

Análisis espacio-temporal de la incidencia antrópica en la Cuenca del río Cauca, en el departamento del Valle, Colombia

Space-Time Analysis of the Anthropic Incidence in the Cauca River Basin, Department of Valle, Colombia

Claudia Alexandra Forero Bernal¹

Paola Andrea Zabala Parra²

Alberto Boada Rodríguez³

Para citar este artículo: Forero Bernal, C. A., Zabala Parra, P. A. y Boada Rodríguez, A. (2017). Análisis espacio-temporal de la incidencia antrópica en la Cuenca del río Cauca, en el departamento del Valle, Colombia. *Perspectiva Geográfica*, 22(1). doi: 10.19053/01233769.5861

Resumen

En el presente trabajo se propone, a través de la teledetección (usando imágenes Landsat y Radarsat 2), la obtención de un Índice de Incidencia Antrópica a partir del cálculo de tres indicadores (vegetación, demográfico y modificación del cauce) que reflejan el cambio del drenaje en la cuenca hidrográfica del río Cauca. Lo anterior permitió evaluar espacial y

¹ Ingeniera Forestal de la Universidad del Tolima, Especialista en gerencia educativa con conocimiento, Magíster en Teledetección, Universidad Católica de Manizales. Coordinadora en Corporación Sol y Luna – CORTOLIMA. ing.claudiaaforero@gmail.com

² Ingeniera catastral y geodesta de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Especialista Gestión de Proyectos de Inversión Pública y Privada de la Universidad Libre de Colombia. Magíster en Teledetección, Universidad Católica de Manizales. Profesional especializado en Unidad de Restitución de Tierras Territorial Valle. pzabalaparra@yahoo.es

³ Ingeniero Industrial, Estadístico. Especialista en Teledetección. Magíster en Geoinformation Systems for Urban Applications, Doctorando en Investigación y Docencia, Centro Panamericano de Estudios Superiores, México. aboadar@gmail.com

temporalmente grandes áreas afectadas por la actividad antrópica. Dicha cuenca tiene mayor incidencia antrópica en los sectores donde se ubican los asentamientos urbanos e industriales, por ello la importancia de contar con la planificación del territorio en esta zona para disminuir los niveles de incidencia antrópica.

Palabras clave: asentamientos urbanos, cuenca hidrográfica, datos espaciales, impacto antrópico, índice e indicadores ambientales, río Cauca.

Abstract

In the present research is proposed through Remote Sensing (using Landsat and Radarsat 2) obtaining an Incidence Rate Anthropic from the calculation of three indicators: Vegetation, Vital Statistics and design Cauca; indicators that reflect the change in the drainage basin. The application of remote sensing techniques to assess spatial and temporarily allowed large areas affected by human activity. The basin has increased anthropogenic impact on sectors where urban and industrial settlements are located, so the importance of land use planning in this area to reduce levels of anthropogenic impact.

Keywords: urban settlements, watershed, spatial data, human impact, index and environmental indicators, Cauca River.

1. Introducción

En el contexto mundial, los cambios socioeconómicos ocurridos durante las últimas décadas del siglo XX y la primera del siglo XXI han producido numerosas alteraciones ambientales a diferentes escalas sociotemporales, que han modificado la estructura y funcionamiento de los ecosistemas y afectado negativamente la biodiversidad a un ritmo sin precedentes (Bevilacqua, Cárdenas y Medina 2006, 50-58). Es así como la percepción remota satelital ha ido adquiriendo cada vez más una mayor importancia en el estudio del medio ambiente a nivel local, regional y global. La actual constelación de satélites que orbitan alrededor de la Tierra y que son utilizados para el estudio de la superficie y de la atmósfera terrestres demuestra el creciente interés que se

le está dando, a nivel mundial, al estudio del medio ambiente (Metz, Davidson, Swart y Pan, 2001).

Ortega y Rodríguez (1997) identifican la evaluación ambiental como el procedimiento técnico jurídico-administrativo empleado para la toma de decisiones relacionadas con actividades con repercusión sobre el medio ambiente, regulado por la legislación vigente. La Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) es un análisis integral, amplio y formal que considera los aspectos ambientales positivos y negativos generados tras la intervención del hombre, convirtiéndose en un proceso preventivo y en una herramienta de apoyo al desarrollo sostenible.

A nivel nacional e internacional se han adelantado múltiples estudios de índole ambiental en las cuencas hidrográficas y cálculo de índices a partir de la teledetección. Muñoz Guerrero, Rodríguez Montenegro y Romero Hernández (2009) analizan los cambios del uso del suelo y coberturas en la microcuenca Las Minas, corregimiento de La Laguna, municipio de Pasto, en el departamento de Nariño, a partir de un análisis multitemporal; el periodo analizado fue de 19 años, entre 1989 y 2008. En este estudio se implementaron diferentes herramientas y procesos cartográficos como la fotointerpretación, el tratamiento y análisis de imágenes satelitales. Dicho análisis mostró una pérdida del recurso natural bosque secundario equivalente a 58.51 ha, con una deforestación por año de 3.08 ha. Cruz Bello (2011), con un análisis multitemporal de la degradación ambiental de la cuenca del río Necaxa, ubicado en México, concluye que el incremento de las zonas agrícolas y principalmente de los poblados en el área de estudio han provocado, en doce años, una reducción de aproximadamente 2.000 ha en las zonas de bosque (5% del área de estudio). Quaíni (2011), por su parte, realiza un análisis espacio-temporal de un Índice de Incidencia Antrópica en la Cuenca la Matanza Riachuelo (CMR), en la Provincia de Buenos Aires, Córdoba, Argentina. Dentro de las conclusiones principales se obtuvo que el sector bajo de la CMR es el que se encontró más alejado del estado natural del ecosistema fluvial. Santana, Escobar y Capote (2010), con el estudio titulado *Estimación de un índice de calidad ambiental urbano, a partir de imágenes de satélite*, derivan la estimación de cinco

indicadores temáticos (TS, NDVI, LWCI, NSI y SAVI) a partir de una imagen satelital Landsat ETM+.

En Colombia se ha incrementado el uso de imágenes de satélite, no solamente para estudios temáticos individuales, sino también para realizar evaluaciones de impactos ambientales y sus consecuencias sobre los ecosistemas tropicales. Instituciones como el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), el Instituto Alexander von Humboldt (IAvH), el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Instituto de Investigaciones Marinas (INVEMAR), entre otras, además de varias universidades del país, desarrollan proyectos de investigación y aplicación, basados en la utilización de imágenes digitales de satélite, orientados principalmente al conocimiento del medio ambiente y las variaciones producidas por causas naturales y antropogénicas (Gónima y Durango, 2005).

A nivel internacional, el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente y varios dirigentes del mundo vienen promoviendo políticas de conservación a través de la promoción de los compromisos contenidos en los acuerdos suscritos en las Cumbre de La Tierra que se han desarrollado hasta la fecha, siendo la más reciente la de París en diciembre del 2015. Colombia, tras la implementación de la Ley 99 de 1993, sus Decretos Reglamentarios y la adopción de legislación internacional para la protección del medio ambiente, le asigna gran relevancia a los recursos naturales con los que cuenta el país.

Por lo anterior, el presente proyecto de investigación planteó el cálculo de un índice antrópico en la cuenca del río Cauca, ubicado en el departamento del Valle, a través de la aplicación de técnicas de teledetección sobre imágenes ópticas y de radar de los años 1998, 2008, 2011 y 2014. La generación de este índice permitió identificar la baja incidencia antrópica en la zona y comprobar que la cuenca del río Cauca no se ha visto afectada considerablemente y de manera negativa tras el incremento de la población, la variación en su longitud y el cambio de uso del suelo.

Finalmente, con la aplicación de la propuesta metodológica, se demostró que el cálculo de la importancia en función de la calidad ambiental resulta muy pertinente para la EIA, debido a que, al utilizar un enfoque más objetivo, se clasifica un mayor número de impactos en las categorías de severo y crítico, que podrían ser subestimados con el uso de otros métodos cualitativos, pero que al evidenciarse, exigen del equipo evaluador un análisis minucioso y sustentado en la selección de las medidas de manejo que se deben implementar para recuperar el factor afectado.

2. Metodología

2.1. Área de estudio

El área de estudio es la extensión de la Cuenca Tributaria del Valle del Cauca que se encuentra en jurisdicción del departamento del Valle, el cual comprende un área de 19.349 m² (Figura 1). De acuerdo a la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC) y a la Universidad del Valle (2009), en el recorrido del río Cauca por el departamento del Valle del Cauca, los afluentes más importantes sobre la margen derecha son los ríos Ovejas, Palo, Amaime, Guadalajara, Tuluá, Bugalagrande y La Vieja; sobre la margen izquierda los tributarios más destacados son los ríos Timba, Jamundí, Riofrío, Cañaveral y Risaralda. Para el trabajo de investigación, el área de estudio fue dividida en zonas de trabajo: zona sur, zona centro y zona norte, tal como lo muestra la Figura 2.

Cuenca Hidrográfica Río Cauca - Valle del Cauca

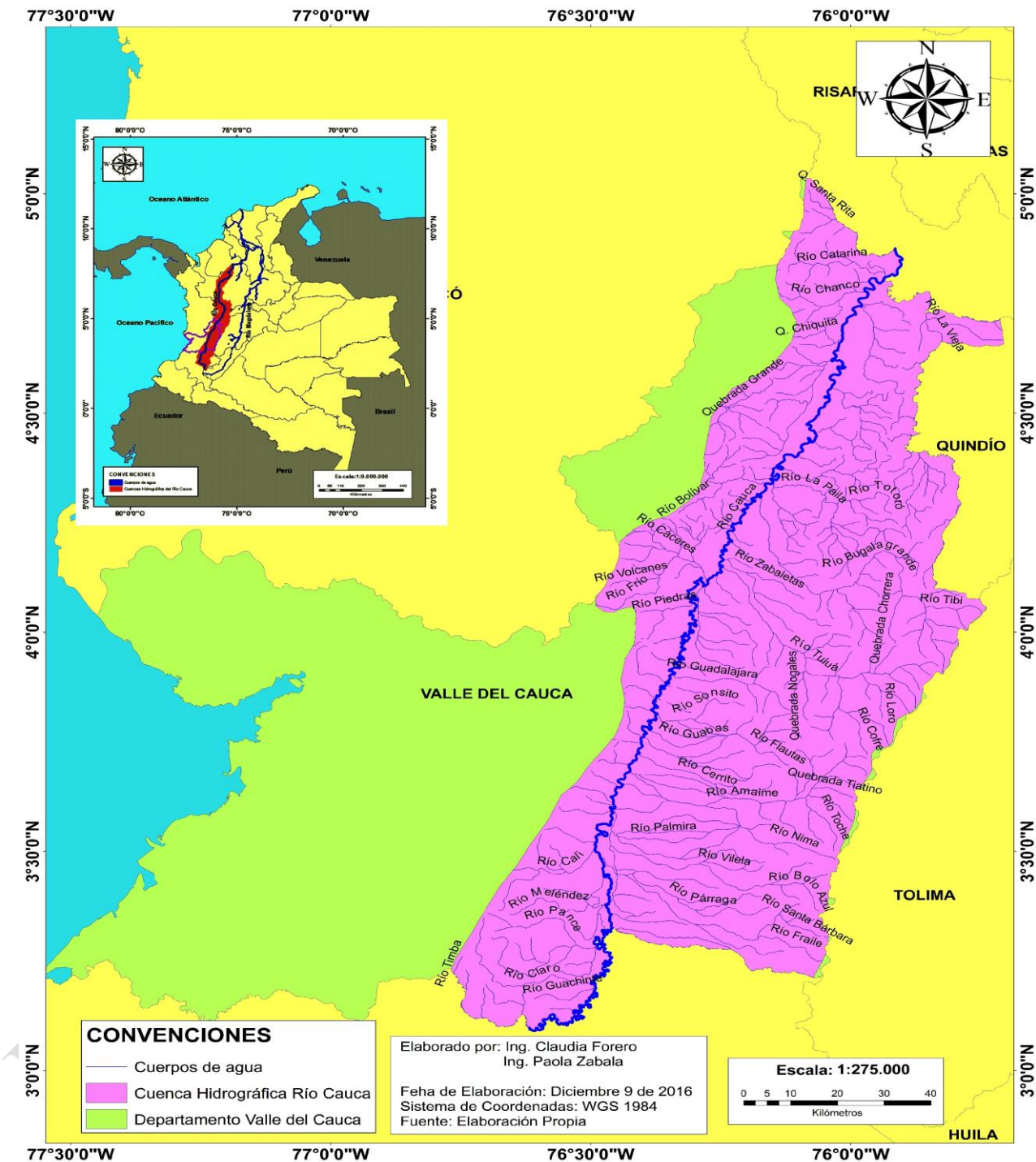


Figura 1. Cuenca del río Cauca en el Departamento del Valle

Fuente: Elaboración propia.

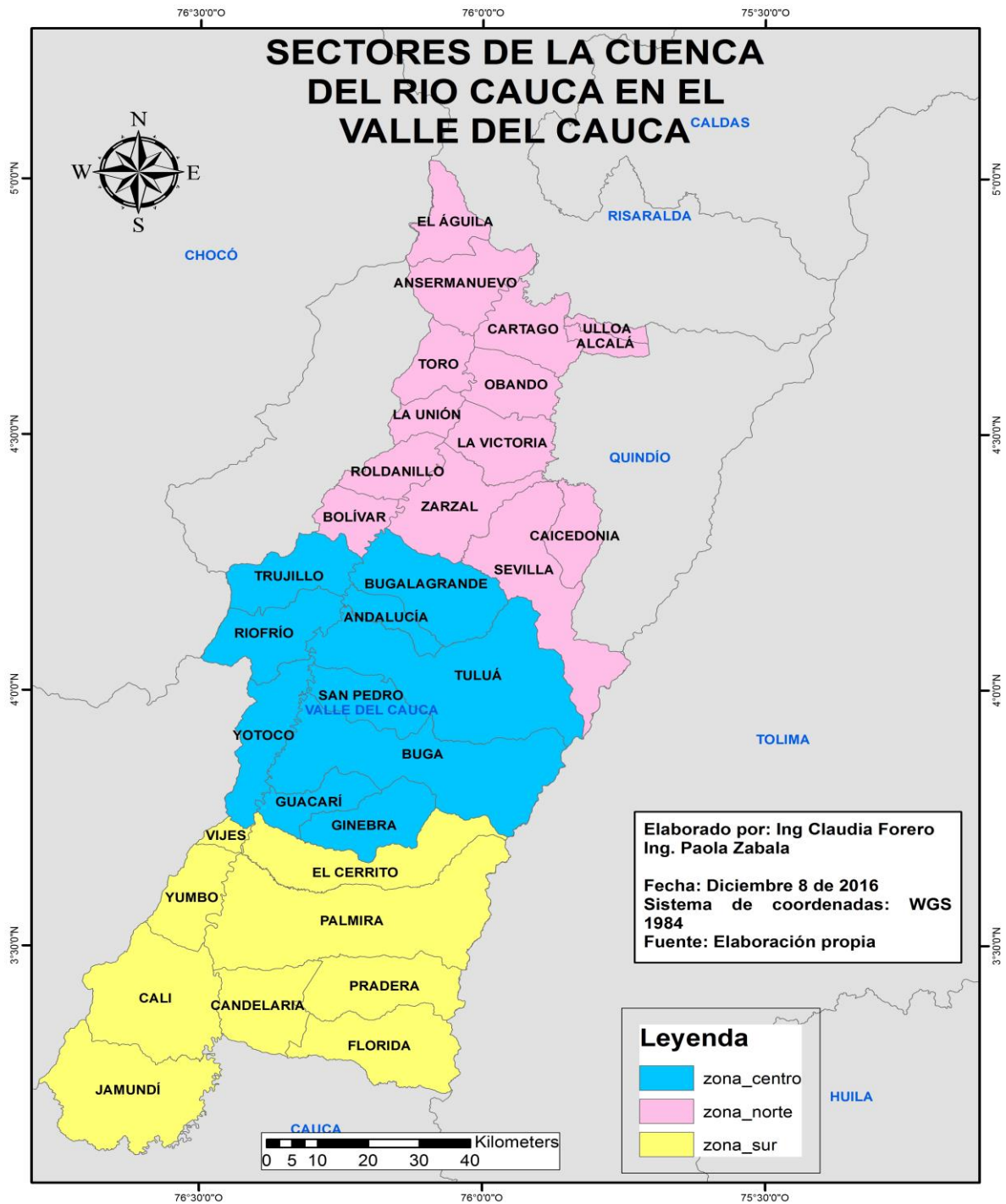


Figura 2. Zonas de trabajo de la Cuenca del río Cauca

Fuente: Elaboración propia.

2.2. Materiales y equipos

Para la consecución del objetivo del estudio se emplearon las imágenes digitales referidas en la Tabla 1 de la constelación de satélites de Landsat y Radarsat 2:

Tabla 1. Imágenes utilizadas en el trabajo de investigación

TIPO DE SENSOR	ID IMÁGEN	PATH - ROW	Fecha de toma
Landsat 5	LT50090571999191XXX06	PATH=009 ROW=057	1999-07-10
Landsat 5	LT50090581999191CPE07	PATH=009 ROW = 058	1999-07-10
Landsat 7	LE70090572008256EDC00	PATH=009 ROW=057	2008-09-12
Landsat 7	LE70090582008256ASN00	PATH=009 ROW = 058	2008-09-12
Landsat 8	LC80090572014088LGN00	PATH=009 ROW=057	2014-03-29
Landsat 8	LC80090582014088LGN00	PATH=009 ROW = 058	2014-03-29
Radarsat 2	RS2_OK26322_PK264311_DK242715_W1_20110923_105615_HH_HV_SGF		2011-09-23
Radarsat 2	RS2_OK26322_PK264312_DK242716_W1_20110923_105636_HH_HV_SGF		2011-09-23

Fuente: Elaboración propia.

La búsqueda y descarga de las imágenes Landsat se realizaron en el sistema de archivo digital del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS, 2016). El nivel de procesamiento de dichas imágenes es denominado producto Level L1, que corresponde a imágenes geográficamente referenciadas. El formato de archivos en que fue recibida la imagen es GEOTIFF (archivos TIFF con encabezados que indican posición geográfica). Las imágenes están georreferenciadas con el Datum WGS84 y el sistema de proyección UTM en la zona 18 (norte).

Así mismo, las imágenes de Radarsat 2 se solicitaron al Banco Nacional de Imágenes administrado por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi, las cuales fueron entregadas

ortorrectificadas y georeferenciadas con el Datum WGS84 y el sistema de proyección UTM en la zona 18 (norte).

2.3. Metodología de trabajo

Siguiendo los pasos estipulados por Basterra (2011) para el preprocesamiento de las imágenes ópticas se realizaron los siguientes procesos: corrección geométrica; corrección radiométrica; corrección atmosférica y corrección de bandeo (eliminación de Gap fills) de las imágenes Landsat 2008 a partir del Software ENVI Versión 5.0. Una vez preprocesadas las imágenes, se procedió en el programa Erdas 2011 a elaborar los mosaicos de las imágenes por año de estudio, 1999, 2008 y 2014. En la Figura 3 se evidencia el marco metodológico seguido para la presente investigación.

En proceso de diagramación

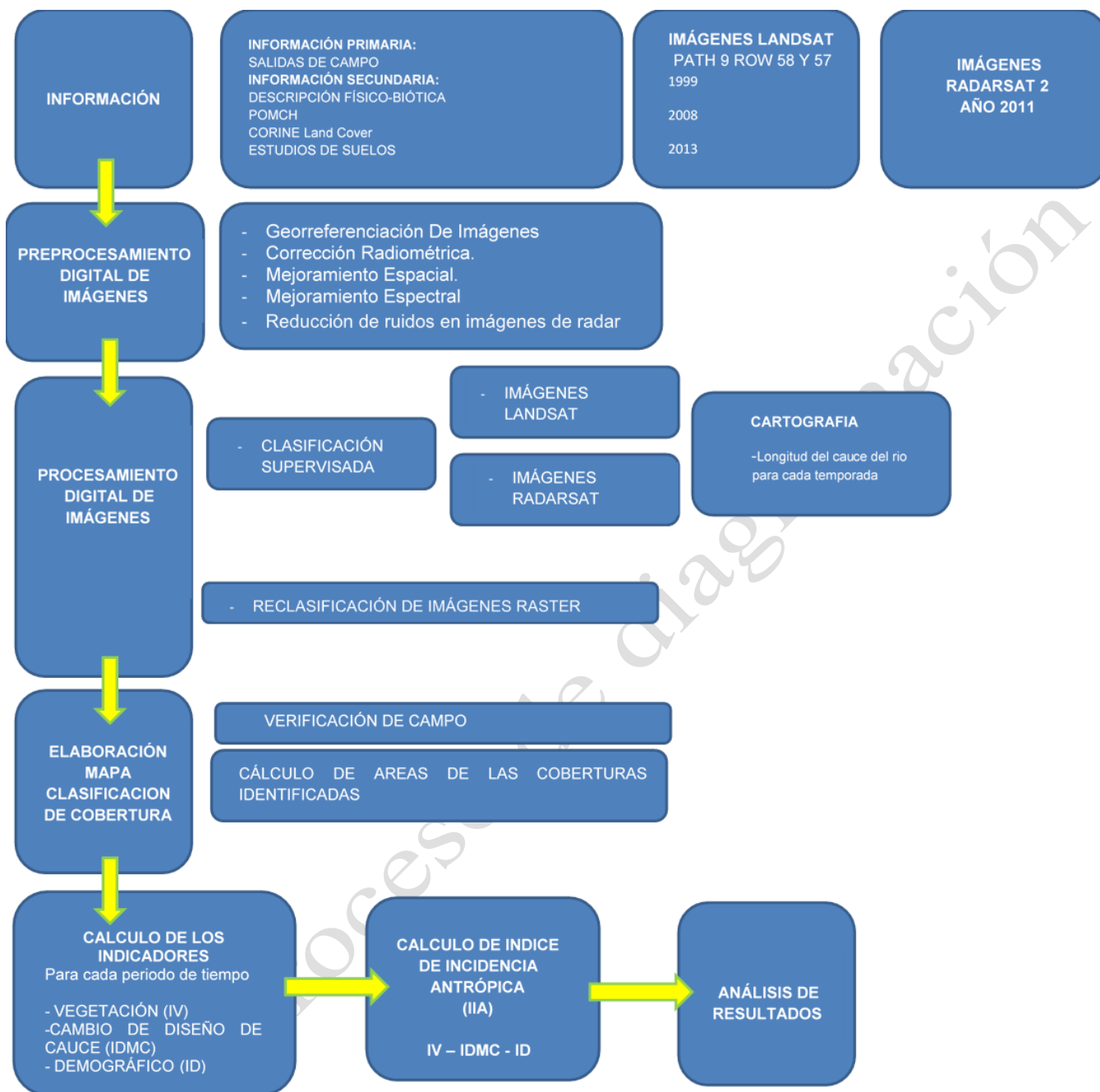


Figura 3. Marco metodológico

Fuente: Elaboración propia.

Igualmente, con el programa Erdas 2011 se realizó la remoción de Ruido o Speckle a las dos imágenes de Radarsat 2 y se elaboró el mosaico de imágenes del año 2011. Para realizar la clasificación de las imágenes tanto las ópticas como las de radar, se utilizó el programa Envi 5.3, se elaboraron los ROIs o muestras de coberturas y se ejecutó la clasificación supervisada por el método de Maximun Likelihood, de acuerdo a la metodología *Corine Land Cover* adaptada para Colombia, elaborada por IDEAM, IGAC, IAvH, SINCHI, UAESPNN y CORMAGDALENA. (2010). Esta clasificación fue evaluada utilizando los estudios de uso y cobertura elaborados por el IGAC para los años 1999 y 2012 (Mapa de coberturas de la Tierra CORINE Land Cover adaptada para Colombia, escala 1:100.000) y con visitas de campo realizadas a la zona de trabajo. Las imágenes producto de la clasificación fueron posteriormente reclasificadas para obtener las coberturas necesarias para la determinación del Índice de Incidencia Antrópica.

Las imágenes Landsat y Radarsat 2 clasificadas se vectorizaron y se obtuvieron los mapas finales, base para el cálculo de los indicadores demográfico, de vegetación y modificación del cauce. Así mismo se calculó por mosaico de imagen el área de cada una de las coberturas en las zonas de trabajo en las que se dividió el área de estudio. Con la determinación del área de terreno de las coberturas, se prosiguió a calcular los índices demográficos, de vegetación y de modificación de cauce y por último el Índice de Incidencia Antrópico, de la siguiente manera:

Índice Demográfico: Se obtuvieron las proyecciones de población de la página web del Departamento Nacional de Estadística (DANE, 2015), para los municipios del departamento del Valle del Cauca entre los años 1985 a 2020, con estos datos, en el programa estadístico Minitab 17, se determinó la ecuación de regresión que describe el crecimiento poblacional.

Para el tratamiento de los datos se realizó la graficación de los datos de cada población por la opción de graficas probabilísticas y se realizaron regresiones las cuales de acuerdo al índice de correlación se tomó la fórmula que más se ajustaba a la gráfica; hay que tener en cuenta que MINITAB utiliza dos métodos. Para la regresión lineal utiliza el modelo de mínimos cuadrados, para esto se debe especificar la forma funcional correcta con el fin de modelar apropiadamente cualquier curvatura. Para el caso de curvas cuadráticas el software eleva la variable al cuadrado para ajustarse al comportamiento de los puntos, esto tiene como característica.

Con base en esta información y la extensión del área urbana identificada sobre las imágenes clasificadas, se calculó la capacidad de carga (corresponde al número máximo de población que puede establecerse en un área de terreno), de cada municipio que conforma la cuenca hidrográfica y se estableció el Índice demográfico, a partir de la siguiente fórmula:

$$ID = N / K_p$$

N = tamaño poblacional (cantidad de habitantes);

K_p = Capacidad de carga poblacional en el sector estudiado (partido, sector de la cuenca o cuenta entera).

Para establecer el cálculo de la capacidad de carga poblacional se utilizó el método exponencial o logarítmico el cual tiene como base conocer al menos tres censos poblacionales de la zona de influencia a lo largo del tiempo, con esto se halla la tasa promedio de crecimiento de la población, esto ocurre mediante las siguientes ecuaciones:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = KP \quad \text{Siendo } K \text{ constante hallándose con la ecuación logarítmica siguiente } \ln P_2 - \ln P_1$$

$=K(t_2 - t_1)$ y despejando la variable, convirtiéndola en una pendiente de una recta la cual es la manera más fácil de obtener.

De esta manera y con los datos de población además del tiempo se tiene despejada la ecuación con la cual se obtuvo la población máxima posible en un área determinada, en este caso se obtuvo que no se ha llegado a la población máxima posible en la totalidad de poblaciones lo que demuestra que todavía está en fase de crecimiento exponencial.

Indicador de Vegetación: A partir de la información extraída de las imágenes clasificadas se determinó el área de vegetación nativa o bosques en estadios naturales y la vegetación plantada o artificial en los años 1999, 2008 y 2014 por cada zona de trabajo del área de estudio:

Con esta información se aplica la fórmula para el cálculo del Índice de vegetación.

$$IV = ((a*N) + A)/a$$

Dónde: a es una constante, N es la proporción del área con vegetación natural, y A la del área con vegetación artificial.

Para calcular el indicador de vegetación se estableció un mayor peso para la vegetación natural indicando para este una equivalencia del doble de la vegetación artificial, de esta manera se da un enfoque conservacionista a este indicador.

Indicador de Modificación de Cauce: Se calculó la longitud de cauce del río Cauca (cauce principal) sobre las imágenes clasificadas de los años 1999, 2008, 2011 y 2014 y teniendo como punto de referencia la longitud del cauce del río del año 1977 proporcionado por la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC, 2014)-, se determinó el índice de modificación de Cauce por cada año y zona de trabajo del área de estudio, conforme a la fórmula:

$$IMDC = 1 - (\text{long- río } x / \text{long} - \text{MAX})$$

IMDC: de 0 a 1.

Long-rio x : longitud del río para cada año de estudio

Long – río MAX: longitud del río para el año de referencia 1977

Es importante tener en cuenta la escala de las fuentes de información, para el caso de la imagen de 1977 y todo el estudio es 1:100.000.

Índice de Incidencia Antrópica (IIA): Calculados los indicadores demográficos, de vegetación y de modificación de cauce, se determina el índice de incidencia, aplicando la siguiente fórmula:

$$IIA = ID * (1 - IV) * IMDC$$

Donde:

ID: Indicador Demográfico

IV: Indicador de Vegetación

IMDC: Indicador de Modificación del Diseño del Cauce

Al igual que para los indicadores, el rango del índice IIA es entre 0 y 1. Cuando IIA=0 significa que el sistema está en su estado natural (desde el punto de vista demográfico, de cobertura de vegetación y del diseño del cauce), mientras que el IIA=1 representa el estado de máxima transformación antrópica de la cuenca, y donde el sistema pierde todas sus características naturales.

3. Resultados y discusión

3.1. Clasificación Supervisada

Se realizó la clasificación supervisada utilizando el método de Maximun Likelihood para las tres imágenes Landsat (Figura 4) y Radarsat 2.

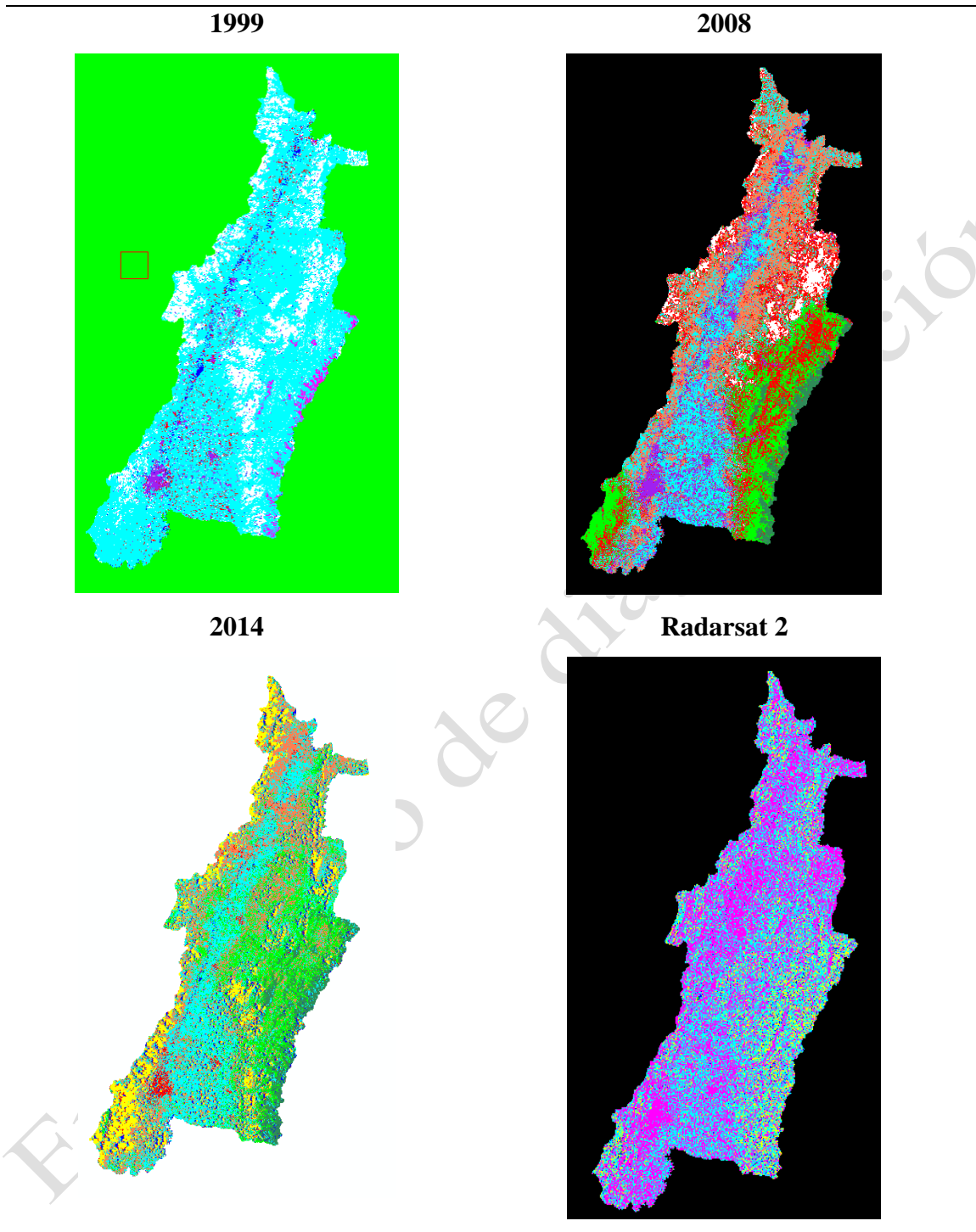


Figura 4. Imágenes producto de la Clasificación Supervisada

Fuente: Elaboración propia con base en imágenes Landsat y Radarsat..

Para evaluar la precisión del producto de la clasificación y validar que las clases incluyan realmente el área correspondiente se realizó la Matriz de Confusión para los años 1999, 2008, 2011 y 2014. Este método consiste básicamente en conocer la exactitud de la clasificación comparando muestras de píxeles en la imagen original (imagen realidad)⁴ con los correspondientes de la imagen clasificada y cuantificar la exactitud en porcentaje de píxeles clasificados correctamente dentro de esa clase, los faltantes (por error de omisión, es decir, aquellos píxeles que el método de clasificación no incluyó correctamente a la clase a la que pertenecen) y los sobrantes (por error de comisión, es decir, aquellos píxeles que pertenecen a otra clase).

Tabla 2. Coeficiente Kappa – Promedio de Exactitud

Año	Promedio de exactitud	Coeficiente kappa
1999	95,89 %	0,95
2008	93,57 %	0,80
2014	97,88 %	0,97

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 2 se pueden ver los porcentajes de exactitud global obtenidos de la matriz de confusión de cada clasificación. Se obtuvieron porcentajes por encima del 70 % de exactitud global, un desempeño relativamente bueno de la clasificación, y valores kappa entre 0,80 y 0,97. De acuerdo con Chuvieco (2010), el coeficiente kappa intenta delimitar el grado de ajuste debido sólo a la exactitud de la clasificación, prescindiendo del causado por factores aleatorios; sus valores varían entre -1 y 1; si el valor es 1 significa un acuerdo pleno entre la realidad y la imagen clasificada; cuando es cero indica que el acuerdo observado es puramente debido al azar.

⁴ Las imágenes Landsat 1999 y 2008 se comprobaron con los estudios de uso y cobertura realizados por el IGAC en los años 1999 y 2012.

Como se observa en la Tabla 2, el valor de kappa fue relativamente alto ($>0,80$) para las imágenes.

3.2. Determinación de las coberturas para el cálculo de índices necesarios para definir el Índice de Incidencia Antrópica

Para el cálculo de los indicadores de vegetación, demográfico y cambio de cauce, se hizo necesario reclasificar las imágenes raster producto de las clasificaciones supervisadas y obtener las clases equivalentes a las categorías 3 de *Corine Land Cover* agua, Vegetación Natural o autóctona, Vegetación artificial, plantada o alóctona, Área Urbana, No Clasificada. Se tuvo en cuenta esta categorización teniendo en cuenta los requerimientos de información de los algoritmos aplicados.

Al obtener estos mapas finales se estableció que al realizar la clasificación supervisada sobre la imagen Radarsat 2, las coberturas de zona urbana, vegetación natural y vegetación artificial no son claramente discriminadas, caso contrario ocurrió con los cuerpos de agua. Por tal razón, la imagen de radar es tomada en cuenta solamente para la validación de la longitud del cauce del Río Cauca (Figura 5).

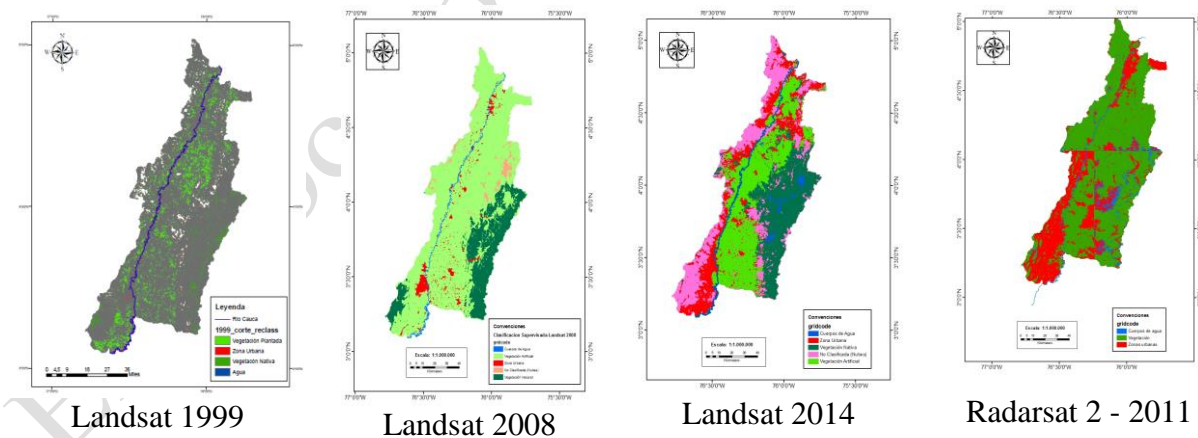


Figura 5. Clasificación supervisada de las imágenes de satélite

Fuente: Elaboración propia a partir de imágenes Landsat y Radarsat 2.

3.2. Indicador Demográfico – ID

A continuación, se presenta la estimación del indicador demográfico, de vegetación y de diseño de cauce para la cuenca del río Cauca en el Valle del Cauca. El objetivo del indicador demográfico es establecer la incidencia de la población, cuando el ID=1 se asume que la incidencia antrópica es máxima y cuando se aproxima a 0 se considera un bajo impacto de la población sobre el territorio.

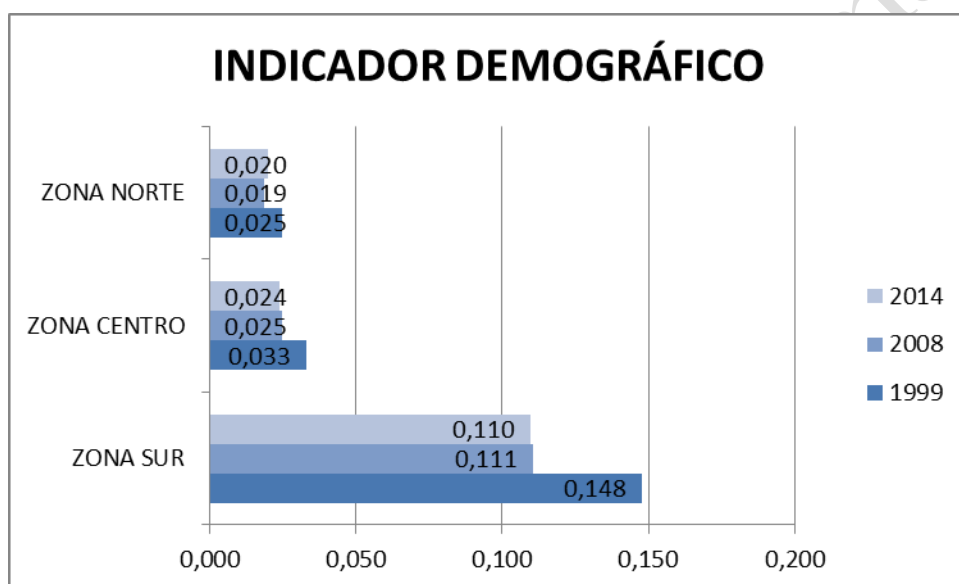


Figura 6. Indicador Demográfico

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 6 se evidencian los valores obtenidos en el cálculo del Índice Demográfico, se observan valores más altos en la zona sur del área de estudio, esto debido a que las principales ciudades del departamento como Cali, Yumbo, Palmira y Jamundí se encuentran en este sector siendo a su vez las de mayor densidad poblacional, el crecimiento y el tamaño de la población en las zonas norte y centro son mucho menores caracterizándose el departamento por encontrarse la menor población en el noroccidente (Torres, 2013).

3.3. Indicador de Vegetación - IV

El Indicador de Vegetación (IV) está diseñado de tal manera que represente la proporción de zonas verdes en la cuenca teniendo en cuenta la proporción de vegetación natural y artificial, ambos como medida de la incidencia antrópica sobre el ecosistema fluvial original.

Se considera que si $IV=1$ el área estará completamente cubierta por vegetación natural (autéctona). El indicador de vegetación disminuye a medida que disminuye la cobertura vegetal con respecto a otras coberturas o a medida que disminuya el área natural con respecto a la cobertura artificial. Cuando el indicador de vegetación equivale a 0 se asume que la vegetación es nula, es decir no hay presencia de vegetación en la zona de estudio.

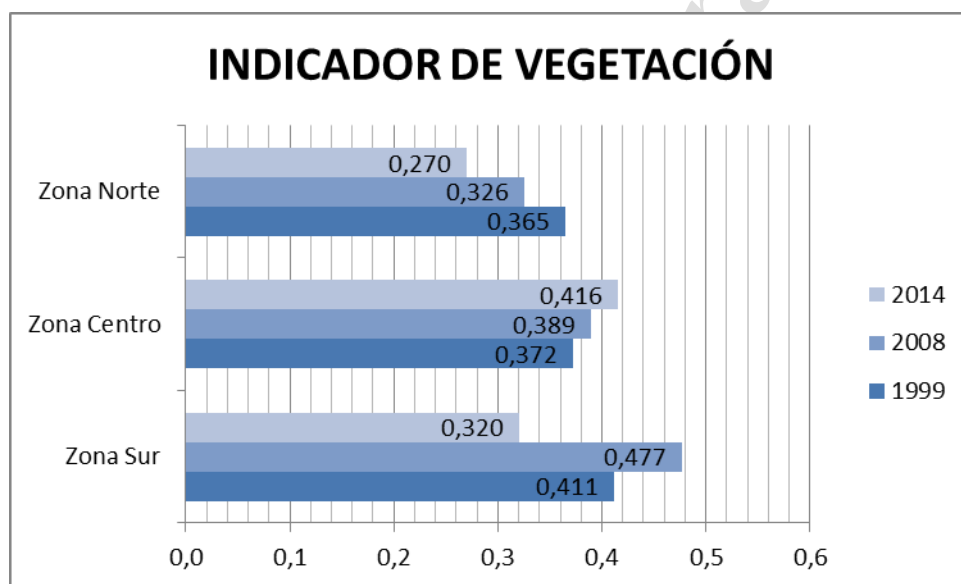


Figura 7. Indicador de Vegetación

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a los valores obtenidos en la Figura 7, el comportamiento del indicador de vegetación en los 3 sectores es muy similar obteniendo valores menores a 0,5, esto se explica dado que la producción agropecuaria del departamento se concentra principalmente en los márgenes del río Cauca, en el sector norte y parte del centro la economía agropecuaria se centra en el cultivo del café consolidándose como la zona más agrícola del departamento.

En el año 2009, Madero y Nuñez (2009) realizaron un estudio donde identificaron los cambios de cobertura de área y uso del suelo en las zonas de los humedales La Bolsa, Charco de Oro y El Pital, localizados en la parte plana del municipio de Andalucía corregimiento de Campoalegre y El Salto en el Valle del Cauca con información cartográfica y satelital de los años 1950, 1998 y 2002. Estos autores lograron identificar los cambios que ha sufrido la cobertura del suelo en la zona, por ejemplo, una alta variación en el paisaje pasando de un hábitat en un alto estado natural de conservación a un hábitat en condiciones precarias y fragmentadas por la implementación de agricultura de altos insumos y pasturas lo cual se ve claramente reflejado en el resultado del Indicador de Vegetación donde si bien es cierto que los bajos valores identifican un bajo impacto en el cambio de la cobertura natural a la artificial, si es evidente el deterioro progresivo del paisaje a partir del establecimiento de coberturas como cultivos de caña de azúcar, café y pasturas a lo largo de la cuenca.

4. Indicador de modificación del diseño del cauce

Para el presente proyecto de investigación se tomó como línea base información en formato shapefile de ESRI del río Cauca para el año 1977 a una escala 1:100.000 suministrada y recolectada por la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC, 2014), para el trabajo de Modelación Matemática del Río Cauca (Tabla 3).

Tabla 3. Longitud Río Cauca en el Valle del Cauca año 1977

ZONA SUR (Km)	ZONA CENTRO (Km)	ZONA NORTE (Km)	TOTAL (Km)
199,1047901	136,4759537	122,6988544	458,2795982

Fuente: Elaboración propia.

Tras la clasificación supervisada de las imágenes Landsat y de Radarsat 2, se calculó la longitud del cauce para los años en estudio.

Tabla 4. Cálculo de longitud río Cauca en el Valle del Cauca

AÑOS	LONGITUD DEL RIO - ZONA DE ESTUDIO (KM)			TOTAL LONG (Km)
	ZONA SUR	ZONA CENTRO	ZONA NORTE	
1999	198,78	135,45	121,62	455,85
2008	193,88	132,56	120,97	447,41
2011 (RADAR)	169,542524	132,6456593	112,4108763	414,59

Fuente: Elaboración propia.

El rango del Índice de Modificación de Diseño del Cauce (IMDC) va de 0 a 1, el valor será 1 cuando la longitud del cauce sea la máxima, mientras que el IMDC valdrá 0 en el caso hipotético que la longitud sea cero. Si se sobrepasaría ese valor significaría que se ha alargado el cauce más allá del valor original.

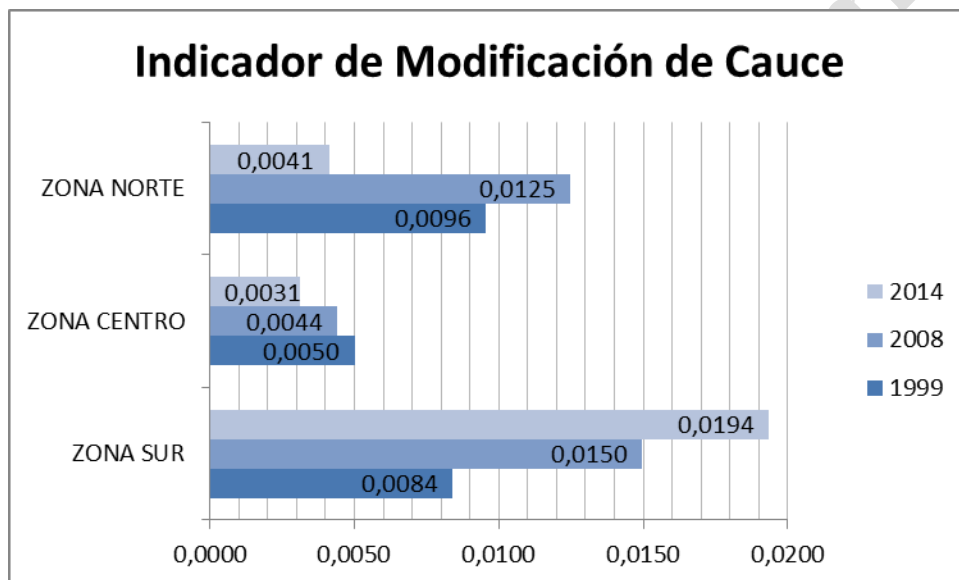


Figura 8. Indicador de Modificación de Cauce

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados obtenidos en el indicador de diseño de cauce disponibles en la Figura 8 corroboran lo presentado por la CVC en el año 2014 en el documento Modelación Matemática del río Cauca donde se estableció un análisis morfológico comparativo entre 1977 y 1998 encontrando que la variación de la relación ancho/profundidad/longitud en el período 1978-1998 es mínima, aunque el ancho y la profundidad a banca llena en promedio se han reducido en 9.1 y 7.3 %, respectivamente. El río Cauca desarrolla diferentes grados de sinuosidad a lo largo de

todo su cauce. En términos generales, es posible afirmar que el patrón meándrico no ha variado significativamente en el tiempo, presentando un incremento en la sinuosidad poco importante.

5. Estimación del Índice Antrópico - IA

Una vez obtenidos los indicadores demográficos, de vegetación y de modificación del diseño de cauce, se procede a obtener un índice que refleje las características de drenaje superficial de la cuenca y que en el análisis temporal refleje sus cambios durante casi tres décadas.

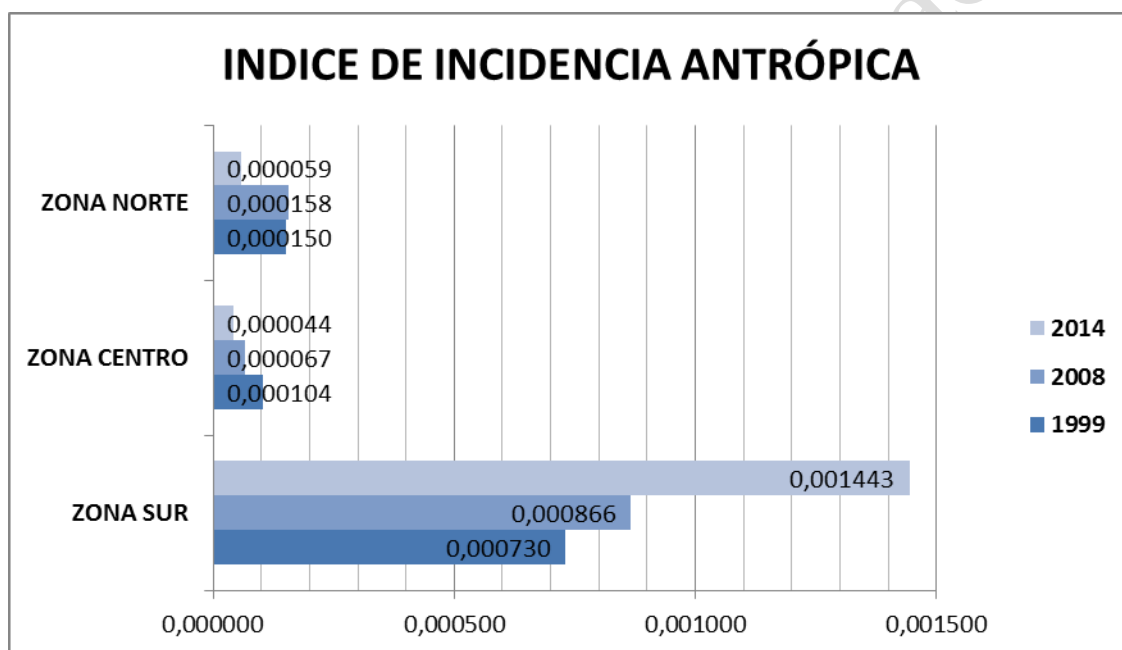


Figura 9. Indicador de Vegetación

Fuente: Elaboración propia.

Al evaluar los resultados obtenidos en la Figura 9 del índice de incidencia antrópica, todos muy cercanos a cero, es posible identificar que a pesar de encontrarse la mayoría de las ciudades ubicadas en la zona de influencia de la cuenca en un estado de crecimiento poblacional progresivo, el grado de afectación que ha tenido la cuenca no ha sido tan relevante frente a su funcionalidad y diseño de cauce, es decir, se encuentra en un desarrollo ecosistémico natural donde hay un mínimo impacto antrópico que afecte su funcionalidad, excepto por el sector sur

donde se refleja un mayor impacto dado que es donde hay mayor concentración de población y desarrollo económico.

Sin embargo, cabe mencionar que a pesar que en el año 2014 (fecha más reciente) las tres zonas de trabajo presentan un índice bajo, la zona sur ha tenido un incremento considerable en la incidencia antrópica, de acuerdo a estudios realizados por la CVC en el sector de la ciudad de Cali especialmente. Son notables los efectos que han causado acciones como las explotaciones mecanizadas y no controladas de material de arrastre, las escombreras ilegales, los vertimientos informales de aguas residuales, además de presentar un alto grado de riesgo ante amenaza sísmica y de inundación de la ciudad, derivado de la posible licuación de suelos y la ruptura del jarillón o dique marginal de protección.

6. Conclusiones

Los valores obtenidos en el Índice de Incidencia Antrópica cuyo valor máximo fue 0,001443, permiten inferir que a pesar de las acciones antrópicas que se han presentado durante el periodo de estudio, no existe una variación marcada del cauce natural del río Cauca en el Valle del Cauca.

Al estudiar la distribución espacial y temporal del impacto que el hombre ha tenido sobre la Cuenca del río Cauca en el departamento del Valle, se puede identificar que en el periodo comprendido entre 2008 y 2014 ha existido una mayor incidencia antrópica especialmente en el sector sur de la cuenca, esto se debe posiblemente a un fenómeno demográfico y social de retornos masivos producto del cambio en las condiciones de orden público que permitió el acceso a las zonas rurales, como lo evidencia este estudio.

Al analizar los sectores de la cuenca que han sido más afectados se puede identificar que el sector sur de la cuenca del río Cauca en el departamento del Valle del Cauca ha sido la zona más afectada en especial entre el año 2008 y 2014 esto se debe a la aceleración de prácticas productivas y expansión de los asentamientos urbanos.

Al estudiar el Índice de Diseño de Cauce se puede afirmar que ha sido mínima la variación del río Cauca en el departamento del Valle del Cauca, esto se debe principalmente a que a pesar de que el departamento se ha consolidado en el país como un espacio de producción agrícola e industrial, su crecimiento poblacional con relación al área rural no ha sido relevante, encontrándose aún en un estado de crecimiento potencial de la población y asentamientos urbanos.

El diseño del cauce de la cuenca principal del río Cauca en cuanto a su longitud no se ha visto afectado pese a las actividades antrópicas que se desarrollan en la cuenca, probablemente ha presentado alta variabilidad en su caudal, pero su cauce no se ha modificado considerablemente.

La vegetación nativa se ha visto disminuida notablemente en la cuenca hidrográfica pese a que la densidad de población en las zonas cercanas a los bosques en estas tres décadas ha disminuido tras al desplazamiento originado por el accionar de grupos armados al margen de la ley y a la expansión de monocultivos a gran escala.

El contar con datos espaciales y de comportamiento de la cuenca en términos de vegetación, población y su dinámica en el cauce, permiten establecer indicadores que den a conocer los puntos críticos de las cuencas hidrográficas y contribuir a la formulación de políticas públicas de desarrollo, en este caso es evidente la necesidad de establecer estrategias de ordenamiento y proyección del departamento orientado a la reducción en la presión actual existente en el sur de la cuenca teniendo en cuenta que es la zona de la cuenca donde hay una concentración de la población, la modificación de la cobertura de manera progresiva alterando el equilibrio del paisaje y es mayor la variaciones de cauce.

Para contribuir con la planificación del territorio a partir de estudios como este, es necesario articular la información disponible del estado ecosistémico asociado al río Cauca en el Valle para así poder priorizar las zonas que requieren manejo e implementación de medidas de conservación, en este caso es claro que el sector sur de la cuenca del río Cauca en el Valle del Cauca presenta cambios en el paisaje con una tendencia a predominar las coberturas artificiales,

presenta un crecimiento acelerado de la población y por ende se refleja un mayor índice de incidencia antrópica

7. Recomendaciones

A pesar de contar con resultados bajos en el Índice de Incidencia Antrópica se evidencia que la zona con mayor afectación es la zona sur, teniendo en cuenta que es en esta zona donde se encuentran los asentamientos humanos con mayor desarrollo y la capital del departamento. La evaluación del crecimiento poblacional se constituye como un insumo de gran utilidad para predecir la demanda de recursos naturales, acompañado del procesamiento de información cartográfica, es posible establecer la demanda de recursos y los medios para garantizar el manejo sostenible de las unidades productivas sin amenazar con los recursos naturales.

Referencias

- Basterra, I. (2011). Teledetección-Imágenes Satelitales-Procesamiento Digital de Imágenes, Departamento de Geociencias, Facultad De Ingeniería – UNNE, Chaco, Argentina.
- Bevilacqua, Mariapía, Lya Cárdenas y Domingo A. Medina. (2006). *Las áreas protegidas de Venezuela: diagnóstico de su condición 1993/2004*. Venezuela: Fundación Empresas Polar (FEP).
- Cabrera, E., Galindo, G. y Vargas, D. M. (2011). *Protocolo de Procesamiento Digital de Imágenes para la Cuantificación de la Deforestación en Colombia, Nivel Nacional Escalas Gruesa y Escala Fina*. Bogotá, Colombia: Instituto de Hidrología, Meteorología, y Estudios Ambientales - IDEAM.
- Chuvieco, E. (2010). *Fundamentos de Teledetección*. Madrid, España: Ediciones Rialp S. A.
- Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC). (2009). *Humedales del Valle Geográfico del Río Cauca: Génesis, biodiversidad y conservación*. Santiago de Cali, Colombia: CVC.

Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC) y Universidad del Valle. (2009). Modelación Matemática del Río Cauca. En *El río Cauca en su valle alto* (pp. 270-319). Recuperado de https://www.cvc.gov.co/images/CVC/Tematicas/Recurso_Hidrico/El-rio-Cauca-en-su-valle-alto/8-Modelacion-Matematica.pdf

Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC). (2014). Guía explicativa de la temática de cobertura y uso del suelo. Recuperado de <http://geocvc.co/pdf/GuiaCoberturaUso.pdf>

Cruz Bello, G. M. (2011). Análisis multitemporal de la degradación ambiental de la Cuenca del Río Necaxa. Puebla, Mexico. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/298353101_Analisis_multitemporal_de_la_degradacion_ambiental_de_la_Cuenca_del_Rio_Necaxa_Puebla_Mexico

DANE - Departamento Nacional de Estadística. (2015). Series poblacionales de Colombia, Consultado el 15 de mayo de 2015 en www.dane.gov.co.

Gónima, L. y Durango-Vertel, J. (2005). Aplicaciones ambientales de imágenes digitales de satélite. *Geotrópico*, 3(1), 21-30. Recuperado de http://www.geotropico.org/3_1_Gonima.pdf

IDEAM, IGAC, IAvH, SINCHI, UAESPNN y CORMAGDALENA. (2010). Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra, Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia escala 1:100.000. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Bogotá, Colombia: Editorial Scripto Ltda. Recuperado de http://siatac.co/c/document_library/get_file?uuid=a64629ad-2dbe-4e1e-a561-fc16b8037522&groupId=762

IDEAM, IGAC, IAvH, SINCHI, UAESPNN, INVEMAR y UPTC (En prensa). Mapa de coberturas de la Tierra CORINE Land Cover adaptada para Colombia, escala 1:100.000.

- Madero E. y Núñez C. (2009). Cambios en coberturas de áreas y usos del suelo en tres humedales en el Valle del Cauca. *Acta Agronómica*, 58(4), 308-315. Recuperado de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0120-28122009000400012&lng=es&nrm=iso
- Metz, B., Davidson, O., Swart, R. y Pan, J. (Eds.). (2001). *Climate Change 2001*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Muñoz Guerrero, D. M., Montenegro, M. R. y Hernández, M. R. (2009). Análisis multitemporal de cambios de uso del suelo y coberturas, en la microcuenca las minas, corregimiento de La Laguna, municipio de Pasto, departamento de Nariño. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 26(1), 11-24.
- Quaíni, K. (2011). Análisis Espacio-Temporal de un Índice de Incidencia Antrópica en la Cuenca la Matanza Riachuelo, Provincia de Buenos Aires. Córdoba, Argentina (tesis de maestría). Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Santana Rodríguez, L. M., Escobar Jaramillo, L. A. y Capote Paolo, A. (2010), Estimación de un índice de calidad ambiental urbano, a partir de imágenes de satélite. *Revista de Geografía Norte Grande*, (45), 77-95. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022010000100006>
- USGS - Servicio Geológico de Estados Unidos. (2016). Descarga de imágenes de satélite. Recuperado de <http://www.usgs.gov>
- Torres, M (2013). La geografía económica del Valle del Cauca. *Revista de Economía & Administración*, 10 (1), 48-67. Recuperado de <http://www.uao.edu.co/sites/default/files/Torres.pdf>

Recepción: 12 de junio de 2016

Evaluación: 2 de agosto de 2016

Aprobación: 19 de diciembre de 2016

En proceso de diagramación

En proceso de diagramación