

## EVALUACIÓN MULTICRITERIO Y *LEAST-COST PATH*: ALTERNATIVAS EN LA TOMA DE DECISIONES PARA PROYECTOS DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN ELÉCTRICA

MANUEL ALEJANDRO DOMÍNGUEZ-WALLE<sup>1</sup>, VIRGINIA VARGAS-TRISTÁN<sup>1</sup>, ALFREDO PÉREZ MORALES<sup>2</sup>, SANTIAGO NIÑO-MALDONADO<sup>1</sup>, JACINTO TREVIÑO-CARREÓN<sup>1</sup>, JOSÉ RAFAEL HERRERA HERRERA<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Facultad de Ingeniería y Ciencias, Universidad Autónoma de Tamaulipas  
Centro Universitario Adolfo López Mateos, 87120, Cd. Victoria, Tamaulipas, México  
[madw929@hotmail.com](mailto:madw929@hotmail.com), [vvargas15@hotmail.com](mailto:vvargas15@hotmail.com), [coliopteranino@hotmail.com](mailto:coliopteranino@hotmail.com),  
[jatrevino@docentes.uat.edu.mx](mailto:jatrevino@docentes.uat.edu.mx), [jrherrer@docentes.uat.edu.mx](mailto:jrherrer@docentes.uat.edu.mx)

<sup>2</sup>Departamento de Geografía, Universidad de Murcia  
Facultad de Letras, Santo Cristo 1, 30001, Murcia, Murcia, España  
[alfredop@um.es](mailto:alfredop@um.es)

### RESUMEN

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son eficaces para evaluar proyectos de inversión tales como líneas de transmisión eléctrica. Estos proyectos se han incrementado en las últimas décadas debido a la demanda energética. Dado lo anterior, es necesario conservar la importancia ecológica, como el paisaje y los servicios ambientales. el objetivo fue establecer nuevas trayectorias para líneas de transmisión eléctrica que permitan reducir su impacto visual, mediante la aplicación de una metodología basada en la toma de decisiones (EMC) en un entorno SIG. Se realizaron dos trazados alternativos con base en un proyecto prototipo: uno con evaluación multicriterio (EMC) y otro en combinación con *least-cost path* (LCP). Se encontró diferencia estadística significativa ( $P < 0.01$ ) en torno al efecto visual de las trayectorias. Se comprobó que la EMC en conjunto con LCP reduce el impacto visual de las torres, lo cual puede ser útil para implementaciones futuras.

Palabras clave: línea de transmisión eléctrica, paisaje, evaluación multicriterio, *least-cost path*.

### MULTI-CRITERIA EVALUATION AND *LEAST-COST PATH*: ALTERNATIVES DECISION MAKING FOR PROJECTS OF LINES OF ELECTRICAL TRANSMISSION

### ABSTRACT

Geographic Information Systems (GIS) are effective tools to evaluate projects of investment such as electrical transmission lines. These projects have increased in the last decades due to the energy demand. Given the above, it is necessary to preserve the ecological importance, such as landscape and environmental services. The objective was to establish newpaths for power transmission lines to reduce its visual impact, by applying a methodology based on decision-making (EMC) in a GIS environment. There were two alternative paths based

Recibido: 08/07/2016

Aceptada versión definitiva: 05/10/2016

Editor al cargo: Dr. Ismael Vallejo

[Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International \(CC BY-NC-ND 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

© Los autores  
[www.geofocus.org](http://www.geofocus.org)

Domínguez-Walle M. A., Vargas-Tristán V., Pérez Morales A., Niño-Maldonado S., Treviño-Carreón J., Herrera Herrera J.R. (2016): "Evaluación multicriterio y Least-Cost path: alternativas en la toma de decisiones para proyectos de líneas de transmisión eléctrica", *GeoFocus (Artículos)*, n° 18, p. 191-209. ISSN: 1578-5157

---

on a prototype project: one with multi-criteria evaluation (MCE) and the other one in combination with *least-cost path* (LCP). Significant statistical difference was found ( $P < 0.01$ ) on the visual effect of the trajectories. It was proved that the MCE jointly with LCP reduces the visual impact of the towers, which can be useful for future implementations.

Keywords: power transmission line, landscape, multi-criteria evaluation, *least-cost path*.

## 1. Introducción

El valor paisajístico es considerado como un componente primordial del medio ambiente y, por lo tanto, es importante su conservación ante los proyectos de inversión. En este sentido, para la evaluación de su afectación, se requiere de un integral que contemple a los observadores y a la instalación del proyecto (Aguiló *et al.*, 2000; Fernández-Vitora, 2000).

La evaluación multicriterio (EMC) es una herramienta en la que se consideran los criterios más importantes (factores y limitantes) que influyen en la evaluación del impacto ambiental que ocasionaría un proyecto de inversión, así como los aspectos ambientales de mayor relevancia y las actividades humanas que podrían verse afectadas (Gómez y Barredo, 2006; Valpreda, 2007); por todo ello, resulta una herramienta eficaz aplicada a la problemática ambiental de los ecosistemas con relación a asentamientos humanos (Santos, 1997).

Por otro lado, el algoritmo *least-cost path* (LCP) integrado en los Sistemas de Información Geográfica (SIG), permite establecer un trazado de menor costo sobre un mapa raster de un sitio determinado, de tal forma que se simula una trayectoria en función de las variables introducidas (Menke *et al.*, 2015). Por ejemplo, LaRue y Nielsen (2008) usaron LCP para trazar rutas para representar los probables corredores de los pumas que incluían principalmente pastizales y zonas de ribera en América del Norte. De igual manera, este algoritmo también se ha aplicado en estudios para la protección del ambiente, lo cual ha permitido crear modelos predictivos sobre el impacto que genera el cambio de uso de suelo sobre el movimiento de fauna silvestre (Adriaensen *et al.*, 2003).

La EMC en conjunto con LCP ha sido útil en la generación de nuevas trayectorias para su implementación en proyectos de inversión, tal es el caso de Atkinson *et al.* (2005), quienes propusieron tres rutas alternativas para la creación de una carretera, debido a la búsqueda de minerales en una zona con alta incidencia de heladas, lo que les permitió realizar discusiones sobre el trazado que mejor se adaptó a las condiciones del lugar; de igual forma Bagli *et al.* (2011) realizaron trayectorias alternativas con EMC y LCP para la creación de una línea de transmisión eléctrica, añadiendo las variables de la salud humana, visibilidad y valor económico de la obra.

En los estudios de impacto ambiental, además de la flora, fauna o aspectos socioeconómicos, otro de los parámetros a evaluar es la conservación del paisaje (Muñoz-Pedrerros, 2004). Por ello se ha evaluado el impacto visual en los proyectos de inversión como las torres de transmisión eléctrica, ya que éstas causan un desequilibrio visual con el entorno en las poblaciones urbanas y rurales, por lo que se deben determinar las superficies afectadas con la finalidad de proponer medidas de mitigación (Salinas y Rubio, 2008).

La acelerada transformación de los paisajes en los últimos 50 años ha causado inquietud social por el derecho a un medio ambiente de calidad, lo que denota la falta de estrategias y metodologías que aminoren el impacto visual de obras y actuaciones sobre el paisaje (Busquets y Cortina, 2009).

Debido a la importancia que genera el impacto visual de las torres de transmisión eléctrica y la facilidad de aplicación de los SIG en la evaluación ambiental, el objetivo de este trabajo fue establecer nuevas trayectorias para líneas de transmisión eléctrica que permitan reducir su impacto visual, mediante la aplicación de una metodología basada en la toma de decisiones (EMC) en un entorno SIG.

## 2. Materiales y métodos

En la figura 1 se presenta el diagrama de flujo que se aplicó en el presente proyecto para la realización de las nuevas trayectorias y su posterior análisis de visibilidad, así como los algoritmos y funciones incluidos en el SIG Quantum GIS 2.12.0.

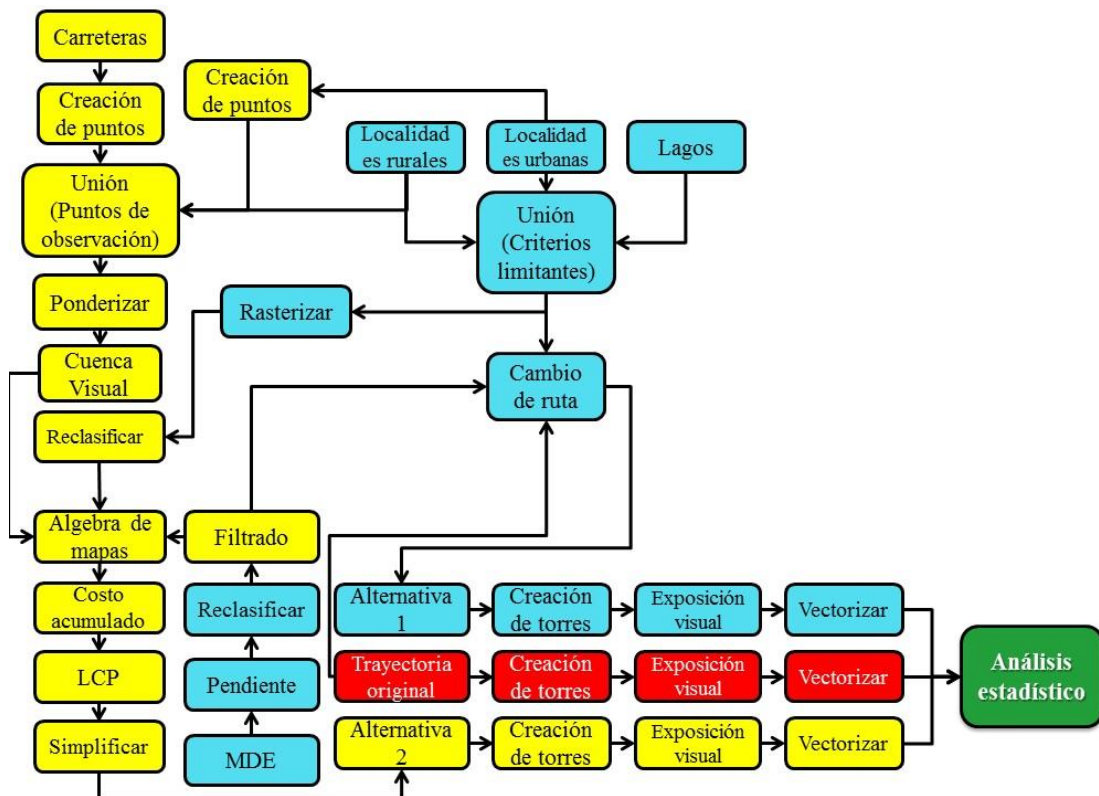


Figura 1. Diagrama de flujo para la creación y análisis de las tres trayectorias.

### 2.1. Localización del área de estudio

Para el presente trabajo se tomó como referencia el proyecto "Estudio técnico justificativo para el cambio de uso de suelo en terrenos forestales de la Línea de Transmisión Eléctrica Champayán-Güémez", ubicado en el estado de Tamaulipas, México (figura 2). La Línea de Transmisión Eléctrica (L. T. E.) de 400 Kv incluyó parte de los municipios de Aldama, Altamira, Casas, González, Güémez y Llera. La línea se extiende desde la subestación eléctrica Champayán (X-583970.65, Y-2500559.76) a la subestación eléctrica Güémez (X-495943.20, Y-2639432.97; WGS 84/UTM zona 14N) con una longitud total de 182,76 km.



Domínguez-Walle M. A., Vargas-Tristán V., Pérez Morales A., Niño-Maldonado S., Treviño-Carreón J., Herrera Herrera J.R. (2016): "Evaluación multicriterio y Least-Cost path: alternativas en la toma de decisiones para proyectos de líneas de transmisión eléctrica", *GeoFocus (Artículos)*, n° 18, p. 191-209. ISSN: 1578-5157

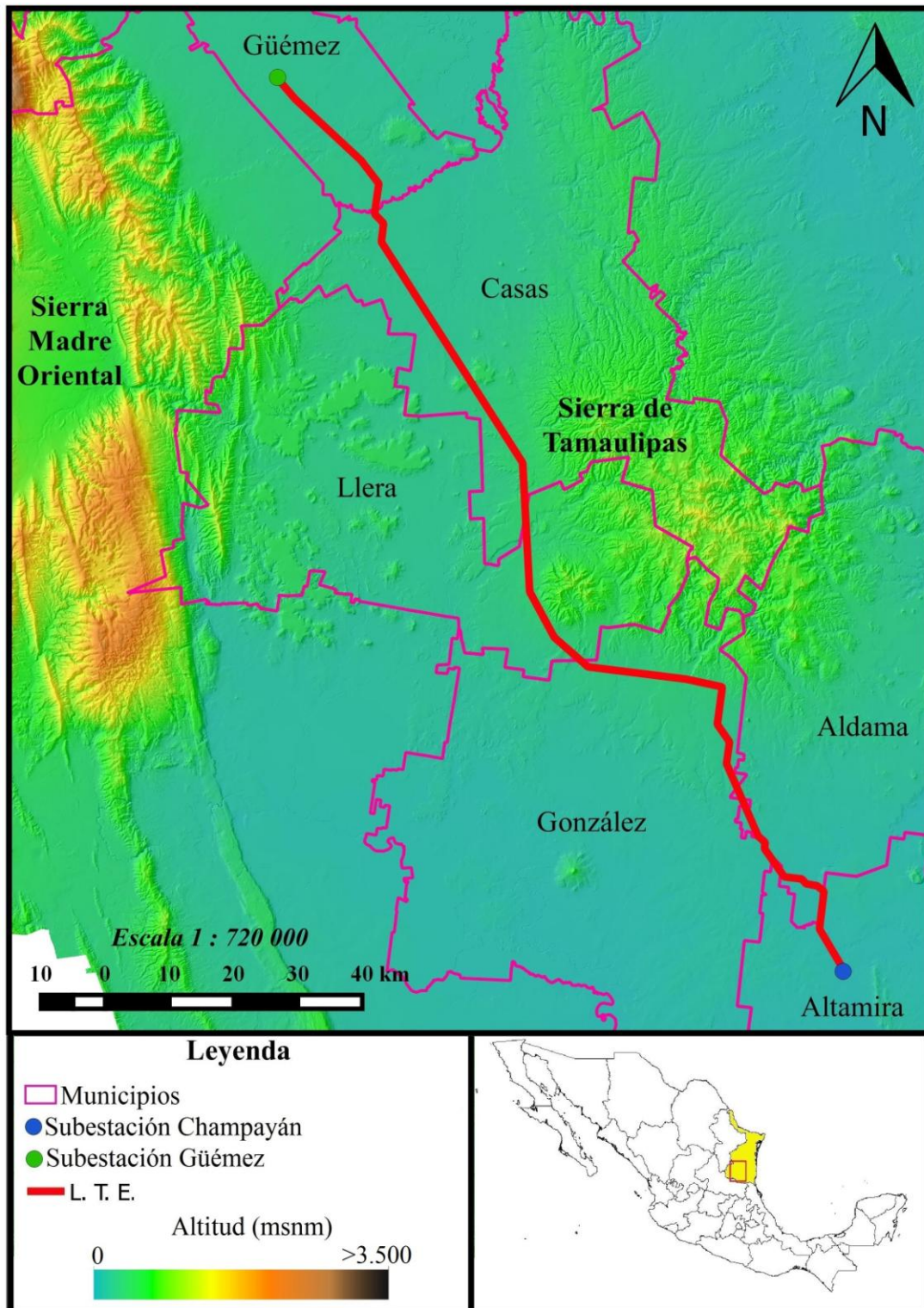


Figura 2. Área de estudio, L. T. E. Champayán-Güémez, orografía y municipios que conforman el proyecto.

Domínguez-Walle M. A., Vargas-Tristán V., Pérez Morales A., Niño-Maldonado S., Treviño-Carreón J., Herrera Herrera J.R. (2016): "Evaluación multicriterio y Least-Cost path: alternativas en la toma de decisiones para proyectos de líneas de transmisión eléctrica", *GeoFocus (Artículos)*, n° 18, p. 191-209. ISSN: 1578-5157

La L. T. E. Champayán-Güemez se ubica entre las principales elevaciones de la región de estudio, la Sierra Madre Oriental y la Sierra de Tamaulipas, por lo que se encuentra fisiográficamente en las provincias "Llanuras y Lomeríos" y "Lomeríos de la Costa Golfo Norte" (INEGI, 1983). En el área predominan las tierras de uso agrícola-pecuario-forestal, el matorral submontano y el xerófilo.

La mayor parte de la L. T. E. Champayán-Güemez está posicionada sobre lomeríos, lo que significa que cualquier obra que se instale dentro de esta zona puede ser vista fácilmente desde los distintos puntos de observación cercanos, ya sean manchas urbanas, localidades rurales o carreteras, debido a la ausencia de elevaciones prolongadas.

## 2.2 Datos y sus fuentes

Para el presente proyecto se realizó un análisis de la cartografía disponible del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) y parte de la creada en el proyecto "Estudio técnico justificativo para el cambio de uso de suelo en terrenos forestales de la Línea de Transmisión Eléctrica Champayán-Güemez". De tal manera que analizando el conjunto de datos del área de estudio se recopilaron capas de asentamientos humanos, lugares de importancia ecológica, cuerpos de agua (perenes e intermitentes), carreteras y MDE con una resolución de 60m.

## 2.3. Creación de nuevas trayectorias

En la realización del proyecto se tomó como ejemplo el trazado original de la obra, compuesto por 540 torres a las que se les asignó un promedio de altura de 50 m (CFE J1000-50, 2014).

Se realizaron dos rutas alternativas con EMC (tabla 1), donde los criterios que se consideraron para su creación fueron seleccionados de acuerdo a su valor de importancia para la conservación del ambiente, y aquellos que influyen en la realización de obras humanas.

**Tabla 1. EMC empleada para la creación de dos alternativas de la L. T. E. Champayán-Güemez.**

Criterios	
Alternativa 1	Alternativa 2
ANP's	ANP's
AICA's	AICA's
Asentamientos humanos	Asentamientos humanos
Cuerpos de agua	Cuerpos de agua
Pendiente	Pendiente
	Paisaje

Los criterios limitantes en la determinación de la alternativa 1 y 2 fueron la ubicación de las Áreas Naturales Protegidas (ANP's), Áreas de Importancia para la Conservación de Aves (AICA's), núcleos de población y cuerpos de agua. Se agregó un buffer según la distancia a la cual deben de estar alejadas las torres de transmisión eléctrica de poblaciones humanas (10 m) y cuerpos de agua (60 m) (NRF-014-CFE-2001). Como factores se tomaron sitios con pendientes menores a 14 % (NRF-014-CFE-2001), por ser los que facilitan la logística de las obras de construcción. Posteriormente, las capas de información mencionadas se unieron a una capa

Domínguez-Walle M. A., Vargas-Tristán V., Pérez Morales A., Niño-Maldonado S., Treviño-Carreón J., Herrera Herrera J.R. (2016): "Evaluación multicriterio y Least-Cost path: alternativas en la toma de decisiones para proyectos de líneas de transmisión eléctrica", *GeoFocus (Artículos)*, n° 18, p. 191-209. ISSN: 1578-5157

raster para la creación de la trayectoria, la cual contuviera los factores ecológicos y geográficos que dificultasen el trazado de una línea de transmisión eléctrica.

Con lo anterior, se realizó la alternativa 1 con supervisión personal, es decir, con intervención manual sin el uso de algoritmos que faciliten el posicionamiento del trazado. Cada vértice de la L. T. E. Champayán-Güémez, se posicionó en un sitio diferente evitando los sitios en los cuales no pudiera desarrollarse el proyecto (criterios limitantes y pendientes mayores a 14 %).

En la alternativa 2 para poder incluir la variable paisaje, primero se obtuvieron los puntos de observación de acuerdo con Fernández-Vitora (2000) considerando: manchas urbanas, localidades rurales y carreteras. La capa de carreteras fue remplazada por puntos con una separación de 200 m, y de la misma manera, para la capa de localidades urbanas, cada polígono se remplazó por puntos a una separación de 200 m.

A las tres trayectorias se les calculó el horizonte visual de sus torres, esto permite conocer la distancia a partir de la cual y debido exclusivamente a la curvatura terrestre, deja de visualizarse un elemento de altura  $h$  aplicando la siguiente fórmula:

$$D = \sqrt{2hR + h^2}$$

D= Distancia del horizonte de acuerdo al Sistema de Coordenadas utilizado

R = Radio de la tierra

h = Altura de la observación

Una vez llevado a cabo lo anterior, se generó la cuenca visual de los puntos de observación para representar el paisaje en la EMC, para lo cual se utilizó el complemento *viewshed analysis*. La cuenca visual, permite generar una capa de zonas visibles o no visibles para un observador, en el que interviene el horizonte visual sobre un modelo digital de elevación, y así, encontrar las zonas con mayor visibilidad dentro de un sitio determinado reflejado en una capa raster (Dixon y Uddameri, 2016).

Posteriormente, con álgebra de mapas la capa de criterios limitantes se añadió a la cuenca visual, de tal modo que los criterios limitantes tuvieran el valor más alto del raster; de este modo se evitaba que *LCP* trazara la línea por sitios de importancia ambiental y con alto impacto visual.

Con la capa resultante (costo unitario) se utilizó *r.cost*, lo que permite conocer el costo mínimo acumulado para desplazarse de una celdilla a otra en un mapa raster; a partir de esta información se puede obtener el trazado de menor costo con *LCP* siguiendo las celdillas que representen menor dificultad (Menke *et al.*, 2015).

El algoritmo *LCP* trazó la ruta teniendo en cuenta el punto de inicio de la subestación eléctrica Champayán y como punto final la subestación eléctrica Güémez. Así *LCP* originó un trazado, el cual seguía los valores más bajos de la cuenca visual de los observadores, evitando los valores más altos de la capa (i.e., criterios limitantes, pendientes mayores a 14 % y zonas con alto impacto visual).

En la figura 3 se ejemplifica el uso de *LCP*, que determina el trazado de la línea de transmisión tomando en cuenta los valores más bajos en una capa raster representados por la cuenca visual de los observadores. Las celdas con valores más bajos representan las zonas



Domínguez-Walle M. A., Vargas-Tristán V., Pérez Morales A., Niño-Maldonado S., Treviño-Carreón J., Herrera Herrera J.R. (2016): "Evaluación multicriterio y Least-Cost path: alternativas en la toma de decisiones para proyectos de líneas de transmisión eléctrica", *GeoFocus (Artículos)*, n° 18, p. 191-209. ISSN: 1578-5157

menos visibles o con baja influencia de puntos de observación y los valores más altos aquellas zonas que están mayormente pobladas y por consecuencia mayormente avistadas y, zonas restringidas para la construcción de una línea de transmisión eléctrica (i.e., ANP's, AICA's y asentamientos humanos).



Figura 3. Representación gráfica del uso de LCP en la EMC para la generación de la alternativa 2.

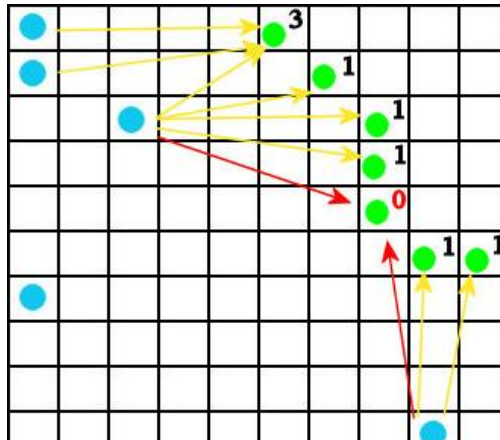
#### 2.4. Análisis de visibilidad y evaluación del impacto visual de los trazados

Para el análisis de la visibilidad se añadió a cada trayectoria 540 puntos que representan las torres de alta transmisión eléctrica a una distancia aproximada de 330 m según las especificaciones del proyecto.

A continuación, con el complemento *viewshed analysis* se obtuvo la exposición visual acumulada de las torres de cada ruta para conocer su intervisibilidad, tomando como el campo del observador los puntos de observación anteriormente realizados y como objetivo del observador a las torres del eje; como radio se utilizó el horizonte visual anteriormente calculado y por último se consideró la curvatura de la tierra en ese lugar.

La capa de exposición acumulada se ejemplifica en la figura 4. Su función es calcular la cantidad de objetivos (torres de transmisión eléctrica) avistados por un observador (localidades urbanas, localidades rurales y carreteras) de acuerdo a su altura, sobre un modelo digital de terreno y con base en su horizonte visual. El resultado final es la sumatoria de todos los efectos visuales según el número de observadores (color azul) que se añaden al algoritmo; por lo tanto, aquellos objetivos (color verde) que fueron vistos por más de un observador dentro de su radio visual (flecha amarilla), se representan el total en una capa raster y aquellos que están fuera del radio visual (flecha roja) son descartados dando un valor de cero.

Domínguez-Walle M. A., Vargas-Tristán V., Pérez Morales A., Niño-Maldonado S., Treviño-Carreón J., Herrera Herrera J.R. (2016): "Evaluación multicriterio y Least-Cost path: alternativas en la toma de decisiones para proyectos de líneas de transmisión eléctrica", *GeoFocus (Artículos)*, n° 18, p. 191-209. ISSN: 1578-5157



**Figura 4. Representación gráfica de la capa de efecto visual en las torres de transmisión eléctrica.**

Posteriormente, se utilizó el contraste de Kruskal-Wallis (Kruskal y Wallis, 1952) con el paquete estadístico IBM SPSS Statistics 19, con la finalidad de comprobar si existe diferencia significativa en los impactos visuales de los tres trazados. Con lo anterior, se hizo una comparación de medias con la prueba de diferencia significativa de Tukey (Tukey, 1949), para determinar específicamente que trazado pudiera provocar menor impacto visual.

Finalmente, las trayectorias generadas se representaron con el complemento *Qgis2threejs* para visualizarlos en 3D y tener una mejor comprensión de las exposiciones visuales de cada trazado.

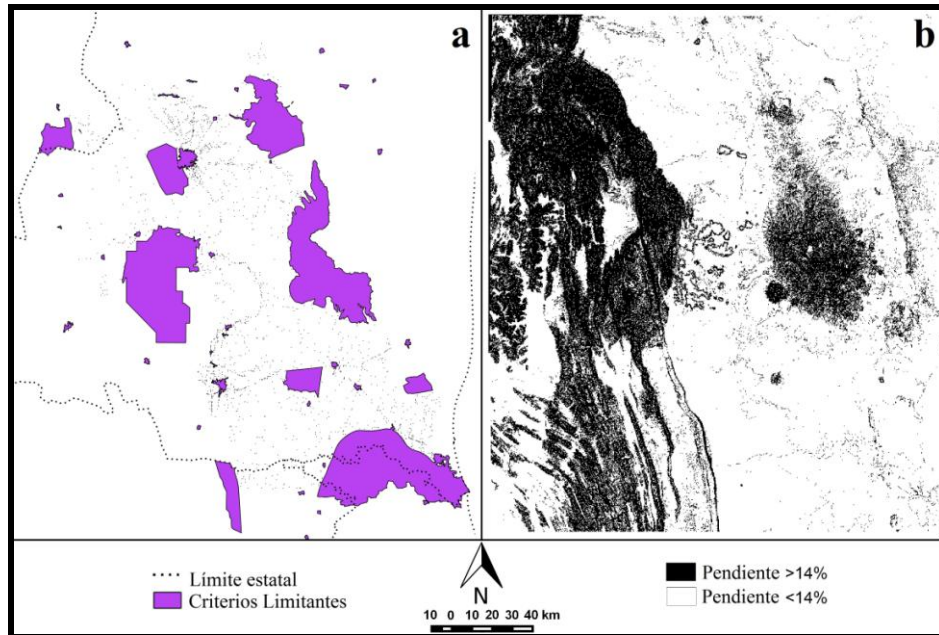
### 3. Resultados

#### 3.1. Evaluación Multicriterio (EMC) para el trazado de la alternativa 1

En la figura 5 se muestran los criterios limitantes, además de los asentamientos humanos ubicados en el área de estudio (figura 5a), como también la pendiente del terreno (figura 5b) que conforman las principales elevaciones de los sistemas montañosos de la Sierra Madre Oriental y la Sierra de Tamaulipas.



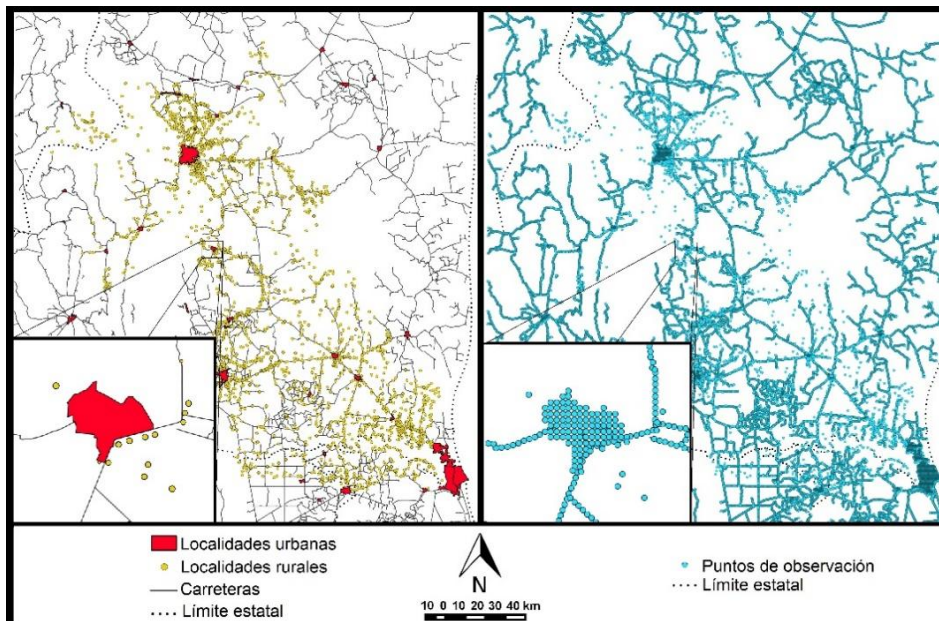
Domínguez-Walle M. A., Vargas-Tristán V., Pérez Morales A., Niño-Maldonado S., Treviño-Carreón J., Herrera Herrera J.R. (2016): "Evaluación multicriterio y Least-Cost path: alternativas en la toma de decisiones para proyectos de líneas de transmisión eléctrica", *GeoFocus (Artículos)*, n° 18, p. 191-209. ISSN: 1578-5157



**Figura 5. Criterios considerados en la EMC para la generación de las trayectorias alternativas.**

### 3.2. Evaluación Multicriterio (EMC) para el trazado de la alternativa 2

En la alternativa 2 para calcular la cuenca visual de la variable paisaje, se obtuvieron un total de 68.092 puntos de observación (figura 6). Las zonas donde hay mayor presencia de puntos se concentran cerca de las cabeceras municipales, lo que está ocasionado por la conexión de un gran número de carreteras que se conectan y de las localidades rurales cercanas.



**Figura 6. Puntos de observación generados en la zona de estudio para la obtención de la cuenca visual de los observadores.**

Domínguez-Walle M. A., Vargas-Tristán V., Pérez Morales A., Niño-Maldonado S., Treviño-Carreón J., Herrera Herrera J.R. (2016): "Evaluación multicriterio y Least-Cost path: alternativas en la toma de decisiones para proyectos de líneas de transmisión eléctrica", *GeoFocus (Artículos)*, n° 18, p. 191-209. ISSN: 1578-5157

Aplicando la fórmula para calcular el horizonte visual de una torre de alta transmisión eléctrica se obtuvo un valor de 25.217,56 m. Este valor se tomó como radio de horizonte para generar la cuenca visual de los observadores en la zona de estudio (figura 7). En color verde, se representan las zonas en las que un observador tendría baja visibilidad desde la localidad donde habita o transita, y se corresponden con sitios de altas pendientes. El caso contrario es el de zonas de pendientes menos pronunciadas o mayormente pobladas en donde se tiene mayor visibilidad (áreas en color amarillo, anaranjado y rojo).

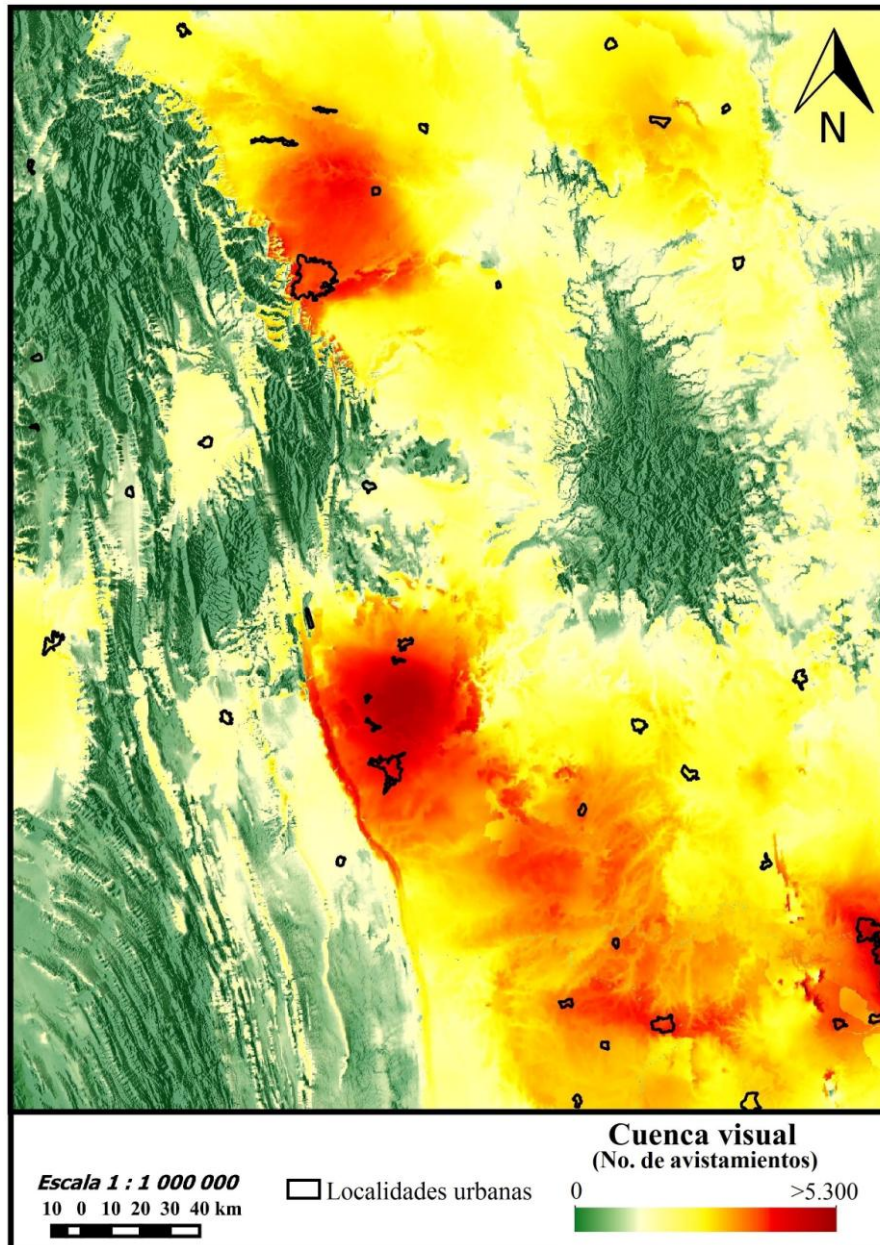
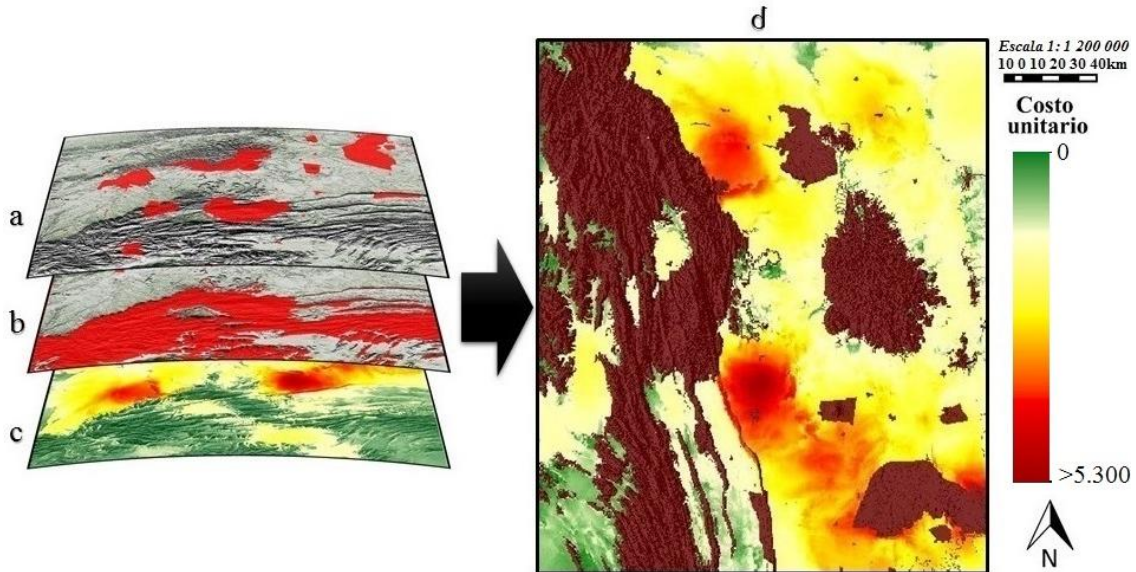


Figura 7. Cuenca visual de los puntos de observación para la integración de la variable paisaje en la alternativa 2.



En la figura 8 se muestra la superposición de las capas de los criterios limitantes (figura 8a), pendientes >14 % (figura 8b) y la cuenca visual de los observadores (figura 8c), realizado para generar la capa de costo unitario (figura 8d), la cual posteriormente se usó para obtener la capa de costo acumulado de la combinación de todos los criterios con el algoritmo *r.cost*. Los valores más altos son representados por los criterios limitantes, pendientes >14 % y las zonas con mayor visibilidad, los cuales se intentaron excluir al momento de realizar el trazado con el algoritmo *least-cost path (LCP)*.

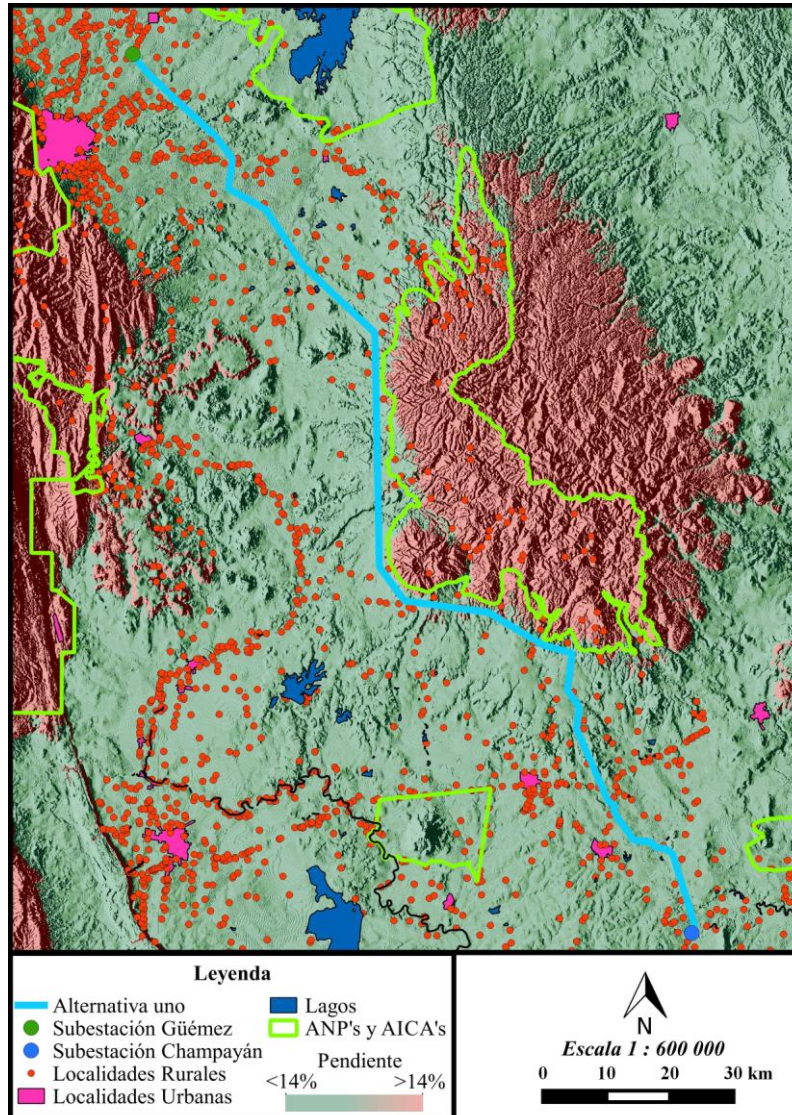


**Figura 8. Álgebra de mapas para la generación del costo acumulado de la EMC para la generación de la alternativa 2.**

### 3.3. Rutas alternativas

En la figura 9 se presenta el trazado de la alternativa 1, con base en la EMC diseñada, la cual se generó tomando como referencia la ruta original de la obra. Los vértices que conforman la Línea de Transmisión Eléctrica (L. T. E.) Champayán-Güémez fueron reubicados de tal manera, que la ruta resultante se posicionó en zonas con pendientes menores a 14 %, respetando manchas urbanas, localidades rurales, Áreas Naturales Protegidas (ANP's), Áreas de Importancia para la Coalición de Aves (AICA's) y cuerpos de agua.

Domínguez-Walle M. A., Vargas-Tristán V., Pérez Morales A., Niño-Maldonado S., Treviño-Carreón J., Herrera Herrera J.R. (2016): "Evaluación multicriterio y Least-Cost path: alternativas en la toma de decisiones para proyectos de líneas de transmisión eléctrica", *GeoFocus (Artículos)*, n° 18, p. 191-209. ISSN: 1578-5157



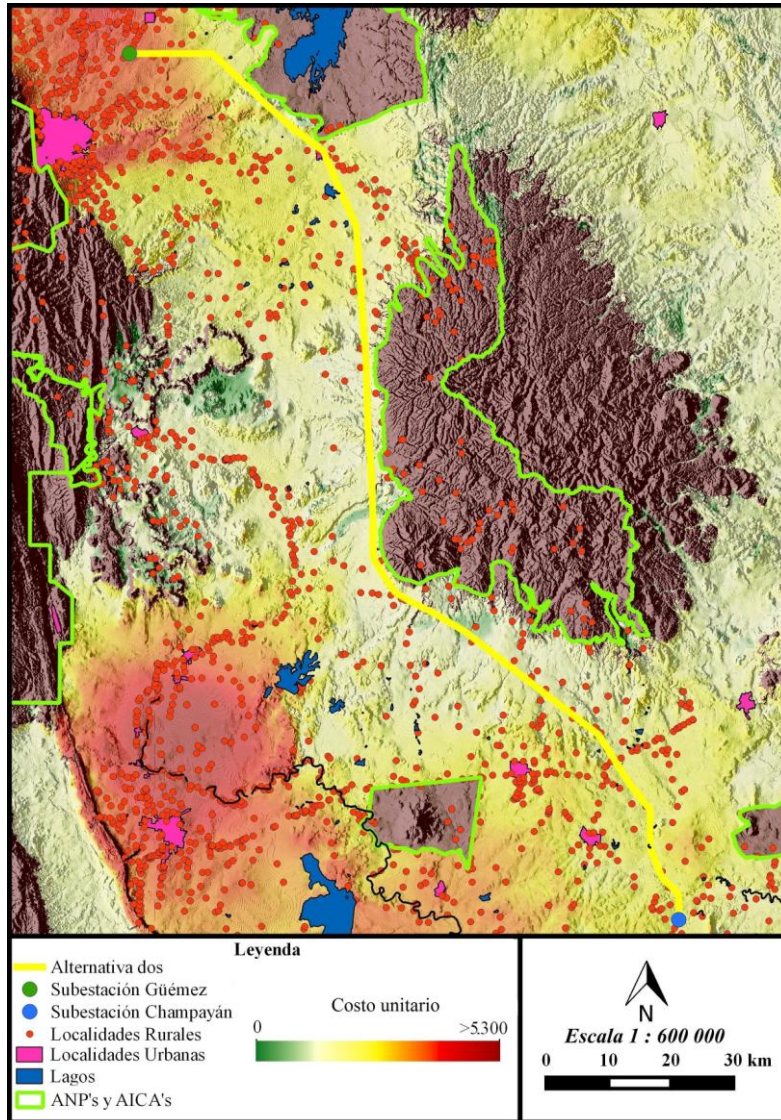
**Figura 9. Alternativa 1 generada con EMC.**

Como resultado de *LCP* se obtuvo la ruta de la alternativa 2 (figura 10), la cual se sitúa en las zonas de menor costo según las variables introducidas. Al trazado obtenido se le logró dar un aspecto más recto al simplificar la trayectoria, ya que contaba con mayor cantidad de vértices que no proporcionaban el aspecto lineal que caracteriza a una L. T. E.

El trazado resultante, de igual manera que la alternativa 1, evitó zonas que dificultaban la construcción de la obra (pendientes >14 %), áreas de importancia ambiental (ANP's y AICA's), asentamientos humanos y cuerpos de agua. En este caso se añadió la variable paisaje por lo que *LCP* conectó la subestación eléctrica Champayán con la subestación eléctrica Güémez, posicionando el trazado en lugares con menor visibilidad según la cuenca visual de los observadores del sitio.



Domínguez-Walle M. A., Vargas-Tristán V., Pérez Morales A., Niño-Maldonado S., Treviño-Carreón J., Herrera Herrera J.R. (2016): "Evaluación multicriterio y Least-Cost path: alternativas en la toma de decisiones para proyectos de líneas de transmisión eléctrica", *GeoFocus (Artículos)*, n° 18, p. 191-209. ISSN: 1578-5157

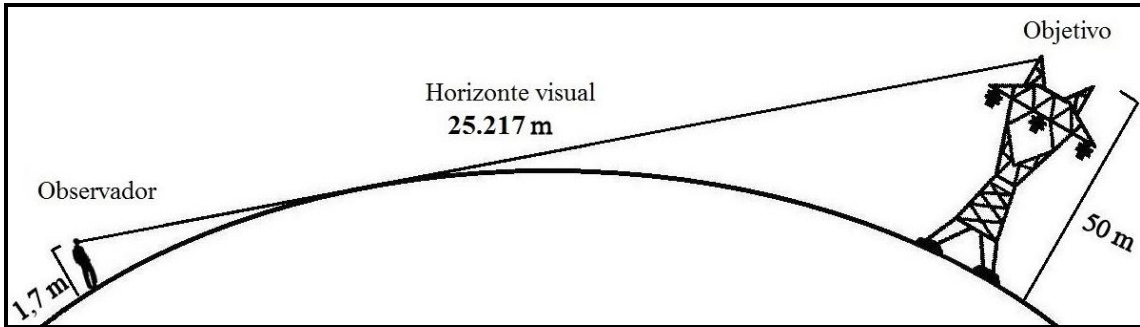


**Figura 10. Alternativa 2 generada con EMC considerando la variable paisaje para el trazado con LCP.**

#### 3.4. Evaluación del impacto visual de los tres trazados

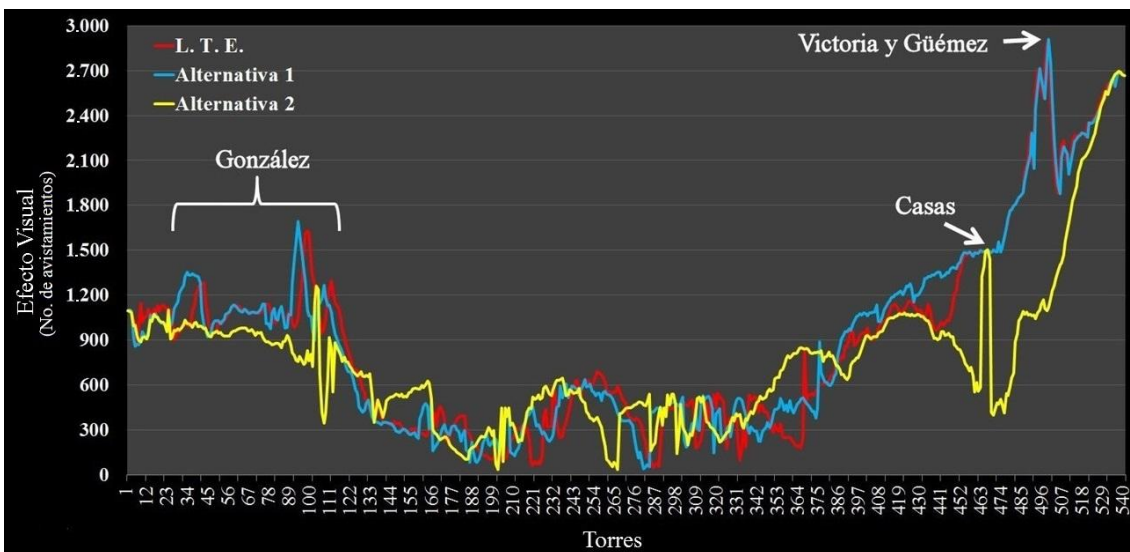
En la figura 11 se representa el panorama que se consideró al momento de utilizar el complemento *viewshed analysis*. Representa la distancia del horizonte de un individuo con una altura promedio de observación de 1,7 m y la incidencia de ver a una torre de transmisión eléctrica de una altura aproximada de 50 m, influenciada por la topografía y la curvatura de la tierra.

Domínguez-Walle M. A., Vargas-Tristán V., Pérez Morales A., Niño-Maldonado S., Treviño-Carreón J., Herrera Herrera J.R. (2016): "Evaluación multicriterio y Least-Cost path: alternativas en la toma de decisiones para proyectos de líneas de transmisión eléctrica", *GeoFocus (Artículos)*, n° 18, p. 191-209. ISSN: 1578-5157



**Figura 11. Representación gráfica del efecto visual de una torre según el horizonte visual de un observador en el área de estudio.**

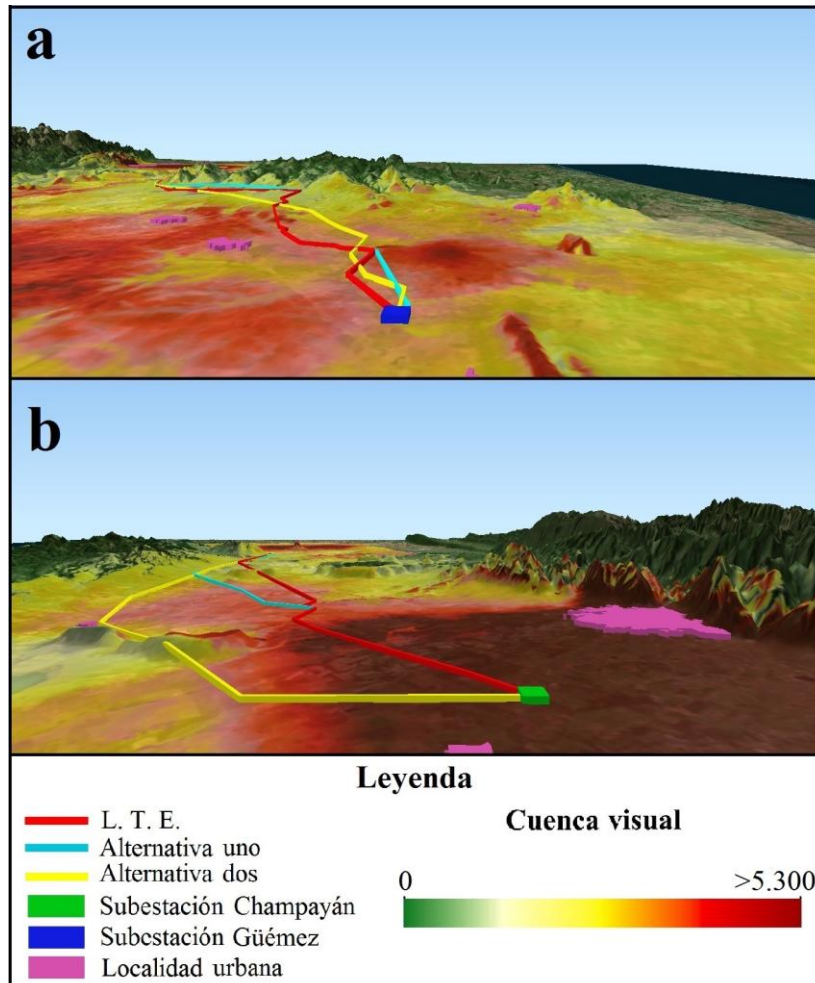
Los resultados obtenidos en la exposición visual de las torres se muestran en la figura 12; las medianas observadas en las exposiciones visuales fueron de 856, 860 y 728 avistamientos, para las trayectorias de la L. T. E. Champayán-Güémez, alternativa 1 y alternativa 2, respectivamente. Se puede observar un comportamiento similar entre la ruta original y la alternativa 1, cuando el efecto visual se dispara indica alta incidencia de avistamientos y por lo tanto poblaciones cercanas; lo mismo ocurre en la alternativa 2, solo que se refleja una diferencia considerable en la exposición visual, influenciado por el distanciamiento que ocurre en algunas zonas entre las trayectorias y la variable de paisaje introducida en *LCP* para su creación lo que hace que el impacto visual sea menor.



**Figura 12. Efecto visual de las torres de transmisión eléctrica de las tres trayectorias.**

En la figura 13 se pueden observar claramente las zonas con menor efecto visual cerca de las manchas urbanas, como es el caso del punto de inicio en la subestación eléctrica Champayán (figura 13a); la alternativa 2 evita las zonas cercanas a las poblaciones en comparación con la alternativa 1 y la L. T. E. Champayán-Güémez. En el punto de destino, en la subestación eléctrica Güémez (figura 13b), la alternativa 1 y la L. T. E. Champayán-Güémez se adentran aproximadamente 50 km en una zona con alta exposición visual, cerca de los municipios de Victoria y Güémez, en contraste con la alternativa 2, que rodeó la zona vulnerable y se adentró aproximadamente 20 km para finalmente conectar con la subestación.

Domínguez-Walle M. A., Vargas-Tristán V., Pérez Morales A., Niño-Maldonado S., Treviño-Carreón J., Herrera Herrera J.R. (2016): "Evaluación multicriterio y Least-Cost path: alternativas en la toma de decisiones para proyectos de líneas de transmisión eléctrica", *GeoFocus (Artículos)*, n° 18, p. 191-209. ISSN: 1578-5157



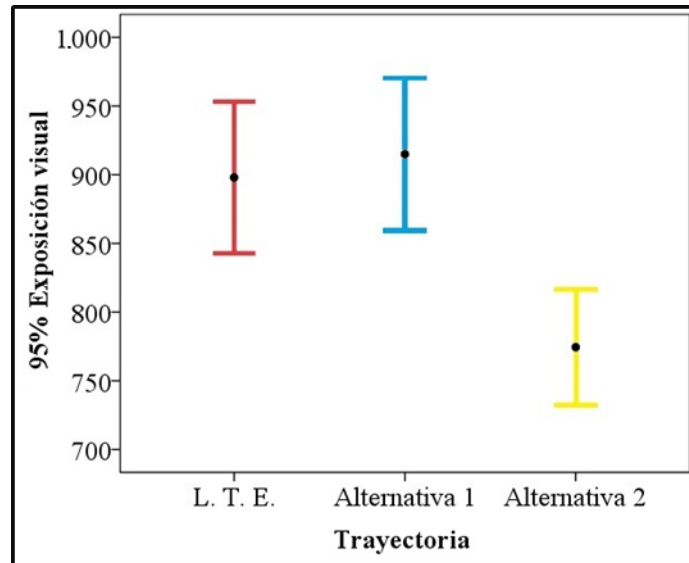
**Figura 13. Visualización en 3D de las trayectorias, manchas urbanas y la cuenca visual de los observadores.**

De acuerdo con los resultados del estadístico de contraste de Kruskal-Wallis, se comprobó que existe una diferencia significativa ( $P < 0.01$ ) lo que indica que al menos una trayectoria es diferente respecto a las demás en cuanto a su exposición visual.

Según los resultados de la comparación de medias de Tukey, se demuestra que la alternativa 2 es diferente a la L. T. E. Champayán-Güémez y a la alternativa 1 en cuanto a su exposición visual ( $P < 0.05$ ; figura 14).



Domínguez-Walle M. A., Vargas-Tristán V., Pérez Morales A., Niño-Maldonado S., Treviño-Carreón J., Herrera Herrera J.R. (2016): "Evaluación multicriterio y Least-Cost path: alternativas en la toma de decisiones para proyectos de líneas de transmisión eléctrica", *GeoFocus (Artículos)*, n° 18, p. 191-209. ISSN: 1578-5157



**Figura 14. Comparación del efecto visual de las trayectorias generadas en el presente estudio en contraste con la L. T. E. Champayán-Güémez.**

En el análisis descriptivo (tabla 2), se aprecia que las longitudes que tuvieron las tres trayectorias varía, lo que no representa un problema con el número de torres, ya que en el posicionamiento de los puntos se tomó como referencia una distancia aproximada de 330 m y en algunas zonas aumentaba para lograr conexiones con los vértices. La alternativa 2 en su mediana, mínimo y máximo destaca entre las tres trayectorias demostrando que, en cuanto a efecto visual, es el trazado óptimo para la generación de una ruta con menor impacto visual. La desviación estándar de la L. T. E. Champayán-Güémez y de la alternativa 1 son parecidas, ya que al no considerar la variable paisaje, los valores de efecto visual se encuentran mayormente dispersados, mientras que en la alternativa 2 es menor, debido a que se procuró el posicionamiento de las torres sobre lugares con baja visibilidad y por lo tanto su efecto visual es más homogéneo. En el caso de la alternativa 2, no se logró una desviación estándar menor ya que no se podían evitar zonas con efecto visual alto para conectar con las subestaciones eléctricas.

**Tabla 2. Estadísticos descriptivos de las trayectorias generadas en el presente estudio en contraste con la L. T. E. Champayán-Güémez.**

Trayectoria	Longitud (km)	Efecto visual (No. de avistamientos)			
		Mediana	Mínimo	Máximo	Desvest
L. T. E. Champayán-Güémez	182,69	855,5	48	2891	651,83
Alternativa 1	185,01	860	41	2907	654,52
Alternativa 2	182,62	728,5	33	2694	492,24

#### 4. Discusión y conclusiones

Con base en los resultados expuestos se concluye que los SIG son una herramienta esencial, que apoya la toma de decisiones en conjunto con la EMC (De Cos y Latorre, 2007; Da Silva y Cardoso, 2015). Como se ha venido demostrando en diversos usos (Atkinson *et al.*, 2005; Bagli *et al.* 2011), las variables consideradas en la EMC para su aplicación con LCP,



*Domínguez-Walle M. A., Vargas-Tristán V., Pérez Morales A., Niño-Maldonado S., Treviño-Carreón J., Herrera Herrera J.R. (2016): "Evaluación multicriterio y Least-Cost path: alternativas en la toma de decisiones para proyectos de líneas de transmisión eléctrica", GeoFocus (Artículos), n° 18, p. 191-209. ISSN: 1578-5157*

---

deben incluir los criterios más importantes que puedan interferir o perjudicar el desarrollo del proyecto, por lo que resulta ser un método apto para cualquier tipo de estudio lineal.

Las torres de transmisión eléctrica causan un gran impacto visual si no se sitúan en zonas estratégicas (Salinas y Rubio, 2008); es por eso que la integración de la variable visual en la EMC en conjunto con *LCP*, resulta de gran ayuda en la toma de decisiones para futuras trayectorias destinadas a líneas de transmisión eléctrica, en las que se pueda conservar el valor del paisaje (Lee y Stucky, 1998).

El uso de capas raster con alta resolución puede mejorar la precisión del trazado. De igual manera, un modelo digital de superficie pudiera ser el que mejor se adecúe para la cuenca visual de los observadores (Dirección General del Servicio Público de la Información, 2011), lo que permitiría tener resultados más cercanos a la realidad al contemplar las edificaciones con sus respectivas alturas. En este caso si se cuenta con la información necesaria podría adaptarse el MDE, asignando valores de altura de asentamientos humanos y vegetación sobre el raster utilizado.

Según los resultados de las exposiciones visuales de las tres trayectorias del presente estudio, se observa mayor impacto visual en zonas cercanas a localidades urbanas, provocado por la mayor cantidad de observadores que pudieran encontrarse en el área. Dado lo anterior, se explica por qué la L. T. E. Champayán-Güémez en comparación con la alternativa 1, no mostró diferencia estadística significativa en la prueba de Tukey, ya que al situarse dentro de zonas con mayor visibilidad su exposición aumenta. Las rutas mencionadas en contraste con la alternativa 2, muestran diferencia en cuanto al efecto visual de sus torres ya que para este trazado se tomó en cuenta la variable paisaje, respetando zonas con mayor influencia de puntos de observación y por consecuencia con menor efecto visual.

La realización de esta metodología implica diversas limitaciones, por lo que se tiene que tener en cuenta para implementaciones futuras en líneas de transmisión eléctrica lo siguiente:

- La intervención manual en algunos pasos puede ser necesaria, aunque induce al error humano por la imprecisión que puede generar.
- En este caso se trabajó con un modelo digital de terreno con una precisión de 60 m y, se recomienda trabajar con mejor resolución en proyectos de importancia ambiental, como son los modelos digitales derivados de datos LIDAR con resolución de hasta 5 m, teniendo en cuenta que esto implicaría mayor tiempo para la realización de las capas
- La falta de información pudiese afectar la generación de una ruta que genere menor impacto visual. En el presente proyecto la ausencia de modelos digitales de superficie influyó en aquellos lugares poblados en los que una construcción o formaciones vegetales de cierta altura provoquen visibilidad nula ante las torres de transmisión.

Finalmente, con base en los resultados obtenidos, se recomienda el uso de EMC y *LCP* para la toma de decisiones de futuros proyectos de líneas de transmisión eléctrica. El número de variables elegidas para el desarrollo del proyecto es fundamental para la calidad del mismo, destacándose los factores ambientales y zonas aptas para la construcción que faciliten o perjudiquen su ejecución.

Domínguez-Walle M. A., Vargas-Tristán V., Pérez Morales A., Niño-Maldonado S., Treviño-Carreón J., Herrera Herrera J.R. (2016): "Evaluación multicriterio y Least-Cost path: alternativas en la toma de decisiones para proyectos de líneas de transmisión eléctrica", *GeoFocus (Artículos)*, n° 18, p. 191-209. ISSN: 1578-5157

## 5. Agradecimientos

A la Universidad Autónoma de Tamaulipas y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por lograr el intercambio académico con el Departamento de Geografía de la Universidad de Murcia, quien abre sus puertas a la investigación y al fortalecimiento de convenios internacionales.

A la Comisión Federal de Electricidad por la información brindada en la presente investigación.

## 6. Referencias bibliográficas

Adriaensen, F., Chardon, J. P., Swinnen, E., Villalba, S., Gulinck, H. y Matthysen, E. (2003): "The application of 'least-cost' modelling as a functional landscape model", *Landscape and Urban Planning*, 64, 4, pp. 233-247.

Aguiló Alonso, M., Aramburu Maqua, M. P., Blanco Andray, A., Calatayud Prieto-Lavin, T., Carrasco González, R. M., Castilla Castelano, G., Castillo Sánchez, V., Ceñal González-Fierro, M. A., Cifuentes Vega, P., Díaz Martín, M., Díaz Segovia, A., Escribano Bombin, R., Escribano Bombin, M. M., Frutos Gómez, M., Galiana Galan, F., García Abril, A., Glaria Galceran, G., González Alonso, S., González García, C., Iglesias del Pozo, E., Martín Ridaura, A., Martínez Falero, E., Milara Vilches, R., Monzón de Caceres, A., Ortega Hernández-Agero, C., Otero Pastor, I., Pedraza Gilsanz, J., Pinedo González, A., Puig Bager, J., Ramos Fernández, A., Rodríguez Lombardero, I., Sanz Santos, M. A., Tevar Sanz, G., Torrecilla López, I., Yoldi Enríquez, L. y Rhea Consultores. (2000): "Paisaje", *Guía para la elaboración de estudios del medio físico*. España, Centro de Publicaciones Secretaría General Técnica Ministerio de Medio Ambiente, pp. 481-544.

Atkinson, D. M., Deadman, P., Dudycha, D. y Traynor, S. (2005): "Multi-criteria evaluation and least cost path analysis for an arctic all-weather road", *Applied Geography*, 25, 4, pp. 287-307.

Bagli, S., Geneletti, D. y Orsi, F. (2011): "Routeing of power lines through least-cost path analysis and multicriteria evaluation to minimise environmental impacts", *Environmental Impact Assessment Review*, 31, 3, pp. 234-239.

Busquets Fàbregas, J. y Cortina Ramos, A. (2009): "La gestión del paisaje como proceso", *Gestión del paisaje. Manual de protección, gestión y ordenación del paisaje*. Barcelona, España, Editorial Ariel, pp. 3-36.

CFE J1000-50. 2014. Diseño de líneas de transmisión aéreas. (Consulta: 05-07-2016). Disponible en <http://lapem.cfe.gob.mx/normas/construccion/pdfs/1/DCDLTA01.pdf>

Da Silva, C. J. y Cardozo, O. D. (2015): "Evaluación multicriterio y Sistemas de Información Geográfica aplicados a la definición de espacios potenciales para uso del suelo residencial en Resistencia (Argentina)", *GeoFocus (Artículos)*, 16, pp. 23-40.

De Cos Guerra, O. y Latorre, E. M. (2007): "Evaluación multicriterio y delimitación de espacios funcionales: aplicación SIG para la definición de mapas comarcales", *GeoFocus (Artículos)*, 7, pp. 256-280.

Dirección General del Servicio Público de Información. (2011): *Plan de mercadotecnia. Modelos digitales de elevación con tecnología LIDAR*. México. (Consulta: 03-06-2016). Disponible en

Domínguez-Walle M. A., Vargas-Tristán V., Pérez Morales A., Niño-Maldonado S., Treviño-Carreón J., Herrera Herrera J.R. (2016): "Evaluación multicriterio y Least-Cost path: alternativas en la toma de decisiones para proyectos de líneas de transmisión eléctrica", *GeoFocus (Artículos)*, n° 18, p. 191-209. ISSN: 1578-5157

[http://www.dgapi.snieg.mx/Servicios/Difusion/voz\\_usuario/mercadotecnia/docs/2011/LIDAR/Plan%20de%20mercadotecnia%20Modelos%20digitales%20de%20elevaci%C3%B3n.pdf](http://www.dgapi.snieg.mx/Servicios/Difusion/voz_usuario/mercadotecnia/docs/2011/LIDAR/Plan%20de%20mercadotecnia%20Modelos%20digitales%20de%20elevaci%C3%B3n.pdf)

Dixon, B. y Uddameri, V. (2016): "Topics in Raster analysis", *GIS and Geocomputation for Water Resource Science and Engineering*. John Wiley & Sons, Ltd., Chichester, UK, pp. 149-181.

Fernández-Vitora, V. C. (2000): *Guía metodológica para la evaluación del impacto ambiental*. Madrid, España, Mundi-Prensa.

Gómez Delgado, M. y Barredo Cano, J. I. (2006): *Sistemas de información geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio*. México, Alfaomega.

INEGI. (1983). *Síntesis geográfica del estado de Tamaulipas*. México. (Consulta: 09-06-2016). Disponible en <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/biblioteca/ficha.aspx?upc=702825220822>

Kruskal, W. H. y Wallis W. A. (1952): Use of ranks in one-criterion variance analysis. *Journal of the American Statistical Association*, 47, 260, pp. 583–621.

LaRue, M. A. y Nielsen, C. K. (2008): "Modelling potential dispersal corridors for cougars in midwestern North America using *least-cost path* methods", *Ecological Modelling*, 212, 3, pp. 372-381.

Lee, J. y Stucky D. (1998): "On applying *viewshed analysis* for determining *least-cost paths* on Digital Elevation Models", *International Journal of Geographical Information Science*, 12, 8, pp. 891-905.

Menke, K., Smith, R., Pirelli, L. y Van Hoesen, J. (2015): *Mastering QGIS*. Birmingham, Reino Unido, Packt Publishing Ltd.

Muñoz-Pedrerros, A. (2004): "La evaluación del paisaje: una herramienta de gestión ambiental", *Revista Chilena de Historia Natural*, 77, 1, pp. 139-156.

NRF-014-CFE-2001: *Derechos de vía*. México. (Consulta: 09-06-2016). Disponible en <http://gama.fime.uanl.mx/~omez/pro/LEYES/NRF-014%20derechos%20de%20via.pdf>

Salinas Torres, M. y Rubio Romero, P. (2008): "Impacto ambiental de las torres de alta tensión en el paisaje urbano de Santiago de Chile", *Cuadernos Geográficos*, 43, pp. 311-325.

Santos Preciado, J. M. (1997): "El planteamiento teórico multiobjetivo/multicriterio y su aplicación a la resolución de problemas medioambientales y territoriales, mediante los S.I.G. Raster", *Espacio, Tiempo y Forma, Serie VI, Geografía*, 10, pp. 129-151.

Tukey, J. (1949): Comparing Individual means in the analysis of variance. *Biometrics*, 5, 2, pp. 99–114.

Valpreda, C. (2007): *Sistema de Información Geográfica (SIG)-teledetección y evaluación multicriterio (EMC) en un estudio de evaluación de impacto ambiental (EIA)*, Memorias XI Conferencia Iberoamericana de Sistemas de Información Geográfica, pp. 29-31.