological character and sustainable use of Lake Chilwa. *Journal of Great Lakes Research* 37: 83-92.



- [119] Red Natura 2000. 2014. Ficha resumen de los formularios oficiales de la red natura 2000: ES4140129 Montes Torozos y Páramo de Torquemada-Astudillo. Disponible en: <http://rednatura.jcyl.es/natura2000/LIC/Formularios%20oficiales%5CPDF%20LIC%20resumen%5CES4140129.pdf> [Consultado: 16/01/2014].
- [120] Ribeiro, L., Serra, E., Paralta, E. & Nascimento, J. 2003. Nitrate pollution in hardrock formations: vulnerability and risk evaluation by geomathematical methods in Serpa-Brinches aquifer (South Portugal). In: Krasny, J., Hrkal, Z., Bruthans, J. (Eds), Proceedings of International Conference on Groundwater in Fractured Rocks: 377 – 378.
- [121] Rivas-Martínez, S. 1987. Biogeografía y Vegetación. Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Madrid. ISBN: 84-85496-25-6
- [122] Sánchez, F.J. 2006. Los Grandes Acuíferos de la Cuenca del Duero”. Disponible en: <http://www.unizar.es/fnca/duero/docu/p105.pdf> [Consultado: 13/01/2014].
- [123] Sánchez, F.J. 2010. Fundamentos básicos de los modelos de flujo de agua subterránea. Departamento de Geología de la Universidad de Salamanca. Disponible en: <http://web.usal.es/javisan/hidro> [Consultado: 20/02/2010].
- [124] Santini, M., Caccamo, G., Laurenti, A., Noce, S. & Valentini, R. 2010. A multi-component GIS framework for desertification risk assessment by an integrated index. *Applied Geography* 30 (3): 394-415.
- [125] Sanz, G. 2007. Caracterización y Sostenibilidad del Acuífero Libre de los Montes Torozos. Proyecto Fin de Carrera. Universidad Europea Miguel de Cervantes. Valladolid.
- [126] Sanz, G. 2008. Valoración de Modelos Matemáticos de Flujo Subterráneo como Herramienta de Gestión Integral de los Recursos Hídricos. Proyecto Fin de Master. Universidad de Alcalá de Henares y Universidad Rey Juan Carlos. Madrid.
- [127] Sanz, G. 2010. Modelo Hidrogeológico para la gestión sostenible del acuífero superficial calcáreo de los Montes Torozos. Proyecto Fin de Máster. Universidad de Vigo. Escola Técnica Superior de Enxeñeiros de Minas.
- [128] Sanz, G., Sánchez, S.M., Montequi, I. & Martínez-Alegría, R. 2011. Vulnerabilidad del Acuífero de los Montes Torozos por Procesos de contaminación de Soluciones Egelantes. VIII Congresso Ibérico de Geoquímica / XVII Semana de Geoquímica. 24-28 Septiembre 2011. Escola Superior Agrária do Instituto politécnico de Castelo Branco. Portugal
- [129] Sanz, G., Albuquerque, M.T.D., Martínez-Alegría, R. & Taboada, J. 2014. Strategic spatio-temporal vulnerability assessment to enhance resilience urban groundwater systems in Spain. Manuscript Number: STOTEN-D-14-00397.
- [130] Sanz, J.F. 2007. Apuntes de Clase de la Asignatura de Modelos Numéricos. Licenciatura de Ciencias Ambientales. Universidad Europea Miguel de Cervantes.
- [131] Schlumberger Water Services. 2011. Visual MODFLOW 2011.1, User's Manual.
- [132] Schlumberger Water Services. 2012. Visual MODFLOW Flex, User Documentation.



- [133] Schowengerdt, R.A. 1983. Techniques for Image Processing and Classification in Remote Sensing. Academic Press Inc. ISBN 0-12-628980
- [134] Silva, M.C.R., Albuquerque, M.T.D. & Ribeiro, L. 2008. Use of Water Quality Index to Evaluate the Influence of Anthropogenic Contamination on Groundwater Chemistry of a Shallow Aquifer, Loures Valley, Lisbon, Portugal. Global Groundwater Resources and Management. The 33rd International Geological Congress, General Symposium: Hydrogeology, Oslo (Norway).
- [135] Slater, P.N. 1975. Photographic systems for Remote sensing. In Reeves, R.G., ed. Manual of Remote Sensing: chapter 6. American Society of Photogrammetry, Falls Church, Va.
- [136] Smaoui, H., Zouhri, L. & Ouahsine, C.A. 2008. Flux-limiting techniques for simulation of pollutant transport in porous media: Application to groundwater management. *Mathematical and Computer Modelling* 47 (1–2): 47–59.
- [137] Smith, J.M. 1982. Mathematical Ideas in Biology. Cambridge; New York: Cambridge University Press. ISBN: 84-7829-040-0
- [138] Smith, R. 1999. Fundamental Principles of Modeling and simulation. Disponible en: <http://www.modelbenders.com/papers/principles/> [Consultado: 17/11/2009].
- [139] Sociedad de Investigación y Explotación Minera de Castilla y León, S.A. 1997. Mapa Geológico y Minero de Castilla y León a escala 1:400.000. SIEMCALSA, Valladolid. ISBN 84-7846-643-6.
- [140] Soon, J.M., Davies, W.P., Chadd, S.A. & Baines, R.N. 2012. A Delphi-based approach to developing and validating a farm food safety risk assessment tool by experts, *Expert Systems with Applications* 39 (9): 8325-8336.
- [141] Spiro, T.G. & Stigliani, W.M. 2003. Química Medioambiental. 2ª Edición. Pearson Prentice Hall. ISBN: 987-84-205390-58.
- [142] United States Geological Survey. 2010. Disponible en: <http://water.usgs.gov> [Consultado: 30/02/2010].
- [143] Thornthwaite, C.W. 1948. An Approach toward a Rational Classification of Climate. *Geographical Review* 38 (1): 55-94.
- [144] Turc L, 1961. Estimation of irrigation water requirements, potential evapotranspiration: a simple climatic formula evolved up to date. *Annals of Agronomy* 12: 13-49.
- [145] United States Geological Survey. 2014. Modflow Software. Disponible en: <http://water.usgs.gov/ogw/modflow/MODFLOW.html> [Consultado: 15/01/2014].
- [146] Varela, M. & Fernández, J.A. 1998. Programa de ordenación de acuíferos sobreexplotados/salinizados. Centro de Publicaciones, Ministerio de Medio Ambiente. Formulación de Estudios y Actuaciones. Serie Monografías. ISBN: 84-8320-034-1.
- [147] Vela, A. 2008. Cursos impartidos en el Master de Hidrología y Gestión de Recursos Hídricos. Universidad de Alcalá de Henares. Por Waterloo Hydrogeologic. Madrid.



- [148] Vera, J.A., Lorenzo, E., Rodríguez, S., Sánchez, C., Del Blanco, V., Nafría, D., & Rodríguez, O.O. 2011. El Vuelo Americano de 1956 en la Cuenca del Segura. Proceso de elaboración de ortofotografía digital en las zonas de Albacete y Alicante. Oficina de Planificación Hidrológica. Murcia. Pub. licencia Creative-Commons Reconocimiento-CompartirIgual 3.0 España.
- [149] Viessman, W. & Lewis, G.L. 2003. Introduction to Hydrology. Pearson Education Inc., 5ª ed. ISBN: 978-0673993373.
- [150] Villanueva, M. & Iglesias, A. 1984. Pozos y acuíferos. Técnicas de evaluación mediante ensayos de bombeo. Editado por el Instituto Geológico y Minero de España.
- [151] Vishnu, P.P., Shrestha, S., Chapagain, S.K. & Kazama, F. 2011. A framework for measuring groundwater sustainability. *Environmental Science & Policy* 14 (4): 396-407.
- [152] Von Bandat, H.F. 1962. Aerogeology. Publisher: Gulf Pub. Co. Houston, TX. ISBN: 978-0872010062.
- [153] Wang, C. & Zhao, Z. 2009. *Land Cover* change detection based on multi-temporal Spot5 imagery. Urban Remote Sensing Event, Joint. Shanghai. E-ISBN : 978-1-4244-3461-9.
- [154] Wang, J., He, J. & Chen, H. 2012. Assessment of groundwater contamination risk using hazard quantification, a modified DRASTIC model and groundwater value, Beijing Plain, China. *Science of The Total Environment* 432: 216-226.
- [155] Ward, M.H., Kok, T.M., Levallois, P., Brender, J., Gulis, G., Nolan, B.T. & VanDerslice, J. 2005. Environ Health Perspect. International Society for Environmental Epidemiology. Workgroup report: Drinking-water nitrate and health-recent findings and research needs 113(11):1607-14.
- [156] Water Information System for Europe. 2013. Disponible en: <<http://water.europa.eu/>> [Consultado: 15/01/2013].
- [157] Winter, T.C. 1978. Numerical Simulation of Steady State Three-Dimensional Groundwater Flow Near Lakes. *Water Resources Research* 14 (2).
- [158] You-Hailin, Xu-Ligang, Ye-Chang & Xu-Jiaying. 2011. Evaluation of Groundwater Vulnerability with Improved DRASTIC Method. *Procedia Environmental Sciences* 10 (C): 2690-2695.
- [159] Zhang, H. & Hiscock, K.M. 2011. Modelling the effect of forest cover in mitigating nitrate contamination of groundwater: A case study of the Sherwood Sandstone aquifer in the East Midlands, UK. *Journal of Hydrology* 399 (3–4): 212–225.
- [160] Zheng, L., Apps, J.A., Zhang, Y., Xu, T. & Birkholzer, J.T. 2009. On mobilization of lead and arsenic in groundwater in response to CO₂ leakage from deep geological storage. *Chemical Geology* 268 (3–4): 281–297.
- [161] Zouhri, L., Smaoui, H., Carlier, E. & Ouahsine, A. 2009. Modelling of hydrodispersive processes in the fissured media by flux limiters schemes (Chalk aquifer, France). *Mathematical and Computer Modelling* 50 (3–4): 516–525.

