

TÉCNICAS SIG PARA RECUPERACIÓN DE SUELOS CANGAHUOSOS, CON FINES DE AGRICULTURA COMUNITARIA EN EL ILALÓ

IVÁN PALACIOS OREJUELA^{1-*}, DENNIS USHIÑA¹, DAVID CARRERA VILLACRÉS¹⁻²

Recibido: 10/7/2020

Recibido con revisiones: 23/9/2020

Aceptado: 23/9/2020

RESUMEN

La accidentada topografía propia de la región andina ecuatoriana, sumado a las inadecuadas prácticas agrícolas y deforestación han provocado la erosión del suelo en las faldas del volcán Ilaló. El problema se agrava debido a la presencia de cangahua, que potencializa aún más la pérdida del suelo. El objetivo del presente trabajo fue aplicar y comparar diferentes técnicas SIG de modelación espacial para la selección de zonas idóneas destinadas a la recuperación de suelos erosionados por cangahua, con la finalidad de optimizar recursos económicos e impulsar el desarrollo de la agricultura comunitaria, con un caso de estudio en las faldas del volcán Ilaló. Las variables ríos, vías, pendiente, zona poblada, bosque y cobertura de cangahua fueron usadas en tres diferentes técnicas: intersección booleana (BIM), promedio ponderado ordenado (OWA) y combinación lineal ponderada (WLC), sumado a procesos de jerarquía analítica, Fuzzy, y V de Cramer que sirvieron para potenciar los resultados. Mediante matrices de confusión se determinaron las exactitudes globales obtenidas de cada una de las técnicas aplicadas, donde WLC fue el método que mejores resultados alcanzó, seguida del OWA y BIM. Se identificaron cuatro zonas óptimas por comunidad, las cuales fueron socializadas a sus habitantes. Finalmente, se construyeron 16 calicatas para comprobar un espesor de cangahua de al menos 60 cm que garantice la roturación del suelo con maquinaria pesada y el adecuado desarrollo de los cultivos. La utilización de técnicas SIG permitió optimizar recursos, mejorar la planificación y toma de decisiones, lo cual fomentó el interés de los habitantes en este proyecto que permitirá la reutilización de suelos degradados con cangahuas, transformarlos en suelos fértiles aptos para cultivos propios de la región, evita el abandono de estas tierras, y mejorará la calidad del ambiente e impulso de la reactivación productiva de la población.

Palabras clave: Erosión, Fuzzy, modelación espacial, Ecuador.

GIS TECHNIQUES TO CANGAHUOSOS SOIL RECOVERY, FOR COMMUNITY AGRICULTURE PURPOSES IN THE ILALÓ

ABSTRACT

The rugged topography of the Ecuadorian Andean region, in addition, to inadequate agricultural practices and deforestation have caused soil erosion on the foothills of the Ilaló volcano. The problem is more complicated by the presence of cangahua, which increases soil degradation. The objective of the present work was to apply and compare different GIS techniques of spatial modeling for the selection of suitable areas for recovering soils eroded by cangahuas, in order to optimize economic resources and promote community agriculture development, with a case for study in the Ilaló volcano. The variables as rivers, roads, slope, populated area, forest and cangahua coverage, were used in three different techniques: Boolean intersection (BIM), ordered weighted average (OWA) and weighted linear combination (WLC), added to analytical hierarchy processes, Fuzzy, and Cramer's V that served to improve the results. The global accuracies obtained from each of the applied techniques were determined using confusion matrices, where WLC was the method that achieved the best results, followed by OWA and BIM. Four optimal zones per community were identified, which were socialized to their inhabitants. Finally, 16 samples were built to check a thickness of cangahua of at least 60 cm that guarantees the breaking of the soil with heavy machinery and the proper development of crops. The use of GIS techniques allowed to improve resources, improving planning and decision-making, which fostered the interest of the inhabitants in this project that will allow the reuse of degraded soils with cangahuas, transforming them into fertile soils suitable for the region's own crops, it avoids the abandonment of the lands, and it will improve the quality of the environment and drives the productive reactivation of the population.

Key words: Erosion, Fuzzy, spatial modeling, Ecuador.

1 Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Ecuador

2 Universidad Central del Ecuador. Facultad de Ingeniería en Geología, Minas, Petróleos y Ambiental FIGEMPA. Carrera de Ingeniería Ambiental.

* Autor de contacto: ifpalacios@espe.edu.ec

INTRODUCCIÓN

Ecuador, es un país situado sobre la línea ecuatorial y atravesado por la cordillera de Los Andes. Posee dentro de una extensión relativamente pequeña de territorio tres regiones naturales, como son Costa, Sierra y Oriente (Hall *et al.*, 2008). La región central o Sierra, abarca el área perteneciente al macizo montañoso de la cordillera, con elevaciones que alcanzan hasta los 6268 msnm y cuyas cumbres en su mayoría corresponden a volcanes, que a través del tiempo han moldeado la orografía de la región (**Figura 1**). Gracias a este pasado geológico, se han originado diversas formaciones edafológicas (Coltorti & Ollier, 2000). En la cuenca interandina de la Sierra ecuatoriana, algunas problemáticas como altas tasas de deforestación, el aumento desordenado de la población, cambios de uso del suelo, sumado a la topografía escarpada de la región, ha ocasionado el avance de los procesos erosivos que provocan la degradación de los recursos naturales, especialmente del suelo, el cual es un recurso vital y en gran parte no renovable (Breure *et al.*, 2018; Hansjürgens *et al.*, 2018). Además, prácticas agrícolas inadecuadas, tipo de clima y el crecimiento de la frontera agrícola, repercuten en problemas para el sostenimiento de las áreas

cultivables, que se expanden hacia zonas de alta montaña donde bosques nativos y suelos de páramo se ven amenazados (Zebrowski & Vicuña, 1996).

Una de las formaciones edafológicas más comunes y con mayor aporte a los procesos erosivos de esta región, es la cangahua, término quichua que significa “tierra dura estéril” (Trujillo & Zebrowski, 1998). De acuerdo a los trabajos de Prat (2014) y Trujillo *et al.* (2014), la cangahua es considerada como una toba volcánica endurecida formada por flujos freatomagmáticos o caídas aéreas que ocurrieron por procesos edáficos en la última fase de actividad volcánica. Esta definición coincide con las descripciones de los grandes naturistas del Ecuador, Sauer (1965) y Wolf (1975). La cangahua, de forma más detallada, se menciona que es una formación geológica de cenizas ryodacíticas (Podwojewski & Germain, 2005a), que resulta de la diagénesis parcial del material volcánico explosivo fino endurecido (Hall & Mothes, 1996) procedente de flujos piroclásticos del Cuaternario, la cual es originada por caídas piroclásticas, con tamaño de ceniza menor a 2 mm (Vera & López, 1992). En el caso concreto de Ecuador, dichas formaciones se encuentran en la parte septentrional del callejón interandino desde Alausí hasta Tulcán (Zebrowski, 1997), entre los 2200 y 3000 msnm (Winkell & Zebrowski, 1992). Este tipo de suelos volcánicos endurecidos (cangahuosos) también están presentes en México, Nicaragua, Perú, Colombia, Chile, y Japón.

De forma general, la cangahua presente en Ecuador, es un material poco homogéneo con una gran cantidad de arena, limo y una parte pequeña de arcilla (Custode *et al.*, 1992). Puede encontrarse de forma superficial (aflorante) o cubierta por otro horizonte de suelo (subaflorante). Su consistencia dura es independiente de la profundidad a la que se encuentre, y puede deberse a la presencia de carbonatos y silicio en su estructura (Podwojewski *et al.*, 2008). Químicamente, estos suelos endurecidos poseen un pH neutro, calcio y potasio de intercambio, además un bajo contenido de nitrógeno y materia orgánica (Hidrobo *et al.*, 2015). En cuanto al escurrimiento es abundante, mientras que la penetración del

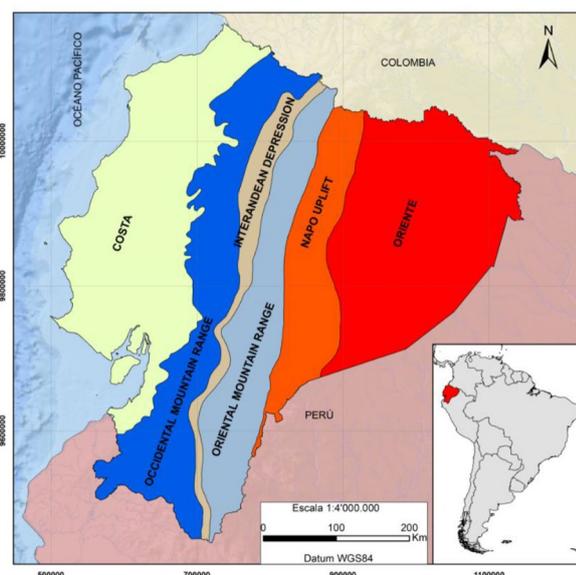


Figura 1. Regiones fisiográficas de los Andes ecuatorianos. Adaptado de (Coltorti & Ollier, 2000).

Figure 1. Physiographic regions of the Ecuadorian Andes. Adapted from (Coltorti & Ollier, 2000).

agua es mínima, lo que indica que la energía del escurrimiento es muy alta sobre estos sustratos. Una simulación realizada sobre suelos con inclinación del 10-12%, mostraron un coeficiente de escurrimiento de 80% con lluvias de 20 mm h⁻¹ (Custode *et al.*, 1992), lo que se traduce en cantidades exorbitantes de suelo cultivable perdido.

En Ecuador, estudios anteriores sugieren una superficie aproximada de 240000 ha en todo el país, de las cuales 36000 ha, se encuentran a nivel superficial debido a la erosión, y 44000 ha, estarían cubiertas por casi 20 cm de suelo apto para cultivar (Zebrowski & Vicuña, 1996). Mitigar las afectaciones relacionadas a los procesos erosivos, mediante la recuperación de estos sustratos, evita el abandono de áreas hasta hace poco productivas, fija la población campesina, reactiva la producción agrícola y mejora la calidad de vida de los agricultores (De Noni *et al.*, 1992). Varias investigaciones como las realizados por Podwojewski & Germain (2005b), y Brown *et al.* (2017), ya han abordado esta temática, enfocados principalmente en la producción agrícola, al transformar la cangahua en suelos fértiles con cultivos de valor añadido mediante de roturación (labranza) del suelo, ya sea por trabajo manual o con maquinaria, lo que permite oxigenar la tierra y mejorar la capacidad del suelo de conseguir nutrientes, a través de la acción humana o natural con sus posteriores labores de conservación para mantener el sustrato recuperado.

A pesar de los trabajos desarrollados localmente, se ha pasado por alto el problema de erosión que sufren los suelos del volcán Ilaló, una locación con un gran pasado histórico (Sánchez *et al.*, 2013) y particularidades geológicas únicas (Alvarado *et al.*, 2014). En esta zona se asientan varias comunidades, que se han visto afectadas debido a la pérdida de suelo cultivable, por lo que la reactivación de estos suelos es de gran importancia agroecológica, sin embargo, detener la erosión que se ha agravado especialmente en las estribaciones del volcán, conlleva desafíos ambientales, sociales y económicos, los cuales deben ser superados en la búsqueda de dinamizar la deprimida agricultura característica del lugar y el mejoramiento paisajístico.

Una forma de aprovechar recursos y analizar espacialmente la realidad del territorio, es mediante los sistemas de información geográfica (SIG) y sus técnicas de modelación multivariable. Los SIG han sido utilizados ampliamente para el entendimiento de los factores que coadyuvan a la erosión, así como para simular su impacto sobre el suelo (Gaubí *et al.*, 2017), así como en el ámbito socioeconómico, la incorporación de los análisis ecológicos y de fragmentación del paisaje (Zhang *et al.*, 2008).

En este contexto, la selección de técnicas SIG que representen con mayor precisión la realidad del territorio son necesarias para garantizar la toma de decisiones y los recursos invertidos, y que en conjunto con prácticas tradicionales de recuperación de suelos, se pueda alcanzar una mejor planificación y manejo sostenible de las tierras (Han *et al.*, 2019; Jazouli *et al.*, 2019). Es por ello, que el objetivo de este trabajo fue aplicar y comparar distintas técnicas de modelación multivariable mediante SIG, para la selección de zonas (huertos) idóneas destinadas a la recuperación de suelos erosionados por cangahua, con la finalidad de optimizar recursos económicos e impulsar el desarrollo de la agricultura comunitaria, en las faldas del volcán Ilaló.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El Ilaló es un volcán inactivo que tuvo su última erupción hace 1,6 millones de años aproximadamente, y que se levanta en el centro de la Depresión Interandina, donde sus flancos erosionados por glaciares moldearon un valle en forma de "U" hasta los 2500 m (Coltorti & Ollier, 2000). Según Clapperton (1987), los límites inferiores de la línea de nieve en Ecuador estaban sobre los 3000 m, por lo que ocurrió una reducción de la superficie en esta zona de 500 m desde el Pleistoceno medio tardío. Este antiguo volcán está ubicado en la provincia de Pichincha, cantón Quito, en cuyas laderas se asientan las comunidades de La Toggla, San Francisco de Baños, Alangasí y San Juan Bautista de Angamarca, pertenecientes a las parroquias de Guangopolo, La Merced y Alangasí (**Figura 2**). El área de estudio comprende estas cuatro comunidades con

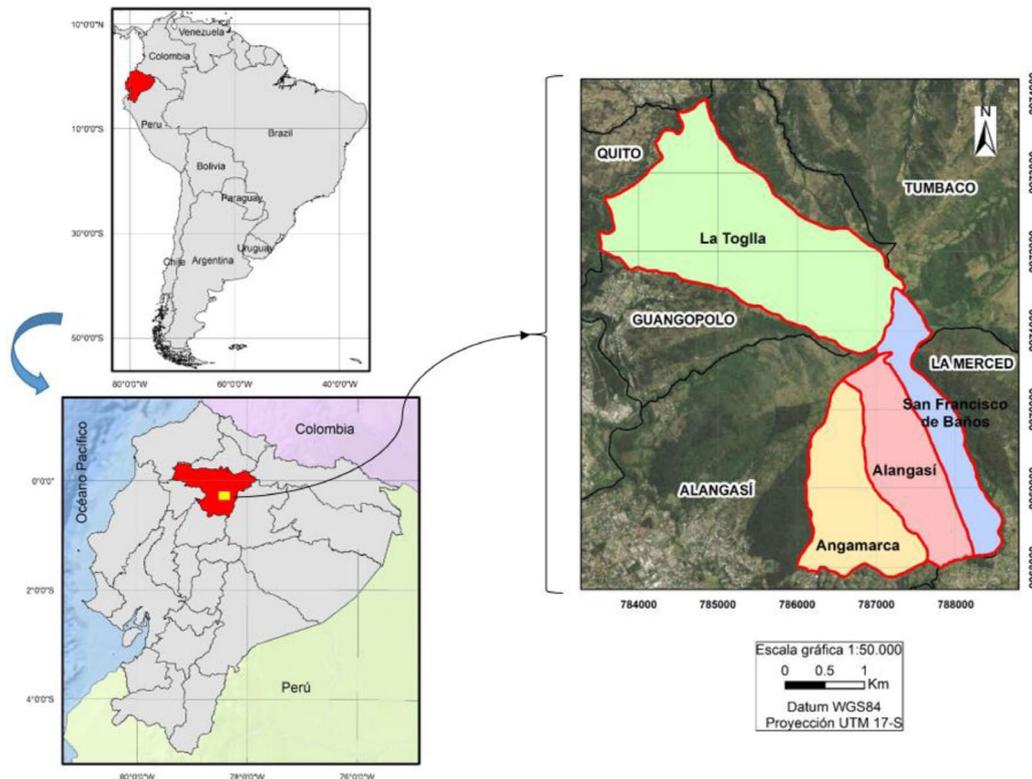


Figura 2. Mapa de ubicación de las cuatro comunidades de la zona de estudio

Figure 2. Location map of the four communities in the study area.

aproximadamente 11,026 Km² de superficie. El promedio anual de lluvia es 1300 mm, con dos estaciones lluviosas, la principal de enero a junio, y la segunda de octubre a diciembre. Posee una temperatura mensual promedio de 15,7°C, una humedad relativa de 75% y más de 2000 horas de insolación anual (Carrera *et al.*, 2019).

El problema de erosión en el Ilaló y la cangahua

El cerro Ilaló, siendo parte de un área protegida (Bosque y Vegetación Protectores del Flanco Oriental del Pichincha y Cinturón Verde de Quito), presenta actualmente un claro deterioro de sus remanentes verdes a causa de la tala indiscriminada de sus bosques (Figura 3), que potencia aún más el afloramiento de cangahua y por ende la erosión del suelo. Las fuertes pendientes (mayores a 45°), sumado a las precipitaciones y el cambio de uso de suelo, resultan en la aparición de cárcavas de grandes dimensiones, que reflejan la problemática existente en esta zona, como se muestra en la Figura 4.



Figura 3. Cangahua aflorante y cárcavas en las laderas del volcán Ilaló.

Figure 3. Cangahua outcropping and gullies on the slopes of the Ilaló volcano.

Análisis espacial multivariado

La zonificación de las áreas que podrían servir para la recuperación de cangahuas fue calculada a través de un análisis multivariado en el que fueron consideradas 6 variables: pendiente (s), ríos (r), vías (rd), zona poblada (a), bosque (f), presencia cangahua (ca). Esta información es obtenida de las fuentes oficiales del país, como son el Programa SIGTIERRAS (pendiente) (SIGTIE-

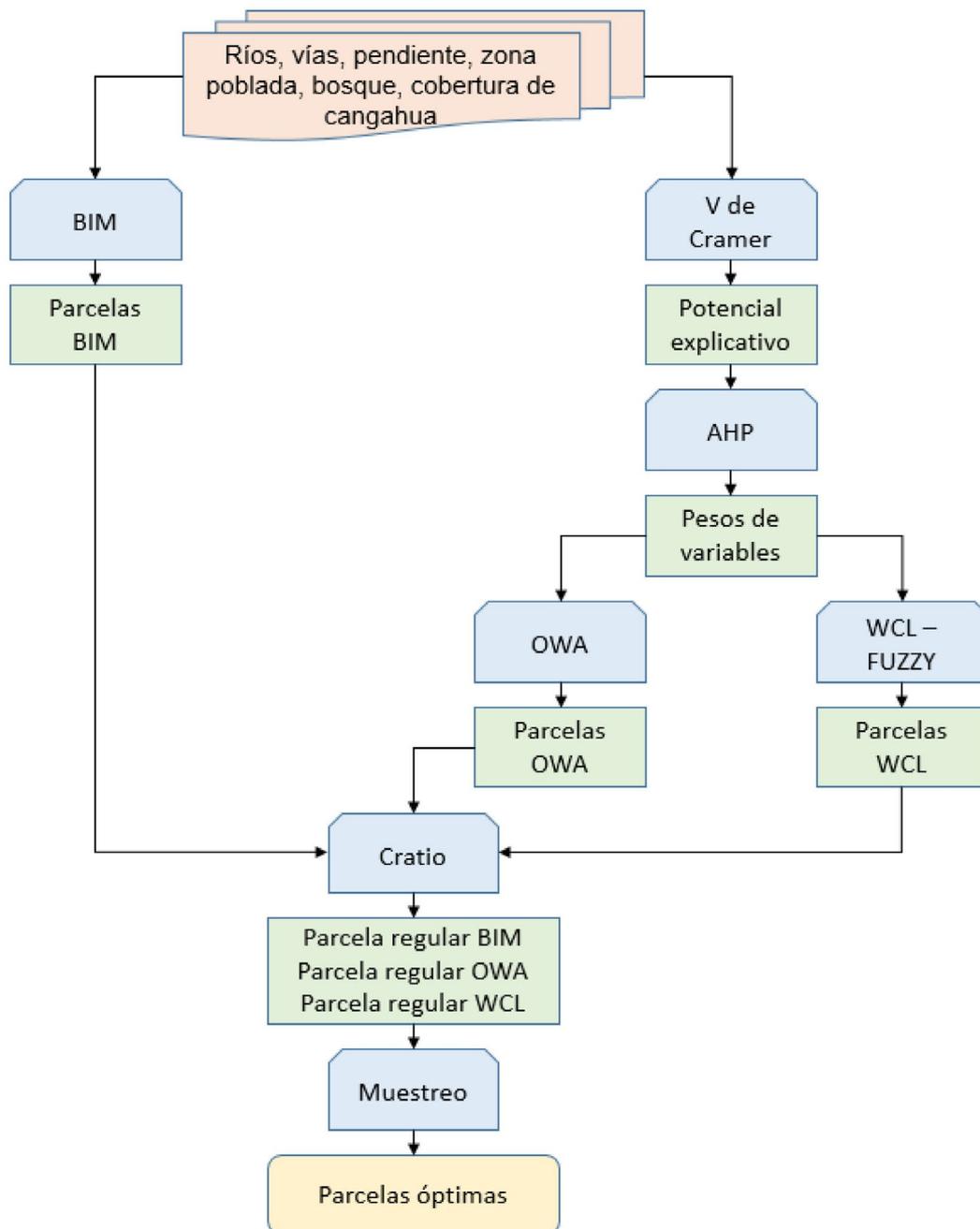


Figura 4. Flujo de trabajo con la metodología del estudio.

Figure 4. Workflow with the study methodology.

RRAS, 2012), Instituto Geográfico Militar – IGM (ríos, vías, zona poblada) (IGM, 2015), Ministerio de Ambiente y Agua – MAAE (bosque natural) (MAAE, 2020) y Ministerio de Ganadería – MAG (presencia de cangahua) (MAG, 2019), cuya información se encuentra a escala 1:5000 en el caso del SIGTIERRAS y 1:25000 el resto de capas. La resolución espacial es un parámetro muy significativo para los modelos espaciales (Cepe-

da *et al.*, 2018; Palacios, 2019; Palacios *et al.*, 2019); para esta investigación se optó por definir el tamaño de celda en función de la variable con mayor escala, siendo esta la pendiente obtenida con el modelo digital de elevaciones con una resolución de 3 metros.

La utilización de estas variables permitió determinar las zonas que cumplieran con las condiciones necesarias para la recuperación, como son

pendientes suaves, cercanía a vías de acceso, poseer formaciones de cangahua y no encontrarse en cobertura de bosques, zonas pobladas y atravesadas por ríos y sus márgenes de protección. Todas las capas en formato ráster se ingresaron al software Idrisi Selva para la ejecución del análisis espacial mediante tres variantes de modelos de decisión. La **Figura 4** muestra el flujo de trabajo aplicado al presente estudio.

Método de intersección booleana (BIM): BIM (del inglés boolean intersection method), o también conocido como operación mínima AND, es una técnica multicriterio que considera todos sus juicios como restricciones, es decir, comprende valores discretos de 0 y 1 (Fan *et al.*, 2018). El valor mínimo representa una ubicación que no cumple con las condiciones del fenómeno analizado, y el valor máximo indica una correspondencia máxima con los criterios analizados. Este método se caracteriza por la falta de compromiso entre los criterios, ya que la idoneidad en una restricción no compensa la incapacidad en otra zona restringida (Singh *et al.*, 2017). Sin embargo, este procedimiento conlleva al menor riesgo posible en un estudio, debido a que las zonas resultantes se consideran adecuadas en todos los criterios posteriores (Shahabi *et al.*, 2013). Una forma matemática de expresar lo mencionado anteriormente sería (Ec. 1):

$$M = s * r * rd * f * ca * a \quad (\text{Ec.1})$$

Donde *s*, *r*, *rd*, *f*, *ca*, *a* son las variables representadas como imágenes booleanas y es el mapa resultante con las áreas que cumplen los criterios requeridos. A pesar de ser una técnica con algunas limitantes, todavía se utiliza la BIM como se demuestra en los trabajos de (Zhu *et al.*, 2019), por lo que se decidió utilizar el método aplicado a esta temática. Dentro del software se procedió a transformar los inputs a ráster con valores entre 1 y 0, donde 1 representaba las condiciones óptimas para la ubicación de parcelas comunales. Con las variables de ríos y vías se utilizó buffer de tolerancia según lo indicado en los reglamentos de la Ley de recursos hídricos y Ley del sistema infraestructura vial (100 y 25 metros respectivamente), mientras que las demás variables se trabajaron con los datos sin cambio.

Combinación lineal ponderada (WLC): WLC (del inglés weighted linear combination), es un método en que se puede trabajar con factores y restricciones, es decir, con valores continuos y discretos para un modelamiento más real del fenómeno de interés. Este procedimiento se caracteriza por una compensación completa entre los factores y el riesgo promedio (Lu *et al.*, 2017). WLC es una de las técnicas multicriterio más usadas para el análisis de decisiones (Bahrani *et al.*, 2016; Karimi *et al.*, 2018a). En este método se puede estandarizar los criterios en escalas continuas, por lo que es más flexible que otras técnicas como BIM (Akgün & Bulut, 2007). Además, permite agregar una ponderación a cada variable y tener una compensación total entre los parámetros. Existen varias técnicas para asignar pesos, como el método del índice estadístico (Wi), factor de ponderación (WF) y el proceso de jerarquía analítica (AHP). De estos, AHP es ampliamente usado en distintas aplicaciones (Saaty, 2000; Toth & Vacik, 2018), y se integra muy bien en combinación con técnicas multicriterio de SIG (Babalola, 2018; Ljubomir *et al.*, 2019). Para esta variante multicriterio, se aplicó en primera instancia una V de Cramer con que se identificó las variables con mayor incidencia, y posteriormente, se ejecutó una ponderación a través del AHP.

Test de independencia condicional: Para garantizar la independencia de las variables entre sí, se aplicó una prueba de la fuerza explicativa potencial de cada variable (Brown *et al.*, 2016). La medida cuantitativa de asociación que se aplicó fue la V de Cramer, la misma que representa la influencia de las variables y verifica si éstas tienen un potencial explicativo para llegar al objetivo planteado. Los valores de la V de Cramer varían entre 0 a 1 (Hadmoko *et al.*, 2017), y son obtenidos estadísticamente a través de un test Chi cuadrado mediante la fórmula (Ec. 2) (Bratley & Ghoneim, 2018):

$$V = \sqrt{\frac{c^2}{n(k-1)}} \quad (\text{Ec.1})$$

Donde *c* representa el test Chi cuadrado, los grados de libertad y el volumen de la muestra.

Si los valores de la V de Cramer son de 0,15 o más se puede tomar la variable como válida, mientras que aquellas con valores de 0,4 o mayores, son variables con una fuerte incidencia potencial para explicar el fenómeno. Valores inferiores a 0,15 sugieren que se podría descartar la variable para el modelamiento estudiado (Abuelaish & Camacho, 2016). Este paso se realizó dentro de la herramienta Land Change Modeler (LCM) mediante una red neuronal de perceptrón multicapa (MLP) dentro del software Idrisi Selva, cuyos valores se muestran en la **Tabla 1**:

Tabla 1. Valores de incidencia potencial de cada variable

Table 1. Potential incidence values of each variable

Variable	V de Cramer
Pendiente	0,36
Bosque	0,28
Río	0,22
Vía	0,28
Poblado	0,49

Proceso analítico jerárquico (AHP): En AHP (del inglés analytic hierarchy process), las ponderaciones factoriales, que no se utilizan en absoluto en el caso de la intersección booleana, son muy importantes en WLC porque determinan cómo los factores individuales se compensarán entre sí (Ho & Ma, 2018). AHP es una técnica que ayuda a la toma de decisiones mediante una comparación por pares para definir pesos de importancia entre las alternativas estudiadas (Saaty, 2000). Estos pesos se obtienen a través de la normalización del vector propio relacionado con el valor máximo de su matriz recíproca (Saaty & Vargas, 2001). La comparación por pares se realiza en una escala

Tabla 2. Escala de ponderación en AHP

Table 2. AHP weighting scale

Peso	Significado	Descripción
1	Igual	Dos variables igualmente importante
3	Moderado	El juicio de valor y experiencia favorece levemente una variable sobre otra
5	Fuerte	El juicio de valor y experiencia favorece fuertemente una variable sobre otra
7	Muy fuerte	El juicio de valor y experiencia favorece muy fuertemente una variable sobre otra
9	Extremadamente fuerte	El juicio de valor y experiencia favorece extremadamente una variable sobre otra
2,4,6,8	Intermedio	Representa valores intermedios entre 1,3,7 y 9
Recíproca	Opuesto	Utilizado para comparaciones inversas

Fuente: adaptado de (Saaty, 1980, 2000).

continua de valores del 1/9 a 9 según su influencia en el proceso (**Tabla 2**). Una de las ventajas que presenta AHP es que permite verificar si los pesos asignados a las variables son adecuados mediante una relación de consistencia (CR) (Palacios *et al.*, 2018), que indica la probabilidad con que los juicios matriciales fueron generados de forma aleatoria, y por ende, sin ningún sesgo por parte de los evaluadores (Pourghasemi *et al.*, 2012).

Las ponderaciones son aceptadas cuando el CR es menor a 0,1, el mismo que se obtiene de la siguiente fórmula (Ec. 3) (Abdel *et al.*, 2017):

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (Ec.3)$$

Donde *RI* es el promedio del índice de consistencia resultante del ordenamiento de la matriz, que corresponde al grado de consistencia que surge en una matriz recíproca aleatoria de valores nominales con nueve categorías. es el índice de consistencia obtenido de (Massawe *et al.*, 2019), expresado en la (Ec. 4):

$$CI = \frac{(\lambda_{max} - n)}{n - 1} \quad (Ec.4)$$

Donde λ_{max} es el valor propio más alto de la matriz, y es el orden de la matriz. La asignación de pesos estuvo en función de la fuerza explicativa de cada variable, dada por los valores de V de Cramer, y estos fueron calculados mediante la herramienta Weight del software Idrisi Selva, con un CR de 0,06. En la **Tabla 3** se muestran los pesos obtenidos mediante AHP.

Tabla 3. Pesos asignados a las variables para WLC**Table 3.** Weights assigned to variables for WLC

Variable	Peso
Pendiente	0,14
Bosque	0,08
Río	0,03
Vía	0,07
Poblado	0,23
Cangahua	0,45

Con los pesos establecidos, WLC se puede expresar matemáticamente de la siguiente forma (Ec. 5):

$$M = \sum w_i * x_i \quad (\text{Ec.5})$$

Donde son los pesos normalizados de cada variable, y es el puntaje de criterio del factor. Los ráster de entrada correspondieron a distancias euclidianas que fueron normalizados mediante la Lógica Fuzzy.

Promedio ponderado ordenado (OWA): OWA (del inglés ordered weighted averaging), es un método involucra tanto factores como restricciones, al igual que WLC, pero al contrario del método anterior, además de los pesos de factor, OWA utiliza los pesos de orden que permiten un control directo sobre los niveles de compensación y riesgo (Viccaro *et al.*, 2018). En cuanto al grado de compensación global, corresponde al grado de la relación de pesos factores/compensaciones aplicados en el procedimiento de combinación (Yager, 1996). La importancia de estas ponderaciones, de ninguno a completo, se rige por el conjunto de pesos de orden. El grado de riesgo está basado en la posición del procedimiento de combinación entre el mínimo (operador AND) y máximo (operador OR) de las áreas que se considerarán adecuadas (Zabihi *et al.*, 2019).

Los pesos de orden se definen no en función de los factores en sí mismos, sino que se debe a la posición del orden de rango de los valores de factor para una ubicación determinada. Además, estas ponderaciones ordenadas influyen a cada factor según su clasificación desde el valor mínimo hasta el máximo para cada ubicación (Karimi

et al., 2018b). El sesgo relativo hacia el mínimo o el máximo de las ponderaciones de orden controla el nivel de riesgo, mientras que el grado en que las ponderaciones de orden se distribuyen uniformemente en todas las posiciones, controla el nivel de compensación general (Gorsevski *et al.*, 2012). OWA brinda una gran flexibilidad para tomar la decisión adecuada gracias a que presenta diferentes resultados basados en distintos niveles de riesgo (Al-Anbari *et al.*, 2018). Al combinar el operador OWA con AHP ofrece un análisis multicriterio muy robusto para solventar problemas de decisión espacial. Según Yager (1993), el operador OWA se define por la siguiente ecuación (Ec. 6):

$$M_i(a_{i1}, \dots, a_{in}) = \sum_{j=1}^n w_j z_{ij} \quad (\text{Ec.6})$$

Donde es la dimensión del operador, el cual es definido como una función $F : R^n \rightarrow$ que posee un vector de pesos ordenado $V = [w_1, w_2, \dots, w_n]$; $w_i \in$; cuya sumatoria es la unidad. Además, $z_{i1} \geq z_{i2} \geq \dots \geq z_{in}$ es el orden que se encuentra al reordenar los valores de los criterios a_{i1}, \dots, a_{in} . En este estudio se ponderó en orden de prioridad a la variable cangahua, asentamiento humano, pendiente, bosque, camino y río.

Delimitación de las parcelas óptimas para la recuperación

Una vez aplicadas los tres métodos de evaluación multicriterio (MCE), se realizaron visitas de campo a las cuatro comunas en conjunto con los comuneros, quienes conocen más de cerca el área de estudio. Se procedió a seleccionar 10 posibles zonas para los huertos agrícolas, a manera de muestras dispersas aleatorias, con un total de 40 puntos georreferenciados mediante un GPS navegador Magellan para posteriormente sobreponerlos a los tres modelos generados, y así verificar la exactitud de cada uno de los métodos mediante la construcción de matrices de confusión para cada comuna.

Un primer filtro para la selección de las parcelas óptimas resultantes de los tres modelos

fue desde el punto de vista geométrico (Yang *et al.*, 2019), mediante la aplicación de un índice de compacidad, el cual es una relación del área del polígono con el perímetro del mismo (Paegelow *et al.*, 2017). El coeficiente de compacidad o Cratio se calcula con la ecuación (Ec. 7) (Palacios, 2018):

$$C = \sqrt{\frac{A_i}{P_i}} \quad (\text{Ec.7})$$

Donde A_i corresponde al área del polígono, P_i es el perímetro y C el grado de compacidad (Cratio). Mientras mayor sea el valor de éste coeficiente, más regular será el polígono, y viceversa (Handayanto *et al.*, 2018).

RESULTADOS

De la aplicación de las metodologías multicriterio se obtuvieron tres modelos que representan la realidad del terreno bajo las condiciones establecidas, según cada uno de los métodos, BIM, WCL y OWA los cuales muestran en la **Figura 5**, donde se observan las posibles zonas para la recuperación de cangahuas.

En las **Tablas 4, 5, 6, 7** se muestran las matrices para las distintas comunidades, con sus respectivas exactitudes calculadas.

Además de la forma regular de la parcela, fueron considerados los límites legales de los predios. En base a estos dos criterios fueron propuestos a cada comunidad cuatro parcelas que servirían para recuperar el suelo. Finalmente,

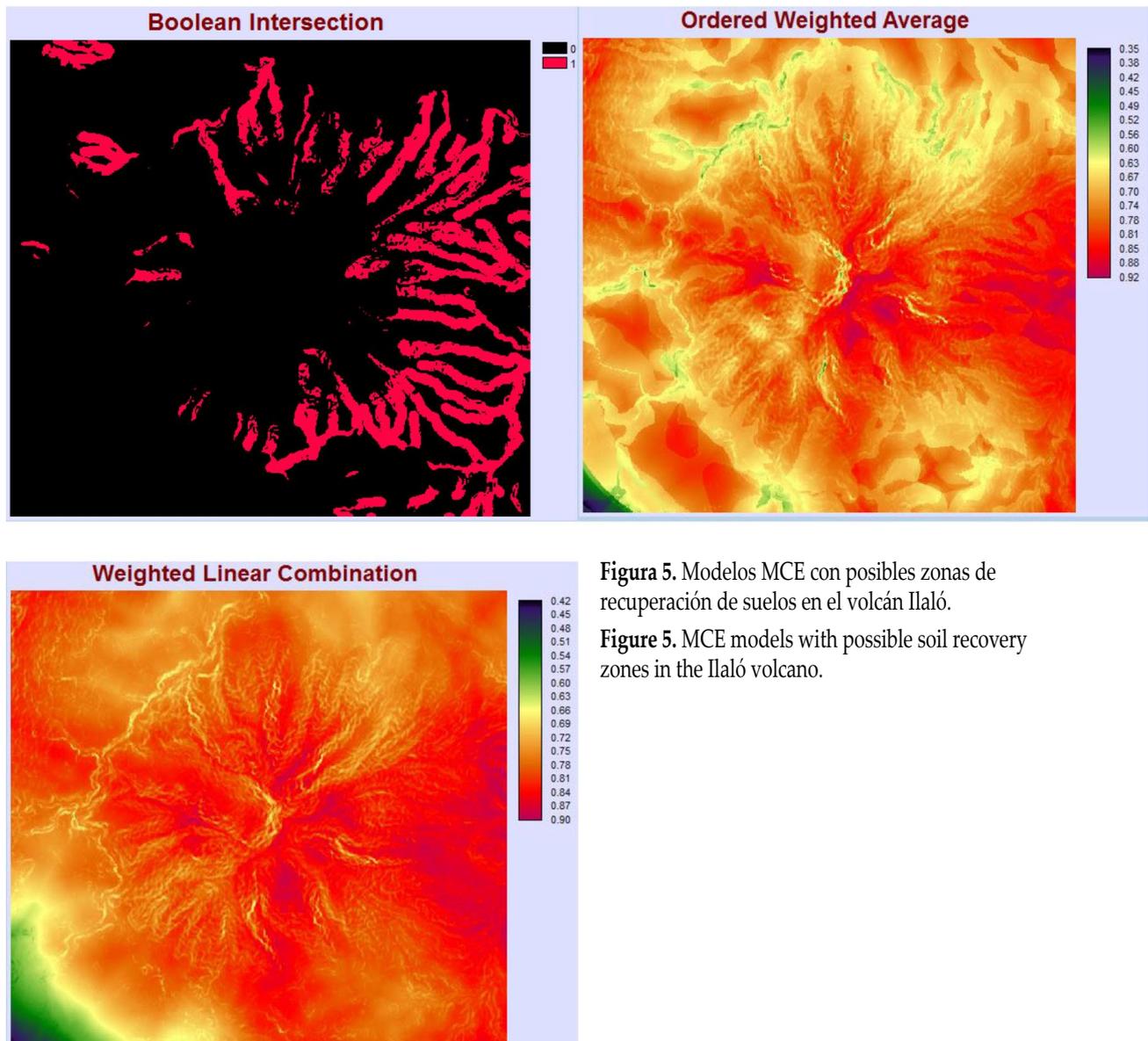


Figura 5. Modelos MCE con posibles zonas de recuperación de suelos en el volcán Ilaló.

Figure 5. MCE models with possible soil recovery zones in the Ilaló volcano.

Tabla 4. Matriz de confusión del muestreo en las comunidades

Table 4. Confusion matrix of sampling in the communities

		Modelamiento					
		WLC	OWA	BIM	Sumatoria	Exactitud	
Alangasi	Observación	WLC	3	1	1	5	60,0%
		OWA	1	1	0	2	50,0%
		BIM	1	1	1	3	33,3%
		Sumatoria	5	3	2	10	Exactitud global
		Exactitud	60,0%	33,3%	50,0%	50,0%	
Angamarca	Observación	WLC	4	2	0	6	66,7%
		OWA	1	1	3	5	33,3%
		BIM	0	1	0	1	0,0%
		Sumatoria	5	4	1	10	Exactitud global
		Exactitud	80,0%	25,0%	0,0%	50,0%	
San Francisco de Baños	Observación	WLC	4	1	1	6	66,7%
		OWA	0	1	1	2	50,0%
		BIM	0	1	1	2	50,0%
		Sumatoria	4	3	3	10	Exactitud global
		Exactitud	100,0%	33,3%	33,3%	60,0%	
La Toglla	Observación	WLC	4	1	0	5	80,0%
		OWA	1	1	3	5	33,3%
		BIM	1	0	1	2	50,0%
		Sumatoria	6	2	2	10	Exactitud global
		Exactitud	66,7%	50,0%	50,0%	60,0%	

para el establecimiento definitivo de los huertos comunales a utilizar, se socializó con los habitantes de cada sector los resultados del modelamiento y las parcelas propuestas, en un cronograma de ocho días, dos días por comunidad, esto permitió obtener la autorización por parte de los propietarios y construir perfiles y calicatas de 60 cm a 70 cm de profundidad al interior de las parcelas seleccionadas para así garantizar una profundidad de al menos 60 cm de cangahua lo que asegura que la roturación del suelo pueda ser llevada a cabo por maquinaria pesada sin llegar a encontrarse con roca madre. En la **Figura 6** se muestra parte del trabajo realizado en campo.

En total fueron construidas dieciséis calicatas, en las cuales se verificó la presencia de cangahua en las comunas de Alangasi, Angamarca, San Francisco de Baños y La Toglla, donde Angamarca fue la comuna con la mayor área disponible para huertos comunales (**Figura 7**). Además, se comprobó en todas, una profundidad de cangahua de al menos 60 cm.

DISCUSIÓN

Tras la aplicación de los tres métodos de evaluación multicriterio, los modelos espaciales obtenidos mostraron que una gran parte de la superficie del volcán Ilaló es apta para llevar



Figura 6. Calicatas realizadas en las zonas propuestas a recuperación en: a) Alangasí, b) San Francisco de Baños, c) Angamarca, d) La Toglla.

Figure 6. Pits made in the areas proposed for recovery in: a) Alangasí, b) San Francisco de Baños, c) Angamarca, d) La Toglla.

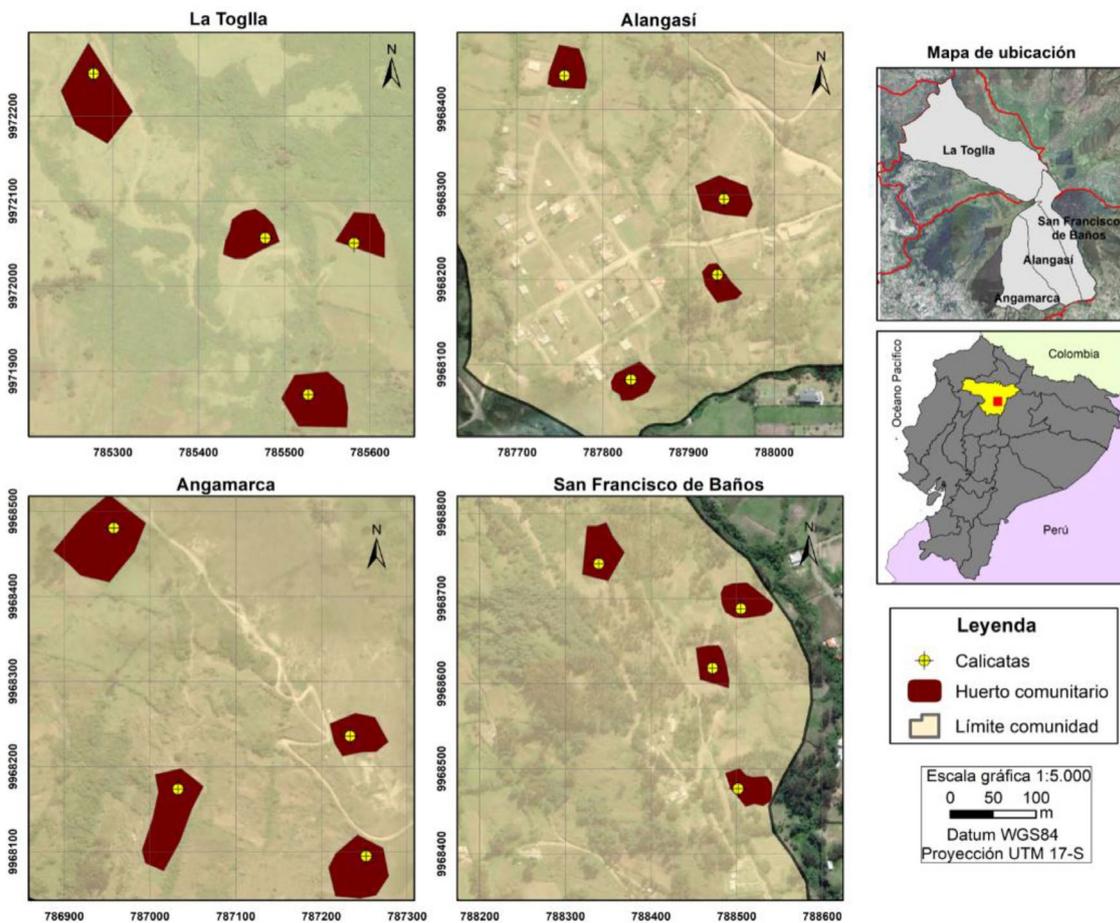


Figura 7. Mapa de las áreas resultantes con WCL para huertos comunitarios en el Ilaló

Figure 7. Map of the resulting areas with WCL for community gardens in Ilaló

a cabo procesos de recuperación, especialmente aquellas que poseen pendientes poco pronunciadas. El modelo BIM fue el que mostró menos superficie para la recuperación ya que clasifica las zonas únicamente entre aptas y no aptas, por lo cual las áreas fueron más reducidas, mientras los modelos OWA y WLC muestran la superficie a manera de un mapa de probabilidad depen-

diendo de qué tan óptima es una determinada zona, con valores de 0 a 1, lo que permite considerar sitios adicionales al momento de la selección de las parcelas.

De las matrices de confusión, las exactitudes globales obtenidas del muestreo aleatorio realizado, mostraron que el método WLC alcanzó los

mejores resultados en las cuatro comunidades, y, por consiguiente, fue el modelo más idóneo para ser aplicado en el presente trabajo. Sin embargo, no implica que este método sea superior a los otros al momento de realizar un análisis multicriterio ya que esto dependerá de las variables utilizadas y las características particulares de cada estudio.

La selección final de las parcelas con la participación de los habitantes de las diferentes localidades permitió el empoderamiento del proyecto, al comprender que los beneficios están alineados con sus propias necesidades, íntimamente relacionadas al deterioro de la calidad ambiental por la creciente erosión de los suelos en el volcán Ilaló. La participación de los habitantes no solo fue indispensable durante la selección de las parcelas, sino que lo será durante todo el proceso de recuperación del suelo, ya que la finalidad de este proyecto fue la generación de suelos fértiles que puedan ser aprovechados en la creación de huertos comunales que ayudarán a mejorar la alimentación y economía de las personas de la localidad, a la vez que evita la pérdida del mismo suelo.

La profundidad de al menos 60 cm de cangahua en las parcelas seleccionadas no solo garantiza el trabajo adecuado de la maquinaria pesada durante la roturación del suelo, sino que es la profundidad requerida para que los diferentes cultivos propios de la región puedan desarrollarse con éxito. Productos como maíz, haba y fréjol necesitan una profundidad efectiva de cangahua recuperada no menor a 40 cm, mientras cereales como el trigo, cebada y avena de 30 cm (Trujillo & Zebrowski, 1998). A nivel del Ecuador están registrados casos de éxito como el de la provincia de Imbabura donde más de 500 hectáreas de suelos de cangahua fueron recuperados y utilizados en la producción de tomate, lo que demuestra el potencial uso agrícola que pueden llegar a tener los suelos recuperados, a través de procesos de roturación e incorporación de abonos verdes (Hidrobo *et al.*, 2015; Brown *et al.*, 2017), riego adecuado (Almeida, 2016), y buenas prácticas agrícolas como por ejemplo, terrazas manuales y progresivas, cercas verdes, entre otros (Trujillo & Zebrowski, 1998).

CONCLUSIONES

La utilización de datos espaciales y técnicas multicriterio dentro de un SIG, permitió optimizar tiempos y recursos en la determinación de suelos degradados con presencia de cangahuas y en la delimitación de zonas aptas para realizar procesos de recuperación como se lo demostró en las comunidades del volcán Ilaló.

De los tres métodos MCE utilizados, la WLC fue el que mejores resultados mostró en la matriz de confusión, seguida del OWA y en muy poca medida el BIM. Estos resultados muestran la gran ventaja de las técnicas que integran funciones y restricciones para su modelamiento, y más aún al usar AHP para la ponderación de las variables.

El uso de la V de Cramer fue clave para dar indicios de la importancia de las variables en el objetivo del modelo a generar, además de que puede ser considerado como indicador para la asignación de pesos dentro del método AHP.

Un total de cuatro zonas propuestas para la recuperación de suelo degradado por cangahua fueron seleccionadas en cada comunidad, en las que se realizó un total de 16 calicatas para comprobar que la profundidad de la cangahua sea de mínimo 60 cm y así garantizar la roturación del suelo mediante maquinaria pesada y la posterior implantación de cultivos propios del área de estudio.

BIBLIOGRAFÍA

- Abdel, M; M Mohamed; Y Zhou & I Hezam. 2017. Multi-criteria group decision making based on neutrosophic analytic hierarchy process. *J. Intell. Fuzzy Syst.* 33(6):4055-4066.
- Abuelaish, B & M Camacho. 2016. Scenario of land use and land cover change in the Gaza Strip using remote sensing and GIS models. *Arabian J. Geosci.* 9(4):274.
- Akgün, A & F Bulut. 2007. GIS-based landslide susceptibility for Arsin-Yomra (Trabzon, North Turkey) region. *Environ. Geol.* 51(8):1377-1387.
- Al-Anbari, M; M Thameer & N Al-Ansari. 2018. Landfill site selection by weighted overlay technique: case study of Al-Kufa, Iraq. *Sustainability* 10(4):999.
- Almeida, L. 2016. Diseño de un sistema de producción sustentable a partir de la caracterización del suelo, en la hacienda El Puntal parroquia Bolívar, Provincia del Carchi. Tesis de grado, Universidad Técnica Equinoccial. Quito, Ecuador.

- Alvarado, A; L Audin; J Nocquet; S Lagreulet; M Segovia; Y Font; G Lamarque; H Yepes; P Mothes; F Rolandone; P Jarrín & X Quidelleur. 2014. Active tectonics in Quito, Ecuador, assessed by geomorphological studies, GPS data, and crustal seismicity. *Tectonics* 33(2):67-83.
- Babalola, M. 2018. Application of GIS-Based Multi-Criteria Decision Technique in Exploration of Suitable Site Options for Anaerobic Digestion of Food and Biodegradable Waste in Oita City, Japan. *Environments* 5(7):77.
- Bahrani, S; T Ebadi; H Ehsani; H Yousefi & R Maknoon. 2016. Modeling landfill site selection by multi-criteria decision making and fuzzy functions in GIS, case study: Shabestar, Iran. *Environ. Earth Sci.* 75(4):337.
- Bratley, K & E Ghoneim. 2018. Modeling Urban Encroachment on the Agricultural Land of the Eastern Nile Delta Using Remote Sensing and a GIS-Based Markov Chain Model. *Land* 7(4):114.
- Breure, A; J Lijzen & L Maring. 2018. Soil and land management in a circular economy. *Sci. Total Environ.* 624:1125-1130.
- Brown, D; J Aragón & V Guerrero. 2017. Recuperación de suelo de cangahua para el cultivo de tomate riñón. *FICAYA* (9):1-10.
- Brown, G; J Strickland; H Kobryn & S Moore. 2016. Stakeholder analysis for marine conservation planning using public participation GIS. *Appl. Geogr.* 67:77-93.
- Carrera, D; J Quinteros; A Gómez; E Solano; G Llumiquinga & C Burgos. 2019. Dynamic model for the management of water resource and water aptitude for irrigation of the Toglhuayco gorge in the Guangopolo micro-basin. The 5th International Conference on Water Resource and Environment (WRE 2019). Vol. 344. Pp. 1-7. IOP Conference Series: Earth Environ. Sci. Macao.
- Cepeda, M; I Palacios; A Tierra & E Kirby. 2018. Multiresolution analysis in the visible spectrum of landsat-tm images through wavelet transform. *Geographia Technica* 13(1):20-29.
- Clapperton, C. 1987. Glacial geomorphology, quaternary glacial sequences and paleoclimatic inferences in the Ecuadorian Andes. *Int. Geomorph.* 843-870.
- Coltorti, M & C Ollier. 2000. Geomorphic and tectonic evolution of the Ecuadorian Andes. *Geomorph.* 32(1-2): 1-19.
- Custode, E; G De Noni; G Trujillo & M Viennot. 1992. The Cangahua in Ecuador: Morpho-Edaphologic characterization and susceptibility to erosion. *Terra* 10(Special number):332-346.
- De Noni, G; G Trujillo & M Viennot. 1992. Historical, Social and Economical Analysis of the Cangahua in Ecuador. *Terra* 10(Special number):504-514.
- Fan, X; L Zhao; T Hong; H Lin & W Hong. 2018. Prediction of land use change and ecosystem services value: a case study in Nanping, China. *App. Ecol. Environ. Res.* 16(4):4935-4954.
- Gaubi, I; A Chaabani & A Ben Mammou. 2017. A GIS-based soil erosion prediction using the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) (Lebna watershed, Cap Bon, Tunisia). *Nat. Hazards* 86:219-239.
- Gorsevski, P; K Donevska; C Mitrovski & J Frizado. 2012. Integrating multi-criteria evaluation techniques with geographic information systems for landfill site selection: a case study using ordered weighted average. *Waste Manag.* 32(2):287-296.
- Hadmoko, D; F Lavigne & G Samodra. 2017. Application of a semiquantitative and GIS-based statistical model to landslide susceptibility zonation in Kayangan Catchment, Java, Indonesia. *Nat. Hazards* 87(1):437-468.
- Hall, M & P Mothes. 1996. El origen y la edad de la cangahua superior, valle de Tumbaco. *Memorias del III Simposio Internacional Sobre Suelos Volcánicos Endurecidos*. Pp. 19-28. Quito.
- Hall, M; P Samaniego; J Le Pennec & J Johnson. 2008. Ecuadorian Andes volcanism: A review of Late Pliocene to present activity. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 176(1):1-6.
- Han, Z; F Qin; C Cui; Y Liu; L Wang & P Fu. 2019. Mr4Soil: A MapReduce-Based Framework Integrated with GIS for Soil Erosion Modelling. *ISPRS Int. J. Geoinf.* 8(3):103.
- Handayanto, R; N Tripathi; S Kim & H Herlawati. 2018. Land Use Growth Simulation and Optimization for Achieving a Sustainable Urban Form. *TELKOMNIKA* 16(5):2063-2072.
- Hansjürgens, B; A Lienkamp & S Möckel. 2018. Justifying Soil Protection and Sustainable Soil Management: Creation-Ethical, Legal and Economic Considerations. *Sustainability* 10(10):3807.
- Hidrobo, J; M Da Costa; C Prat; G Trujillo; J Moreno & C Ortega. 2015. Production systems in areas with reclaimed cangahua soils in the Northern Highlands of Ecuador. *Siembra* 2:116-127.
- Ho, W & X Ma. 2018. The state-of-the-art integrations and applications of the analytic hierarchy process. *Eur. J. Oper. Res.* 267(2):399-414.
- IGM. 2015. Geoportal del Instituto Geográfico Militar. <http://www.geoportaligm.gob.ec/portal/>. Último acceso: junio de 2020.
- Jazouli, A; A Barakat; R Khellouk; J Rais & M Baghdadi. 2019. Remote sensing and GIS techniques for prediction of land use land cover change effects on soil erosion in the high basin of the Oum Er Rbia River (Morocco). *Remote Sens. Appl. Soc. Environ.* 13:361-374.
- Karimi, H; S Amiri; J Huang & A Karimi. 2018a. Integrating GIS and multicriteria decision analysis for landfill site

- selection, case study: Javanrood County in Iran. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 16:7305-7318.
- Karimi, M; O Nematollahi; N Mijani; S Nadizadeh; H Karimi & A Toomanian. 2018b. An integrated GIS-based Ordered Weighted Averaging Analysis for Solar Energy Evaluation in Iran: Current Conditions and Future Planning. *Renew. Energy* 136:1130-1146.
- Ljubomir, G; D Pamučar; S Drobniak & H Pourghasemi. 2019. Modeling the Spatial Variability of Forest Fire Susceptibility Using Geographical Information Systems and the Analytical Hierarchy Process. *Spatial Modeling in GIS and R for Earth and Environmental Sciences* 337-369.
- Lu, Q; N Chang; J Joyce; A Chen; D Savic; S Djordjevic & G Fu. 2017. Exploring the potential climate change impact on urban growth in London by a cellular automata-based Markov chain model. *Comput., Environ. Urban Syst.* 68:121-132.
- MAAE. 2020. Mapa interactivo del Ministerio del Ambiente y Agua del Ecuador. <http://ide.ambiente.gob.ec/mapainteractivo/>. Último acceso: junio de 2020.
- MAG. 2019. Sistema de Información pública agropecuaria. <http://geoportal.agricultura.gob.ec/>. Último acceso: junio de 2020.
- Massawe, B; A Kaaya & B Slater. 2019. Involving small holder farmers in the agricultural land use planning process using Analytic Hierarchy Process in rice farming systems of Kilombero Valley, Tanzania. *Afr. J. Agric. Res.* 14(7):395-405.
- Paegelow, M; M Camacho & J Mas. 2017. Techniques for the Validation of LUCC Modeling Outputs. *Lect. Notes Geoinf. Cartogr.* 53-80.
- Palacios, I. 2018. Evaluación multicriterio para la ubicación de un relleno sanitario en la ciudad de Macas, a través de la ponderación de sus variables con el Proceso Analítico Jerárquico, AHP. *Revista de Ciencias de Seguridad y Defensa* 3(3):83-94.
- Palacios, I; D Ushiña & D Carrera. 2018. Identificación de Cangahuas para su recuperación mediante estudio multicriterio y constatación in situ en comunas del volcán Ilaló. *Congreso de Ciencia y Tecnología ESPE*. Vol. 13. Pp. 9-12. Sangolquí.
- Palacios, I. 2019. Generación de un modelo de predicción de la variable ondulación geoidal, para la zona rural del cantón Guayaquil, mediante el uso del método Cokriging. Tesis de grado, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Sangolquí, Ecuador.
- Palacios, I; B Castro & F Rodríguez. 2019. Almacenamiento de carbono como servicio ambiental en tres reservas naturales del Ecuador. *Revista Geoespacial* 16(1):1-14.
- Podwojewski, P & N Germain. 2005a. Short-term effects of management on the soil structure in a deep tilled hardened volcanic-ash soil (cangahua) in Ecuador. *Eur. J. Soil Sci.* 56:39-51.
- Podwojewski, P & N Germain. 2005b. Evolution of the soil structure in a deep tilled hardened volcanic ashsoil (Cangahua) in Ecuador. *Eur. J. Soil Sci.* 39:39-51.
- Podwojewski, P; J Janeau & Y Leroux. 2008. Effects of agricultural practices on the hydrodynamics of a deep tilled hardened volcanic ash-soil (Cangahua) in Ecuador. *Catena* 72(1):179-190.
- Pourghasemi, H; B Pradhan & C Gokceoglu. 2012. Application of fuzzy logic and analytical hierarchy process (AHP) to landslide susceptibility mapping at Haraz watershed, Iran. *Nat. Hazards* 63(2):965-996.
- Prat, C. 2014. Proyecto Prometeo: Recuperación agrícola participativa de suelos erosionados de la Sierra ecuatoriana. Caso de las cangahuas. SENESCYT. Quito, Ecuador.
- Saaty, T. 1980. *The analytical hierarchy process*. McGraw Hill. New York.
- Saaty, T. 2000. *The fundamentals of decision making and priority theory with the analytic hierarchy process*. Vol. 6. 2da edn. RWS Publications. Pittsburgh.
- Saaty, T & L Vargas. 2001. *Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process*. Kluwer. Boston.
- Sánchez, M; J Genise; E Bellosi; J Román & L Cantil. 2013. Dung beetle brood balls from Pleistocene highland palaeosols of Andean Ecuador: A reassessment of Sauer's *Coprinisphaera* and their palaeoenvironments. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 386:257-274.
- Sauer, W. 1965. *Geología del Ecuador*. Ediciones del Ministerio de Educación del Ecuador. Quito.
- Shahabi, H; S Keihanfard; B Ahmad & M Amiri. 2013. Evaluating Boolean, AHP and WLC methods for the selection of waste landfill sites using GIS and satellite images. *Environ. Earth Sci.* 71(9):4221-4233.
- SIGTIERRAS. 2012. Ministerio de Agricultura y Ganadería. Geoportal del Programa SIGTIERRAS. <http://ide.sigtierras.gob.ec/geoportal/>. Último acceso: junio de 2020.
- Singh, S; P Laari; S Mustak; P Srivastava & S Szabó. 2017. Modelling of Land Use Land Cover Change using Earth Observation Datasets of Tons River Basin, Madhya Pradesh, India. *Geocarto Int.* 1-21.
- Toth, W & H Vacik. 2018. A comprehensive uncertainty analysis of the analytic hierarchy process methodology applied in the context of environmental decision making. *J. Multicrit. Decis. Anal.* 1-20.
- Trujillo, G & C Zebrowski. 1998. La cangahua y su rehabilitación. III Simposio Internacional de Desarrollo Sustentable de Montaña: entendiendo las interfaces ecológicas

- para la gestión de los paisajes culturales en los Andes. Pp. 9-14. Quito.
- Trujillo, G; J Hidrobo; C Ortega & C Prat. 2014. Habilitación de cangahua en el Ecuador. Ediciones de la Universidad Central del Ecuador. Quito.
- Vera, R & R López. 1992. Tipología de la cangahua. *Terra* 10(Special number):113-119.
- Viccaro, M; M Cozzi; A Vastola & S Romano. 2018. Promoting Small-Scale Biofuel Production: A Qualitative GIS-OWA Methodology for Land Suitability Analysis of Winter Rapeseed. *Multicrit. Anal. Agric.* 151-165.
- Winkell, A & C Zebrowski. 1992. Cangahua in Ecuador: The Paleogeographic Context of its Formation. *Terra* 10(Special number):107-112.
- Wolf, T. 1975. Geografía y geología del Ecuador. Ediciones de la Casa de la Cultura Ecuatoriana. Quito.
- Yager, R. 1993. On Ordered Weighted Averaging Aggregation Operators in Multicriteria Decisionmaking. *Read. Fuzzy Sets Intell. Syst.* 80-87.
- Yager, R. 1996. Quantifier guided aggregation using OWA operators. *Int. J. Intell. Syst.*, 11(1):49-73.
- Yang, B; S Tong & R Fan. 2019. Sharpening land use maps and predicting the trends of land use change using high resolution airborne image: A geostatistical approach. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 79:141-152.
- Zabihi, H; M Alizadeh; P Kibet; M Karami; H Shahabi; A Ahmad; M Nor Said & S Lee. 2019. GIS Multi-Criteria Analysis by OrderedWeighted Averaging (OWA): Toward an Integrated Citrus Management Strategy. *Sustainability* 11(4):1009.
- Zebrowski, C. 1997. Los suelos con cangahua en el Ecuador. *Memorias del III Simposio Internacional sobre suelos volcánicos endurecidos*. Pp. 128-137. Quito.
- Zebrowski, C & A Vicuña. 1996. El cultivo de cangahua en el medio campesino tradicional en el Ecuador. *Memorias del III Simposio Internacional sobre Suelos volcánicos endurecidos*. Pp. 472-481. Quito.
- Zhang, Y; Z Chen; B Zhu; X Luo; Y Guan; S Guo & Y Nie. 2008. Land desertification monitoring and assessment in Yulin of Northwest China using remote sensing and geographic information systems (GIS). *Environ. Monit. Assess.* 147(1-3):327-337.
- Zhu, J; X Wang; P Wang; Z Wu & M Kim. 2019. Integration of BIM and GIS: Geometry from IFC to shapefile using open-source technology. *Autom. Constr.* 102:105-119.