

Conservación

Identificación de áreas prioritarias para la restauración de bosques de montaña en la zona alta de la cuenca del río La Antigua, Veracruz

Identification of priority areas for montane forest restoration in the upper basin of the La Antigua River basin, Veracruz

Swany Morteo-Montiel ^a, Martha Bonilla-Moheno ^{a, *} y Tarin Toledo-Aceves ^b

^a Instituto de Ecología, A.C., Red de Ambiente y Sustentabilidad, Carretera Antigua a Coatepec Núm. 351, El Haya, 91073 Xalapa, Veracruz, México

^b Instituto de Ecología, A.C. Red de Ecología Funcional, Carretera Antigua a Coatepec Núm. 351, El Haya, 91073 Xalapa, Veracruz, México

*Autor para correspondencia: martha.bonilla@inecol.mx (M. Bonilla Moheno)

Recibido: 3 septiembre 2023; aceptado: 20 febrero 2024

Resumen

La identificación de áreas para la restauración de bosques aporta información para el diseño de acciones que favorecen la conectividad y la cobertura forestal. El objetivo del estudio fue identificar áreas prioritarias para la restauración de bosques ribereños de la zona alta de la cuenca del río La Antigua, Veracruz. Se realizó un análisis multicriterio con 16 parámetros integrados en 9 grupos: conservación biológica, potencial de restauración, zonas ribereñas/corredores hidrológicos, topografía, clima, suelo, perturbación, beneficiarios, y peligro frente a eventos naturales. Se definieron, estandarizaron y ponderaron los criterios para generar un mapa de áreas prioritarias para la restauración. De acuerdo con los resultados, las categorías de prioridad alta, media, baja representaron 6.8%, 6.9% y 1.4% de la superficie total del área de estudio, respectivamente. Las áreas con alta prioridad se distribuyen mayormente en potreros, cerca de ríos, entre 1,098 y 2,974 m snm, con precipitaciones anuales promedio ~ 1,373 mm, pendientes ligeras, con bajo riesgo de incendio y zonas con riesgo de deslizamientos. Los resultados identifican las áreas en donde los esfuerzos de restauración local podrían tener mayor impacto.

Palabras clave: Análisis multicriterio; Bosque mesófilo; Bosques ribereños; Corredores; Indicadores

Abstract

Identifying areas for forest restoration contributes to the design of actions that favor connectivity and forest cover. The objective of the study was to identify priority areas for riparian forest restoration, in the upper basin of the La Antigua River, Veracruz. We conducted a multi-criteria analysis using 16 parameters integrated into 9 groups: biological conservation, restoration potential, riparian zones/hydrological corridors, topography, climate, soil, disturbance, beneficiaries, and danger of natural events. The analysis defined, standardized and weighed the criteria

used to generate a map of priority areas for restoration. The categories of high, medium, low priority represented 6.8%, 6.9%, and 1.4% of the total study area, respectively. The areas with high priority are distributed mainly in pastures, near rivers, between 1,098 and 2,974 m asl, with an average annual rainfall ~ 1,373 mm, slight slopes, with low fire risk, and in areas with risk of landslides. The results identify areas where restoration efforts could have a major impact.

Keywords: Multicriteria analysis; Cloud forest; Riparian forests; Corridors; Indicators

Introducción

La restauración se ha convertido en una respuesta crucial a la extensa pérdida y degradación de los bosques tropicales, como lo resaltan las iniciativas globales (FAO, 2021; IUCN, 2020; Semarnat, 2023), por ejemplo, el Desafío de Bonn con la meta de restaurar 150 millones de hectáreas de tierras degradadas y deforestadas para el año 2020, o la Década de las Naciones Unidas para la Restauración de los Ecosistemas 2021-2030. En particular, la restauración de los bosques en las montañas tropicales es de crítica importancia debido a que estos ecosistemas albergan alta biodiversidad, proveen de servicios ecosistémicos esenciales; sin embargo, están gravemente amenazados por la deforestación y la degradación, y son altamente vulnerables al cambio climático global (Christmann y Menor, 2021; Mata-Guel et al., 2023).

Como en otras regiones tropicales, los bosques en las montañas de México han sido transformados, fragmentados y degradados principalmente por las actividades humanas (Conafor, 2017). Estos paisajes representan un mosaico de variadas cubiertas terrestres que incluyen plantaciones de café de sombra, potreros, agricultura tradicional y comercial, remanentes de vegetación primaria y secundaria, así como bosques ribereños dispersos dentro de una extensa matriz agropecuaria (Conabio, 2010). Los bosques ribereños son comunidades adyacentes a los ríos y arroyos que desempeñan importantes funciones ecológicas, como el mantenimiento de la calidad del agua y una elevada biodiversidad (Naiman et al., 1998). Estos bosques ribereños están conformados por asociaciones vegetales complejas y son muy vulnerables a los cambios de uso de suelo (Meli et al., 2017; Naiman et al., 1998).

Los bosques ribereños contribuyen a la conservación de bosques, ya que actúan como corredores ecológicos que facilitan el desplazamiento de fauna silvestre (Lees y Peres, 2008; Sekercioglu, 2009), son fuentes de propágulos y sirven de hábitat de organismos dispersores, como aves y murciélagos, que favorecen la recuperación de bosques que han sido fragmentados (Hernández-Dávila et al., 2020). Además, cumplen con diversas funciones ecológicas como la de regular el microclima del río, generar microhábitats para especies terrestres y acuáticas, filtrar la entrada de sedimentos y sustancias químicas, ser zona de recarga de

aguas subterráneas, su valor recreativo y cultural. Dado este contexto, es primordial generar información útil para el diseño de acciones de restauración que favorezcan la conectividad y el aumento de la cobertura forestal de estos sistemas, particularmente en zonas donde los paisajes son predominantemente agropecuarios.

La cuenca del río La Antigua en el estado de Veracruz, ha sido identificada como una región de alta importancia por su gran biodiversidad (Conabio, 2004); no obstante, ha experimentado degradación, deforestación y contaminación, principalmente por prácticas agrícolas inadecuadas que se realizan en laderas, además de las descargas de agroquímicos, desechos de los beneficios de café, residuos domésticos e industriales que se vierten a los ríos (Arriaga et al., 2002). En la zona alta de la cuenca se encuentra la subcuenca del río Pixquiac, la cual provee alrededor de 40% de agua a la ciudad de Xalapa y la subcuenca del río Gavilanes que es una fuente principal de abastecimiento de agua para la ciudad de Coatepec (Von Thaden et al., 2019). Por lo tanto, para asegurar el abastecimiento de agua y la recuperación de bosques, se requiere la aplicación de estrategias de conservación en cañadas y ríos secundarios, y de restauración en áreas con relevancia hidrológica que se encuentren degradadas o desprovistas de vegetación. Una estrategia para alcanzar este objetivo sería crear franjas de vegetación al borde de los arroyos y ríos que, además, permitirían la retención de sólidos, agroquímicos y sedimentos, lo cual controlaría parte de la contaminación ocasionada por actividades humanas (Antonini et al., 2022). Por lo anterior, el objetivo del estudio fue identificar las áreas prioritarias para la restauración de los bosques ribereños en la zona alta de la cuenca del río La Antigua. Para determinar cuáles serían los sitios idóneos, se realizó un análisis multicriterio que considera diversos factores de importancia ecológica, climática, y socioeconómica, los cuales fueron seleccionados y ponderados con la ayuda de expertos locales.

Materiales y métodos

El área de estudio se encuentra en la zona alta de la cuenca de La Antigua, ajustada a los límites de Veracruz (fig. 1). La cuenca hidrográfica alta del río La Antigua tiene un área de 563.06 km², con un rango de elevación

de 1,024 a 4,197 m snm. La cuenca pertenece a la región hidrológica número 28 del río Papaloapan y a la subregión Jamapa y Otros (cuenca) del río Decozalapa (subcuenca). En la zona alta de la cuenca de La Antigua, se encuentran los ríos Pixquiác, Gavilanes, Atopa, Caracol, Tepetlayo, Cuaneluapa, Negro, Comalapa y Tecajetes, por mencionar algunos (Gobierno del Estado de Veracruz, 2018). Las principales localidades urbanas son Xalapa, Coatepec, Xico, Ayahualulco, Ixhuacán de los Reyes y Tlalnelhuayocan.

El clima es templado húmedo y semicálido húmedo, con una temperatura media anual de 5 a 20 °C (promedio de 14.3 °C) y una precipitación anual entre 511 y 1,830 mm (promedio de 1,316 mm) (INEGI, 2008). Los tipos de vegetación predominantes son bosque de pino, bosque de pino-encino, bosque mesófilo de montaña o bosque de niebla, pastizal inducido y cultivado. También existen cultivos de café, caña de azúcar, así como agricultura de temporal (Arriaga et al., 2002). Además, se han identificado bosques ribereños muy angostos (< 5 metros de ancho; Hernández-Dávila et al., 2020). En la zona, la deforestación ha ocurrido recientemente por el reemplazo de la vegetación y cafetales de sombra por cultivos de caña (Vidriales-Chan et al., 2012). Incluso áreas de potreros han sido reemplazadas por la expansión de caña.

Para identificar los sitios óptimos para restauración, se realizó un análisis multicriterio con el uso de sistemas

de información geográfica (ArcMap 10.3) (ESRI, 2014). Este análisis permite integrar opiniones y valorar criterios al ponderarlos (asignándoles un peso relativo) y generar mapas que contienen información espacialmente explícita que facilita la toma de decisiones en cuanto a la planeación y manejo de tierras. De esta manera, el primer paso fue seleccionar los criterios como se describe a continuación.

La identificación y priorización de criterios para la restauración, se realizó a partir de una revisión de literatura (Orsi y Geneletti, 2010; Orsi et al., 2011; Valente et al., 2021) y la consulta a un grupo de profesionales y académicos con conocimiento y experiencia en restauración ecológica y servicios ambientales de la zona de estudio. Se seleccionaron 16 criterios espaciales organizados en 9 grupos de factores relevantes para la evaluación que tuvieran atributos medibles para la toma de decisión. La tabla 1 describe los 16 criterios utilizados, los 9 grupos a los que pertenecen y las fuentes de donde se obtuvo la información digital. Dichos criterios representan información espacial georreferenciada y se recopilaron en formato vector y raster para su posterior procesamiento. La importancia de los criterios depende del tipo de evaluación (Ceballos-Silva y López-Blanco, 2003), por lo cual el orden se estableció asignando un peso relativo o valor de ponderación a cada criterio y a cada grupo de factores.

Para la fase de selección y asignación de prioridades (ponderación), se organizaron 3 sesiones de trabajo con

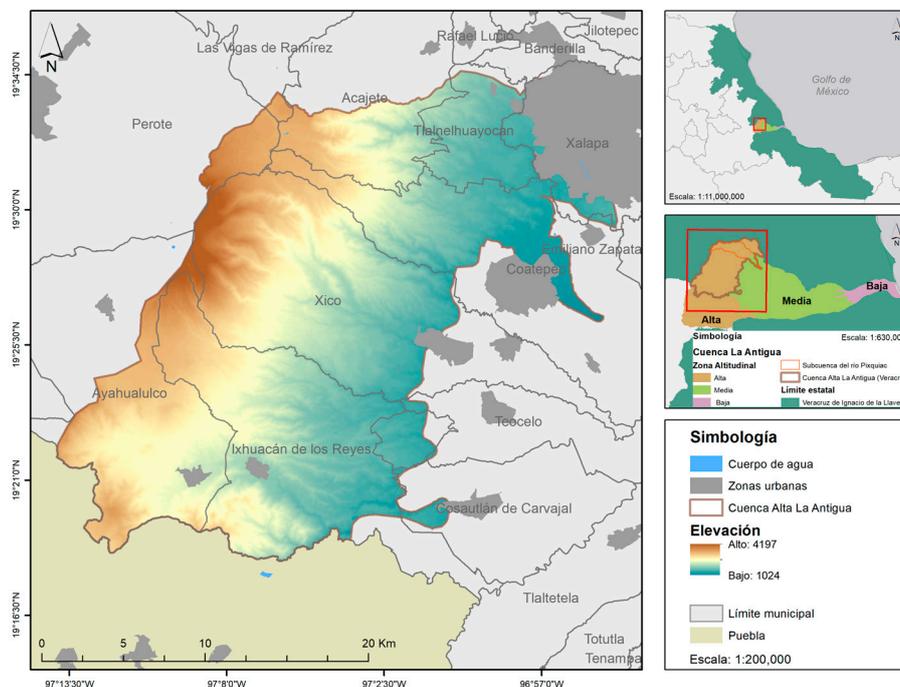


Figura 1. Ubicación geográfica de la zona alta de la cuenca del río La Antigua, Veracruz.

el grupo de expertos y se siguieron los pasos propuestos por López-Marrero et al. (2011): 1) se explicó a los participantes el objetivo de realizar el análisis multicriterio para identificar áreas prioritarias para la restauración de bosques ribereños en la zona alta de la cuenca del río La Antigua; 2) en la primera reunión, se pidió a los

participantes seleccionar los factores que consideraban importantes para ser incluidos en el análisis, esto a partir de una lista de variables definidas previamente con base en la literatura. También se les pidió agregar otras variables que consideraran relevantes que no estuvieran incluidas en la lista previa; 3) se mostró a los participantes la lista de

Tabla 1

Criterios utilizados para la evaluación multicriterio. Cada criterio se agrupa dentro de uno de 9 grupos identificados como relevantes para el análisis. Se incluye la unidad de medida y valor de ponderación para el grupo de factores y para cada criterio. Todos los criterios tienen representación espacial.

Grupo factor	Criterio	Unidad	Peso del grupo factor	Peso del criterio
Conservación biológica	Distancia a ANP federales y estatales ¹	metros	0.04	0.13
	Corredores bioclimáticos para la conservación de la biodiversidad (CBCB) ²	metros		0.87
Potencial Restauración	Distancia a áreas de vegetación natural ³	metros	0.04	1
Zonas ribereñas/ corredores hidrológicos	Distancia a ríos perennes ⁴	metros	0.28	0.9
	Distancia a ríos intermitentes ⁴	metros		0.1
Topografía	Pendiente ⁵	grado (°)	0.11	0.32
	Índice topográfico de humedad (ITH) ⁶			0.68
Clima	Precipitación ⁷	milímetros	0.02	1
Suelo	Erosión del suelo ⁸	Binario: 0 NA, ND 1 erosión hídrica	0.11	1
Perturbación	Distancia a áreas agropecuarias ³	Metros	0.08	0.1
	Cobertura y uso de suelo (CUS) ³	Categorico: 0 vegetación, suelo desnudo-urbano, agua; 1 caña, cítrico, maíz, mango, otros cultivos; 2 pastizal		0.9
Beneficiarios	Grado de marginación ⁹	Categorico: 1 muy baja marginación 2 baja marginación 3 media marginación 4 alta marginación	0.14	0.19
	Densidad de población ¹⁰	No. de habitantes/km ²		0.08
	Áreas elegibles para pago por servicios ambientales (AEPESA) ¹¹	Categorico: 0 nulo 1 (3b, 6) 2 (3a, 5) 3 (2, 4b) 4 (1, 4a)		0.73
Peligro de eventos naturales	Riesgo de incendios ¹²	Categorico: 0 nulo 1 bajo 2 medio 3 alto	0.18	0.5
	Deslizamientos (inestabilidad de laderas) ¹³	Categorico: 1 bajo 2 medio 3 alto 4 muy alto		0.5

Fuente: ¹ Conanp (2022), RANP (2017); ² Conabio, Conanp, PNUD (2019); ³ cobertura y uso de suelo 2019 (Bonilla-Moheno et al., 2021); ⁴ INEGI (2010); ⁵ creado a partir del modelo digital de elevación del INEGI (2013); ⁶ creado a partir de cálculos del modelo digital de elevación y la pendiente; ⁷ Cuervo-Robayo et al., 2013; ⁸ INEGI (2014); ⁹ Conapo (2020); ¹⁰ cálculo a partir del Censo de Población y Vivienda 2020 del INEGI; ¹¹ Conafor (2022); ¹² Conafor, Cenapred (2016); ¹³ Cenapred (2019).

variables elegidas para que las revisaran, y así, poder acordar la selección o eliminación de los criterios seleccionados; 4) en la segunda reunión se definieron los pesos relativos de cada factor. Para esto se utilizó el método de comparación por pares desarrollado por Saaty (1980) en el contexto del proceso analítico jerárquico (PAJ). Este método utiliza una matriz que incluye los factores listados tanto en las columnas como en las filas y consiste en comparar cada par de criterios (columna/ fila) y asignarles un valor de acuerdo con una escala continua de 9 puntos (fig. 2). El valor de la escala es seleccionado de acuerdo con la importancia relativa del criterio. De esta forma, con la participación colectiva, se llenó la matriz para determinar cuál de los 2 criterios era más importante para el objetivo establecido. El valor del criterio seleccionado por los participantes se anotó en la celda entrecruzada y se repitió el proceso para el resto de las combinaciones (pares) de criterios de la matriz de cada grupo de factores (tablas 2, 3). Si 2 criterios eran considerados igual de importantes se les asignó el valor de 1. Puesto que la matriz es simétrica, solo se llena la mitad triangular mientras que el resto de las celdas se llena con los valores recíprocos (Eastman, 2003). Para los grupos factor con un solo criterio, por ejemplo, potencial restauración (distancia a áreas de vegetación natural), clima (precipitación) y suelo (erosión del suelo), no fue necesario realizar una matriz de comparación por pares; 5) en la tercera reunión, se completó la ponderación de la matriz de los grupos factor. Se calcularon los pesos relativos de cada grupo factor. Para el proceso de la

combinación lineal ponderada, es necesario que todos los pesos sumen 1 (Eastman, 2003; Malczewski, 1999). Estos valores de ponderación sirvieron como proxy de la importancia relativa de cada factor; 6) en la última reunión, se revisaron los valores de ponderación entre los participantes para estar de acuerdo con los resultados; 7) después de la asignación de los pesos ponderados a los criterios y grupos de factores, se evaluó la precisión de la matriz para evitar juicios inconsistentes.

La consistencia de los valores establecidos en cada criterio se evaluó a través de un radio de consistencia, que se calcula a partir de 3 criterios por matriz e indica la probabilidad de que el valor de importancia haya sido elegido al azar. Valores de consistencia ≤ 0.10 son considerados aceptables (Gómez-Delgado y Barredo-Cano, 2006), pero si los valores del coeficiente son > 0.10 , es necesario revisar los valores asignados y reestructurar la matriz con el fin de tener coherencia entre las decisiones (Saaty, 1980). Saaty (1980) recomienda limitar el número de criterios a 9 o menos para mantener la consistencia en el PAJ. En este estudio se incluyeron 9 grupos factor, no obstante, los resultados mostraron una matriz consistente después de la segunda revisión y modificación de algunos valores originales de la matriz, por lo cual se aprobaron los pesos establecidos por los participantes. Para esta segunda revisión se utilizó la versión en línea de la herramienta para evaluación PAJ (Goepel, 2018), la cual permite resaltar los juicios (valoraciones) más inconsistentes de la matriz y mostrar los valores que más se ajustan a ella (al

Tabla 2
 Matriz de comparación por pares del grupo de factores.

Grupo factor	Conservación biológica	Potencial Restauración	Zonas ribereñas	Topografía	Clima	Suelo	Perturbación	Beneficiarios	Peligro de eventos naturales
Conservación biológica	1	1/5	1/3	4	1/5	1/3	1/3	1/3	
Potencial Restauración		1	1/3	3	1/5	1/5	1/3	1/3	
Zonas ribereñas			1	3	9	5	5	3	1
Topografía				1	5	1	3	1/3	1
Clima					1	1/5	1/7	1/3	1/7
Suelo						1	3	1/3	1/3
Perturbación							1	1	1/5
Beneficiarios								1	1
Peligro de eventos naturales									1

Radio de consistencia 0.0865.

Tabla 3

Matrices de comparación por pares de los criterios. Las comparación es entre criterios de un mismo grupo de factores. Los valores corresponden a los criterios en la columna del lado izquierdo en relación con los criterios en la columna de la derecha. Dos criterios considerados de igual importancia en cada matriz, se les asignó el valor de 1.

Criterios			
Conservación biológica	Distancia a ANP federales y estatales	Corredores bioclimáticos para la conservación de la biodiversidad	
Distancia a ANP federales y estatales	1	1/7	
Corredores bioclimáticos para la conservación de la biodiversidad		1	
Zonas ribereñas	Distancia a ríos perennes	Distancia a ríos intermitentes	
Distancia a ríos perennes	1	9	
Distancia a ríos intermitentes		1	
Topografía	Pendiente	Índice topográfico de humedad	
Pendiente	1	1/4	
Índice topográfico de humedad		1	
Perturbación	Distancia a áreas agropecuarias	Cobertura y uso de suelo	
Distancia a áreas agropecuarias	1	1/9	
Cobertura y uso de suelo		1	
Beneficiarios	Grado de marginación	Densidad de población	Áreas elegibles para pago por servicios ambientales
Grado de marginación	1	3	1/5
Densidad de población		1	1/7
Áreas elegibles para pago por servicios ambientales			1
Peligro de eventos naturales	Riesgo de incendios	Deslizamientos (inestabilidad de laderas)	
Riesgo de incendios	1	1	
Deslizamientos (inestabilidad de laderas)		1	

Radio de consistencia para beneficiarios 0.0492.

sumar o restar 1, 2, o más puntos a la escala) para mejorar la consistencia.

Además de incluir criterios de factor (criterios que influyen en el objetivo) para el análisis, se consideraron los criterios de restricción, los cuales permiten excluir aquellas áreas no adecuadas para el objetivo planteado (Eastman, 2003). Para este estudio, las restricciones fueron las áreas urbanas, los cuerpos de agua y las áreas con vegetación natural. Estas capas se procesaron como mapas booleanos, es decir con valores de 0 y 1 (fig. 3). Aquellas áreas con valor 0 son excluidas del análisis mientras que las que tienen valor 1 se incluyen.

Con el fin de homologar la información espacial, se generaron capas en formato raster para cada criterio que se traslaparon con la misma dimensión y extensión espacial que la capa de pendiente. El tamaño de pixel fue de 30 m y se empleó la misma proyección geográfica (WGS84 UTM Z14N) y el mismo número de filas y columnas. Para algunos criterios (ej., erosión del suelo, grado de marginación, riesgo de incendios) fue necesario convertir las capas de vector a raster. Los criterios con atributos no numéricos (valores categóricos) como cobertura y uso de suelo, grado de marginación, áreas elegibles para pago por servicios ambientales, riesgo de incendios y deslizamientos

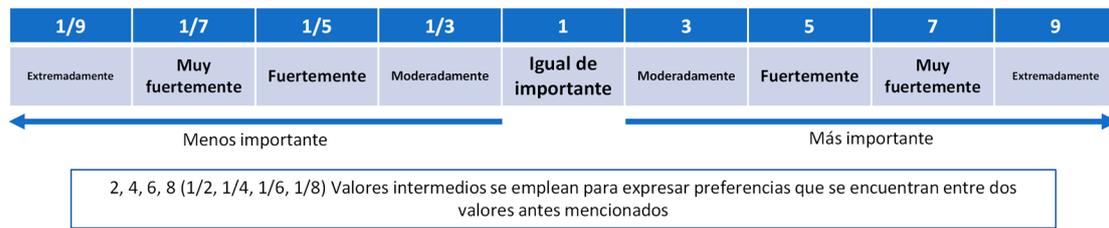


Figura 2. Escala para determinar la importancia relativa del proceso analítico jerárquico.

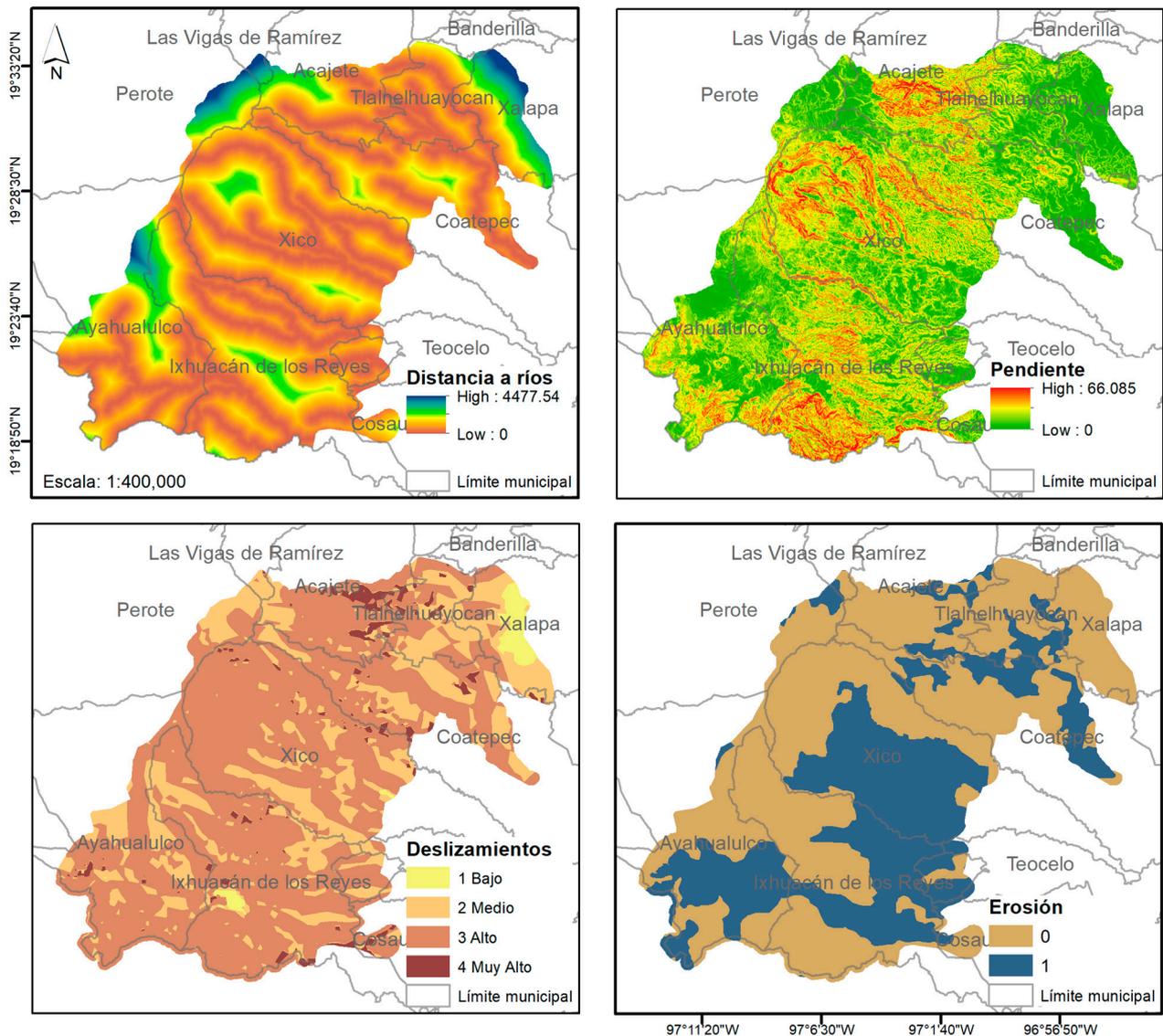


Figura 3. Representación espacial de las capas raster continuas, categóricas y booleanas.

fueron reclasificados a valores ordinales. Mientras que el criterio erosión del suelo se clasificó como binario (i.e., 0 = no deseable, 1 = deseable). Para los criterios de distancia (ej. distancia a áreas naturales protegidas, a áreas de vegetación natural, a ríos perennes e intermitentes y a zonas agropecuarias) se realizó un cálculo de la distancia euclidiana utilizando ArcMap 10.3 (fig. 3).

Del modelo digital de elevación se calcularon atributos del terreno como la pendiente y el índice topográfico de humedad procesados en ArcMap 10.3. Para el cálculo del índice topográfico de humedad (ITH), el cual está relacionado con la concentración de humedad del suelo y el agua que se puede acumular en una celda, se utilizó la siguiente fórmula (Beven y Kirkby, 1979): no se tecleó como texto, se insertó como ecuación y se configura como imagen, si no queda bien en el texto final se solicitará “teclear elementos”

$$TWI_i = Ln \left[\frac{As_i}{Tan\beta_i} \right]$$

donde As_i = área de acumulación de agua en la celda; β_i = pendiente en la celda. El índice se obtiene a partir de la información generada del raster de acumulación de flujo de agua y la pendiente. Este índice nos permite identificar los sitios potenciales donde se concentra la humedad, las zonas de acumulación de agua o las áreas potenciales inundables. El proceso para obtener el ITH se puede consultar en Gis y Beers (2016). El proceso completo de evaluación multicriterio, así como los criterios utilizados para el análisis, se muestran en la figura 4.

Para que los valores originales de los criterios puedan ser comparables entre ellos, se deben estandarizar (Malczewski, 1999). Los raster de los criterios se reclasificaron en una escala de 5 clases (1-5); el valor de 5 se asignó a las áreas más deseables, es decir, a las que tienen mayor concordancia con el objetivo de análisis, mientras que el valor 1, a los rangos menos deseables. En algunos casos el valor 1 representó las áreas de restricción que se excluyeron del análisis (apéndice 1). Por ejemplo, distancia a áreas de vegetación natural (< 50 m), pendiente (> 45°), erosión (áreas sin erosión con valor = 0) y cobertura y uso de suelo (áreas de vegetación natural, cuerpos de agua, suelo desnudo/ áreas urbanas). En el apéndice 2 se describe la prioridad asignada a cada criterio. La reclasificación de rasters se llevó a cabo con la herramienta “Reclassify” de acuerdo con el método de clasificación “natural breaks” en Arcmap 10.3.

Para establecer los pesos de los factores/criterios (ponderación) de cada uno con respecto a los demás, se consideró su contribución al objetivo principal del proyecto; es decir, aquellos criterios indispensables o con

mayor influencia para la selección de áreas óptimas de restauración en zonas ribereñas tuvieron un mayor peso. En este caso, los grupos “zonas ribereñas/corredores hidrológicos”, seguido por “peligro de eventos naturales” y “beneficiarios” tuvieron los pesos más altos. Los valores de ponderación se tomaron de los resultados de la matriz de comparación creada a partir de la opinión del grupo de expertos (tabla 1).

Una vez que los criterios fueron estandarizados y asignados los pesos relativos a cada uno, éstos se agregaron a escala de pixel. La agregación de los criterios se realizó por medio de una combinación lineal ponderada, con la cual se obtiene el valor final de cada píxel como producto de la sumatoria de los valores estandarizados de cada criterio por el peso asignado, de esta forma, se multiplican los valores de cada píxel de los criterios estandarizados por sus respectivos pesos y después son agregados mediante una sumatoria para obtener un mapa resultante:

$$S = \sum W_i X_i$$

donde S = idoneidad, w_i = peso del factor i normalizado y x_i = puntaje del factor i estandarizado (Drobne y Lisec, 2009).

Con el fin de contar con un solo mapa por grupo, la sumatoria ponderada se realizó para los criterios de cada grupo factor, con excepción del clima y suelo que cuentan con un solo criterio cada uno. Posteriormente, los 9 mapas resultantes se multiplicaron por su peso asignado del grupo factor y se sumaron para tener un solo mapa que muestra las áreas idóneas para la restauración. Para la agregación y selección de clases con alguna restricción, se utilizó la herramienta “weighted overlay” en Arcmap 10.3, para la cual los pesos relativos tienen que estar representados en porcentajes que sumen 100. Posteriormente se creó el mapa de priorización.

El mapa resultante de las áreas potenciales para restauración muestra los valores de prioridad de cada sitio (píxel) en un rango del 0 al 8, donde las áreas óptimas de restauración fueron las que tuvieron los valores más altos (i.e., cercano a 8). Para facilitar la representación visual del mapa, se utilizó el método de clasificación “natural breaks” (Etter et al., 2020) y se reclasificaron en 4 clases de prioridad: alta (7-8), media (6), baja (4-5) y nula (0). Los sitios con valor 0 no son prioritarios debido a que representan áreas con criterios de restricción. Siguiendo los pasos de Uribe et al. (2014), se verificó que las áreas con alguna prioridad no estuvieran dentro de sitios con restricción y si éste era el caso, se reemplazaron a categoría nula.

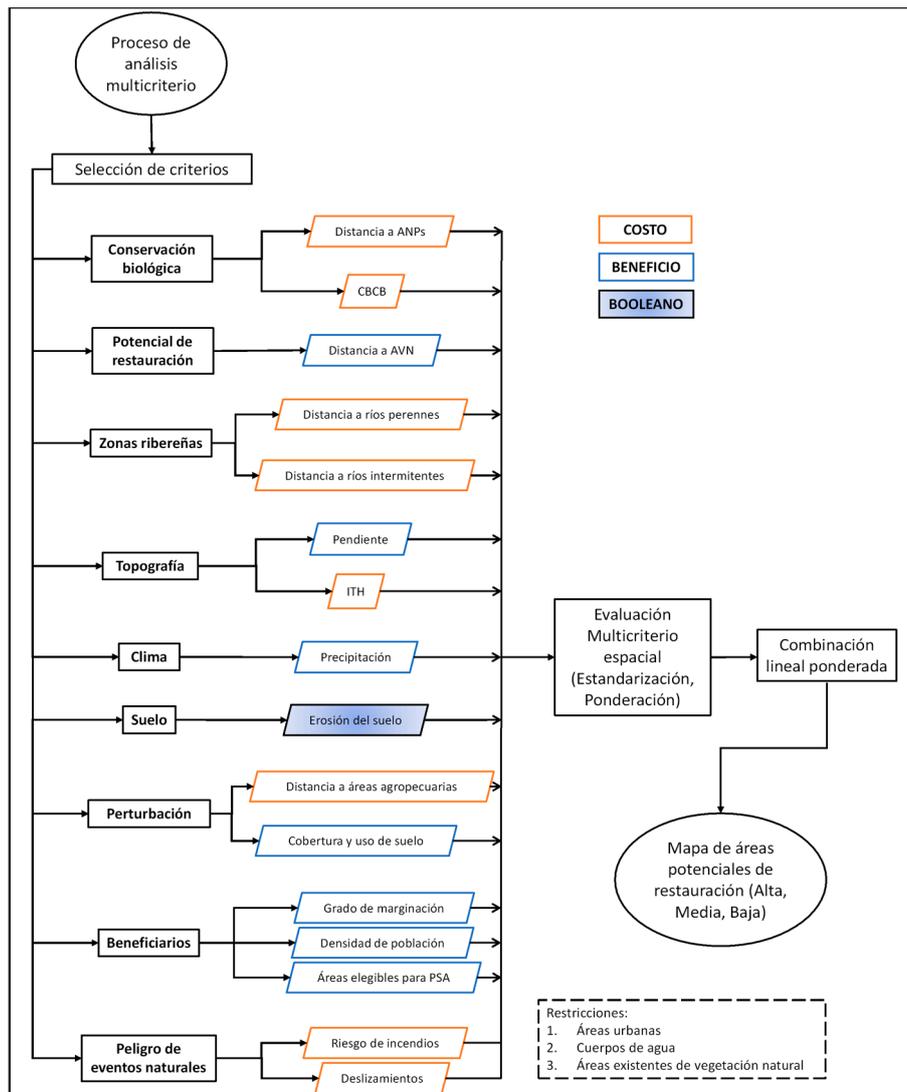


Figura 4. Esquema del proceso de evaluación multicriterio. ANP = Áreas naturales protegidas federales y estatales; AVN = áreas de vegetación natural; CBCB = corredores bioclimáticos para la conservación de la biodiversidad; ITH = índice topográfico de humedad; PSA = pago por servicios ambientales. Los factores beneficio contribuyen positivamente al mapa de salida y consideran sitios óptimos aquellos con los valores más altos del raster, mientras que los factores costo contribuyen negativamente y consideran los valores más bajos como los preferibles para la selección de áreas.

Resultados

El mapa de áreas prioritarias para la restauración se muestra en la figura 5. Las áreas con alguna prioridad se distribuyen en toda la zona alta de la cuenca. Las áreas con mayor superficie de prioridad alta se distribuyen al sur y centro de la zona alta de la cuenca, principalmente en áreas cercanas a ríos, con pendientes ligeras a medianamente inclinadas (promedio de 13°), entre 1,098 y 2,974 m, con precipitaciones promedio de 1,373 mm, en su mayoría

en zonas de potreros, con riesgo de incendio de nulo a bajo, y con riesgo alto de deslizamientos. Las áreas con mayor superficie de prioridad media se distribuyen al sur y centro de la cuenca a una distancia intermedia de los ríos, con pendientes ligeramente inclinadas (promedio de 10°), entre 1,098 y 3,008 m, con precipitaciones promedio de 1,261 mm, en su mayoría en zonas de potreros y al sur en zonas de cultivos, con riesgo de incendio bajo, y con riesgo alto de deslizamientos. Las áreas de prioridad baja se distribuyen en zonas alejadas de ríos, con pendientes

ligeramente inclinadas (promedio de 8°), en elevaciones entre 1,213 y 3,228 m, con precipitaciones promedio de 1,112 mm, en su mayoría en zonas de potreros, con riesgo de incendio medio y con riesgo alto de deslizamientos.

La mayoría de las áreas con alguna categoría de prioridad (alta, media y baja) se distribuyen en zonas con alto riesgo de deslizamientos y fuera de los corredores bioclimáticos y en áreas no elegibles para pago por servicios ambientales. Los grupos zonas ribereñas, topografía, suelo y peligro de eventos naturales fueron los que tuvieron mayor influencia en el mapa de áreas prioritarias.

La superficie cubierta por cada una de las categorías de prioridad se muestra en la tabla 4. La mayor área (84.9%) se clasificó en la categoría de restricción (prioridad nula); en la superficie restante se distribuyen las categorías con alguna prioridad (15.1%, 8,507.1 ha). Si se considera únicamente esta área, la prioridad alta y la media cubren poco más de 91% (alta 45.10%, media 45.93% y baja 8.97%).

La distribución de las categorías de prioridad es variada por municipio; no obstante, en los municipios de Acajetec, Cosautlán de Carvajal, Ixhuacán de los Reyes y Tlalnahuayocan predomina la prioridad alta. Los municipios de Xico y Ayahualulco tuvieron mayor superficie en alguna categoría de prioridad. Ésto se debe, en parte, a que son los municipios con mayor superficie en la cuenca. Las

Tabla 4

Superficie (ha) y porcentaje ocupado por las distintas categorías de prioridad en la zona alta de la cuenca de La Antigua, Veracruz.

Prioridad	Área (ha)	Área (%)
Alta	3,836.48	6.82
Media	3,907.21	6.94
Baja	763.45	1.36
Nula	47,786.68	84.89
Total	56,293.81	100

áreas de prioridad media con mayor superficie dentro de cada municipio se encuentran en Ayahualulco, Coatepec, Teocelo, Xalapa y Xico. Las Vigas de Ramírez y Perote presentaron como única categoría de prioridad la baja, mientras que Cosautlán de Carvajal es el único municipio que no presenta categoría de prioridad baja (apéndice 3).

Discusión

Los bosques ribereños requieren atención primordial ya que tienen funciones de gran importancia en los ecosistemas forestales (Naiman et al., 1998; Sweeney

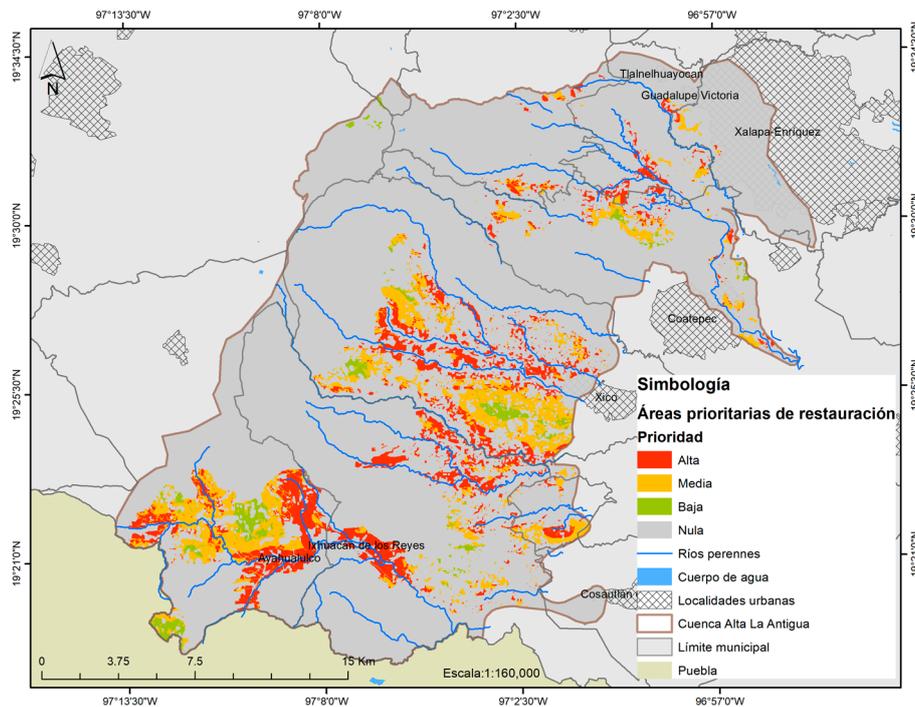


Figura 5. Áreas prioritarias para la restauración en la zona alta de la cuenca de La Antigua, Veracruz, México. Se muestran en distintos colores el nivel de prioridad (rojo = alta; naranja = media; verde = baja). Las áreas en gris son aquellas que, con base en los parámetros evaluados, el análisis no identificó como importantes.

et al., 2004). Las actividades agropecuarias con prácticas de manejo inadecuadas han contribuido a eliminar parte de la cobertura forestal que se encuentra a la orilla de ríos, ocasionando degradación de los suelos y cambios drásticos en la hidrología de las cuencas que puede impactar severamente a la provisión de agua. Tan solo en la subcuenca del Pixquiac, la actividad agrícola ha generado un mayor número de impactos ambientales irreversibles producto del uso de agroquímicos, de los cultivos no propios de la región y por la falta de rotación de tierras para la siembra (Menchaca-Dávila y Alvarado-Michi, 2011). Además, las descargas de aguas residuales por actividades domésticas e industriales, la contaminación por excremento de ganado y el aumento del uso de agroquímicos por la expansión del cultivo de papa, han degradado el recurso hídrico y el estado de la subcuenca (Menchaca-Dávila y Alvarado-Michi, 2011; Paré y Gerez, 2012). Dada la importancia de la recuperación de estos sistemas, este estudio enfatiza la identificación de las zonas ribereñas que necesitan ser restauradas con más urgencia, lo cual puede favorecer una planificación más eficaz.

El proceso de análisis multicriterio permitió integrar información espacial y la opinión de expertos acerca de los criterios de decisión relevantes para la recuperación de la estructura y funciones de los bosques ribereños tropicales. Esta integración facilita el uso de datos espaciales (generalmente heterogéneos) que son muy útiles en la planeación de acciones para la restauración. Entre los factores más relevantes para identificar las áreas prioritarias se consideraron la cercanía a las zonas ribereñas, la cobertura y uso de suelo, áreas elegibles para pago por servicios ambientales, el índice topográfico de humedad, la pendiente, el nivel de erosión de suelo, el riesgo de incendios y de deslizamientos. Como resultado de la asignación de un mayor peso a estos factores, las áreas con categoría de prioridad alta y media se distribuyen en pendientes ligeras a medianamente inclinadas, cerca de ríos y en zonas que presentan nulo o bajo riesgo de incendios. Las zonas prioritarias también se localizan principalmente en áreas susceptibles a deslizamientos, que cubren la mayor parte de la zona alta de la cuenca (95.6% del área total).

La recuperación de la vegetación en las áreas identificadas de mayor prioridad podría contribuir a reducir la erosión del suelo y deslave en el margen del cauce y zonas adyacentes, a la par de contribuir a la provisión y calidad del agua en la cuenca (Antonini et al., 2022; Naiman et al., 1998). La exclusión del ganado y la siembra de especies de árboles y arbustos nativos para acelerar el proceso de recuperación pueden ser estrategias adecuadas si las condiciones del sitio y el paisaje lo favorecen (Inhamuns et al., 2021; Trujillo-Miranda et al. 2018). Por lo tanto, para determinar las técnicas que deben ser prescritas se

requieren diagnósticos de las condiciones específicas del sitio. Al respecto, se han publicado guías prácticas que pueden ser de utilidad en estos esfuerzos (Ramírez-Soto et al., 2021). Un paso clave para complementar este estudio es realizar visitas a algunos de los sitios identificados de mayor prioridad para verificar la disponibilidad de los terrenos. Es esencial considerar que la decisión para realizar intervenciones de restauración depende de las y los propietarios de la tierra y su decisión puede ser afectada por múltiples factores (Ahimbisibwe et al., 2019). Además, para que la restauración sea más atractiva para los locales es necesario brindar información y asistencia técnica sobre las especies aptas y sus requerimientos para establecerse e involucrar a las comunidades rurales, idealmente desde el inicio de la planeación de los proyectos de restauración (Lamb et al., 2005; Meli et al., 2019).

El análisis de priorización realizado para la restauración de bosques de montaña tropicales con énfasis en zonas ribereñas ofrece un marco y herramientas valiosas para la toma de decisiones y la asignación de recursos, así como para los productores y organizaciones locales que buscan aplicar acciones de restauración en aquellos sitios más aptos. Las intervenciones deben ser planificadas a partir de la condición de cada sitio, así como de la meta o del objetivo que se quiera alcanzar; por ejemplo, la exclusión del ganado para promover la regeneración natural, así como técnicas para estabilizar la erosión de los márgenes del río, junto con la plantación de plantas leñosas ribereñas (Ramírez-Soto et al., 2021; Wilson et al., 2022). Considerar factores ecológicos, socioeconómicos y climáticos permite identificar los lugares prioritarios en los que los esfuerzos de restauración pueden tener un impacto más significativo. Sin embargo, es crucial reconocer las limitaciones y retos inherentes al proceso y adaptar continuamente el análisis en función de los nuevos conocimientos e información disponible. En última instancia, el éxito de la restauración de los bosques de montaña tropicales requiere un enfoque integral, que considere el conocimiento científico y tradicional, así como la participación de las partes interesadas y comunidades locales desde la planificación de los proyectos.

Agradecimientos

El estudio formó parte del proyecto “Safeguarding Threatened Tropical Montane Cloud Forest Oaks in Mesoamerica” financiado por la Fundación Franklinia y The Morton Arboretum. Agradecemos a Silvia Álvarez-Clare por su apoyo para desarrollar el proyecto. A Ma. Luisa León Mateos, Georgina Vidriales Chan y Siunelly Landero Lozada por su participación en las sesiones de trabajo para la selección y ponderación de criterios.

Apéndice 1. Escala de cada criterio estandarizado.

Grupo factor	Criterio	Escala	1	2	3	4	5
CB	Distancia ANP	11,936.61 - 16,671.15	8,490.85 - 11,936.61	5,245.11 - 8,490.85	2,082.14 - 5,245.11	0 - 2,082.14	
	CBCB	> 199	142 - 199	80 - 142	23 - 80	- 1 - 23	
PR	Distancia AVN	0 - 50 ^R	50 - 218.40	218.40 - 458.91	458.91 - 863.77	863.77 - 1,597.06	
ZR	Distancia ríos p	2,599.46 - 4,477.54	1,630.25 - 2,599.46	973.50 - 1,630.25	451 - 973.50	0 - 451	
	Distancia ríos i	1,103.90 - 2,365.63	582.49 - 1,103.90	313.21 - 582.49	134.16 - 313.21	0 - 134.16	
T	Pendiente	45 - 66.08 ^R	0 - 8.29	8.29 - 16.85	16.85 - 25.66	25.66 - 45	
	ITH	12.32 - 21.97	9.08 - 12.32	6.90 - 9.08	5.31 - 6.90	2.75 - 5.31	
CL	Precipitación	510.95 - 830.25	830.25 - 1,140.58	1,140.58 - 1,454.58	1,454.58 - 1,661.03	1,661.03 - 1,830.40	
S	Erosión del suelo	0 ^R				1	
P	Distancia aap	713.09 - 1,482.19	394.59 - 713.09	201.25 - 394.59	67.08 - 201.25	0 - 67.08	
	CUS	0 ^R			1	2	
B	Marginación		1	2	3	4	
	Densidad de pob	76.43 - 100.12	100.12 - 158.22	158.22 - 280.47	280.47 - 1,321.11	1,321.11 - 3,943.76	
PEN	AEPSA	0	1	2	3	4	
	Incendios		3	2	1	0	
	Deslizamientos		4	3	2	1	

Grupo factor: CB (conservación biológica), PR (potencial restauración), ZR (zonas ribereñas/corredores hidrológicos), T (topografía), CL (clima), S (suelo), P (perturbación), B (beneficiarios), PEN (peligro de eventos naturales). Criterios: distancia ANP (distancia a áreas naturales protegidas federales y estatales), CBCB (corredores bioclimáticos para la conservación de la biodiversidad), distancia AVN (distancia a áreas de vegetación natural), distancia a ríos p (distancia a ríos perennes), distancia a ríos i (distancia a ríos intermitentes), ITH (índice topográfico de humedad), distancia aap (distancia a áreas agropecuarias), CUS (cobertura y uso de suelo), marginación (grado de marginación), densidad de pob (densidad de población), AEPSA (áreas elegibles para pago por servicios ambientales), incendios (riesgo de incendios), deslizamientos (inestabilidad de laderas). Los criterios categóricos representan los siguientes datos: cobertura y uso de suelo 0 (vegetación, suelo desnudo-urbano, agua), 1 (caña, cítrico, maíz, mango, otros cultivos), 2 (pastizal); grado de marginación 1 (muy baja marginación), 2 (baja marginación), 3 (media marginación), 4 (alta marginación); áreas elegibles para pago por servicios ambientales 0 (nulo), 1 (3b, 6), 2 (3a, 5), 3 (2, 4b), 4 (1, 4a); riesgo de incendios 0 (nulo), 1 (bajo), 2 (medio), 3 (alto); deslizamientos (inestabilidad de laderas) 1 (bajo), 2 (medio), 3 (alto), 4 (muy alto). R = Restricción.

Apéndice 2. Prioridad seleccionada para cada criterio.

- Distancia a áreas naturales protegidas (ANP) federales y estatales: la prioridad se otorgó a los sitios más cercanos a las áreas protegidas ya que contribuirían al área de amortiguamiento de las ANP.
- Corredores bioclimáticos para la conservación de la biodiversidad (CBCB): la prioridad fueron las zonas que favorecen la conectividad de áreas con cobertura de bosque.
- Distancia a áreas de vegetación natural: la prioridad fue para las zonas más lejanas a la vegetación natural ya que debido a su lejanía su potencial de regeneración natural es bajo y por lo tanto las intervenciones son más necesarias (Holl, 1999). Además, se excluyen áreas < 50 m de distancia a alguna área de vegetación natural, donde la restauración puede ocurrir naturalmente (Muñiz-Castro et al., 2006).
- Distancia a ríos: considerado el criterio más importante para este estudio, se le dio prioridad a la cercanía a ríos perennes e intermitentes.
- Pendientes: se priorizan las zonas con mayor grado de inclinación del terreno, ya que este tipo de terrenos son más susceptibles a sufrir erosión por escorrentía. Se excluyeron sitios con pendientes > 45°.
- Índice topográfico de humedad (ITH): las áreas donde se concentran la menor humedad y escurrimiento superficial se seleccionaron como prioritarias ya que tienen menor potencial para acumular agua y son menos susceptibles a inundación.
- Clima: las áreas con mayor precipitación fueron preferibles para la restauración.
- Suelo: las áreas con erosión (mayormente leve) fueron elegibles para la restauración ya que requieren de intervención.
- Distancia a áreas agropecuarias: se consideró que las áreas más cercanas a áreas agropecuarias tuvieran mayor valor ya que estas zonas requieren mayor intervención.
- Cobertura y uso de suelo: se restringen las áreas con vegetación natural, y la categoría suelo desnudo/áreas urbanas al ser sitios que no serán seleccionados para restauración. En su lugar, se priorizan las áreas desprovistas de cobertura forestal como cultivos y pastizales.
- Grado de marginación: los municipios con alto grado de marginación fueron prioritarios para la selección de sitios a restaurar ya que están vinculados a mayor vulnerabilidad.
- Densidad de población: los municipios con mayor densidad de población (Num. hab/ km²) fueron prioritarios al tener mayor demanda de los recursos naturales.
- Áreas elegibles para pago por servicios ambientales: se dio prioridad a las zonas de acuerdo con el área de pago diferenciado tanto por servicio ambiental hidrológico como por conservación de la biodiversidad. Es decir, las áreas de mayor importancia serían aquellas que recibirían mayor ingreso monetario por hectárea por año.
- Riesgo de incendios: se priorizaron los sitios con bajo riesgo de incendios para asegurar el éxito de la restauración.
- Deslizamientos: los sitios con bajo peligro por inestabilidad de laderas fueron los prioritarios para evitar riesgos en plantaciones.

Apéndice 3. Superficie (ha) de área prioritaria y nula para cada municipio de la zona de estudio. El total de las 4 categorías de prioridad representan la superficie total de cada municipio.

Municipios	Alta	Media	Baja	Nula
	Área (ha)	Área (ha)	Área (ha)	Área (ha)
Acajete	90.51	59.67	0.02	3,849.38
Ayahualulco	1,194.57	1,430.34	342.27	6,423.05
Coatepec	196.46	356.67	58.88	6,356.77
Cosautlán de Carvajal	0.78	0.43	0	353.45
Ixhuacán de los Reyes	956.57	382.00	51.97	11,919.89
Las Vigas de Ramírez	0	0	6.56	169.88
Perote	0	0	24.81	1,281.18
Teocelo	2.11	32.11	0.13	81.58
Tlalnahuayocan	174.76	67.70	1.18	3,147.95
Xalapa	12.82	41.81	0.62	2,755.65
Xico	1,207.89	1,536.47	277.01	11,447.74

Referencias

- Ahimbisibwe, V., Auch, E., Groeneveld, J., Tumwebaze, S. B. y Berger, U. (2019). Drivers of household decision-making on land-use transformation: An example of woodlot establishment in Masindi District, Uganda. *Forests*, 10, 619. <https://doi.org/10.3390/f10080619>
- Antonini, Y., Beirão, M. V., Costa, F. V., Azevedo, C. S., Wojakowski, M. M., Kozovits, A. R. et al. (2022). Riparian forest restoration as sources of biodiversity and ecosystem functions in anthropogenic landscapes. *bioRxiv*, 2021.09.08.459375, ver. 3 peer-reviewed. Open access preprint repository. <https://doi.org/10.1101/2021.09.08.459375>
- Arriaga, L., Aguilar, V. y Alcocer, J. (2002). *Aguas continentales y diversidad biológica de México*. Regiones hidrológicas prioritarias: 77. Río La Antigua. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México D.F. Recuperado el 28 noviembre, 2022 de: http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/regionalizacion/doctos/rhp_077.html
- Beven, K. J. y Kirkby, M. J. (1979). A physically based, variable contributing area model of basin hydrology/Un modèle à base physique de zone d'appel variable de l'hydrologie du bassin versant. *Hydrological Sciences Journal*, 24, 43–69. <https://doi.org/10.1080/02626667909491834>
- Bonilla-Moheno, M., Morteo-Montiel, S. y Campos-García, L. M. (2021). *Información espacial de cultivos del Estado de Veracruz*. Informe final. Integralidad Gamma. Xalapa: Instituto de Ecología, A.C.
- Ceballos-Silva, A. y López-Blanco, J. (2003). Delineation of suitable areas for crops using a Multi-Criteria Evaluation approach and land use/cover mapping: a case study in Central Mexico. *Agricultural Systems*, 77, 117–136. [https://doi.org/10.1016/S0308-521X\(02\)00103-8](https://doi.org/10.1016/S0308-521X(02)00103-8)
- Cenapred (Centro Nacional de Prevención de Desastres). (2019). *Sistema nacional de información sobre riesgos*. Veracruz-Agentes perturbadores-Geológico-Deslizamiento. Recuperado el 30 septiembre, 2022 de: <http://www.atlasmnacionalderiesgos.gob.mx/portal/fenomenos/>
- Cenapred (Centro Nacional de Prevención de Desastres), Conafor (Comisión Nacional Forestal). (2016). *Sistema nacional de información sobre riesgos*. Nacional-Químico/Tecnológicos-Riesgo por incendios forestales. Recuperado el 30 septiembre, 2022 de: <http://www.atlasmnacionalderiesgos.gob.mx/portal/fenomenos/>
- Christmann, T. y Menor, I. O. (2021). A synthesis and future research directions for tropical mountain ecosystem restoration. *Scientific Reports*, 11, 23948.
- Conafor (Comisión Nacional Forestal). (2017). *Inventario Nacional Forestal y de Suelos Informe de Resultados 2009-2014*. Jalisco, México. Recuperado el 29 agosto, 2023 de: <https://snigf.cnf.gob.mx/wp-content/uploads/Resultados%20Hist%C3%B3ricos%20INFyS/2009%20-%202014/Informe%20de%20resultados/Informe%20inventario%202009%20-%202014.pdf>
- Conafor (Comisión Nacional Forestal). (2022). Área elegible 2022-Nacional, Componente IV. Servicios Ambientales (SA), Concepto SA.1. Pago por Servicios Ambientales. Infraestructura de Datos Espaciales Forestales (IDEFOR). Recuperado el 25 septiembre, 2022 de: https://idefor.cnf.gob.mx/mviewer/AE_2022
- Conabio (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad). (2004). Regiones Terrestres Prioritarias. Recuperado el 14 septiembre, 2022 de: http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/?vns=gis_root/region/biotic/spt1mgw
- Conabio (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad). (2010). *El bosque mesófilo de montaña en México: amenazas y oportunidades para su conservación y manejo sostenible*. México D.F.
- Conabio (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad), Conanp (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas), Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). (2019). *Corredores bioclimáticos para la conservación de la biodiversidad*. Recuperado el 14 septiembre, 2022 de: <http://geoportal.conabio.gob.mx/metadatos/doc/html/clccrecgw.html>
- Conanp (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas). (2022). Áreas Naturales Protegidas. Formato vector. Recuperado el 19 septiembre, 2022 de: http://sig.conanp.gob.mx/website/pagsig/info_shape.htm
- Conapo (Consejo Nacional de Población). (2020). Índice de marginación por municipio, 2020. Base de datos por municipio 2020. Recuperado el 30 de septiembre de 2022 de: <https://www.gob.mx/conapo/documentos/indices-de-marginacion-2020-284372>
- Cuervo-Robayo, A. P., Téllez-Valdés, O., Gómez-Albores, M. A., Venegas-Barrera, C. S., Manjarrez, J. y Martínez-Meyer, E. (2013). An update of high-resolution monthly climate surfaces for Mexico. *International Journal of Climatology*, 34, 2427–2437. <https://doi.org/10.1002/joc.3848>
- Drobne, S. y Liseč, A. (2009). Multi-attribute decision analysis in GIS: weighted linear combination and ordered weighted averaging. *Informatica*, 33, 459–474.
- Eastman, J. R. (2003). *IDRISI Kilimanjaro: guide to GIS and image processing*. Worcester, Massachusetts: Clark Labs, Clark University.
- ESRI. (2014). ArcMap (Version 10.3). Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute. www.esri.com
- Etter, A., Andrade, A., Nelson, C. R., Cortés, J. y Saavedra, K. (2020). Assessing restoration priorities for high-risk ecosystems: an application of the IUCN red list of ecosystems. *Land Use Policy*, 99, 104874. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104874>
- GIS y Beers. (2016). Cálculo del índice Topográfico de Humedad TWI. Recuperado el 18 octubre, 2022 de: <http://www.gisandbeers.com/calculo-del-indice-topografico-de-humedad-twi/>
- Gobierno del Estado de Veracruz. (2018). Ordenamiento ecológico territorial de la región Capital de Xalapa. Resumen Ejecutivo. Xalapa: SEDEMA, USPAE-INECOL, Semarnat. Recuperado el 25 septiembre, 2022 de: <http://repositorio.gob.mx/>

- veracruz.gob.mx/medioambiente/wp-content/uploads/sites/9/2022/11/POERCX_Resumen-Ejecutivo_FINAL.pdf
- Goepel, K. D. (2018). Implementation of an Online Software Tool for the Analytic Hierarchy Process (AHP-OS). *International Journal of the Analytic Hierarchy Process*, 10, 469–487. <https://doi.org/10.13033/ijahp.v10i3.590>
- Gómez-Delgado, M. y Barredo-Cano, J. I. (2006). *Sistemas de Información geográfica y evaluación multicriterio, en la ordenación del territorio, 2a Ed.* Madrid: RA-MA.
- Hernández-Dávila, O., Laborde, J., Sosa, V. J., Gallardo-Hernández, C. y Díaz-Castelazo, C. (2020). Forested riparian belts as reservoirs of plant species in fragmented landscapes of tropical mountain cloud forest. *Botanical Sciences*, 98, 288–304. <https://doi.org/10.17129/BOTSCI.2497>
- Holl, K. D. (1999). Factors limiting Tropical Rain Forest regeneration in abandoned pasture: seed rain, seed germination, microclimate, and soil. *Biotropica*, 31(2), 229–242. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7429.1999.tb00135.x>
- Inhamuns, M. C., de Souza Rezende, R. y Coelho, G. C. (2021). Restoring riparian forest in the Atlantic Forest: Does planting seedlings make a difference? *Restoration Ecology*, 29, 1–9. <https://doi.org/10.1111/rec.13356>
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2008). Conjunto de datos vectoriales escala 1:1 000 000. Unidades climáticas. Formato vector. Recuperado el 25 septiembre, 2022 de: <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825267568>
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2010). Red hidrográfica escala 1:50 000. Edición 2.0. Subcuenca hidrográfica RH28Bf R. Decozalapa. Cuenca R. Jamapa y Otros. RH Papaloapan. Formato vector. Recuperado el 25 septiembre, 2022 de: <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463130130>
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2013). Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM). Formato raster (bil). Recuperado el 25 septiembre, 2022 de: <https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/>
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2014). Conjunto de datos de erosión del suelo, Escala 1: 250 000 Serie I Continuo Nacional. Formato vector. Recuperado el 25 septiembre, 2022 de: <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825004223>
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2020). Censo de población y vivienda 2020. Recuperado el 25 septiembre, 2022 de: <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/#Tabulados>
- Lamb, D., Erskine, P. D. y Parrotta, J. A. (2005). Restoration of degraded tropical forest landscapes. *Science*, 310, 1628–1632. <https://doi.org/10.1126/science.1111773>
- Lees, A. C. y Peres, C. A. (2008). Conservation value of remnant riparian forest corridors of varying quality for Amazonian birds and mammals. *Conservation Biology*, 22, 439–449. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2007.00870.x>
- López-Marrero, T., González-Toro, A., Heartsill-Scalley, T. y Hermansen-Báez, L. A. (2011). *Evaluación multicriterio y sistemas de información geográfica para la planificación y la toma de decisiones acerca del uso de terrenos*. Gainesville: USDA Forest Service, Southern Research Station.
- Malczewski, J. (1999). *GIS and multicriteria decision analysis*. New York: John Wiley & Sons.
- Mata-Guel, E. O., Soh, M. C., Butler, C. W., Morris, R. J., Razgour, O. y Peh, K. S. H. (2023). Impacts of anthropogenic climate change on tropical montane forests: an appraisal of the evidence. *Biological Reviews*, 98, 1200–1224. <https://doi.org/10.1111/brv.12950>
- Meli, P., Ruiz, L., Aguilar, R., Rabasa, A., Rey-Benayas, J. M. y Carabias, J. (2017). Bosques ribereños del trópico húmedo de México: un caso de estudio y aspectos críticos para una restauración exitosa. *Madera y Bosques*, 23, 181–193. <https://doi.org/10.21829/myb.2017.2311118>
- Meli, P., Calle, A., Calle, Z., Ortiz-Arrona, C. I., Sirombra, M. y Brancalion, P. H. (2019). Riparian-forest buffers: Bridging the gap between top-down and bottom-up restoration approaches in Latin America. *Land Use Policy*, 87, 104085. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.104085>
- Menchaca-Dávila, M. D. S. y Alvarado-Míchi, E. L. (2011). Efectos antropogénicos provocados por los usuarios del agua en la microcuenca del Río Pixquiác. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2, 85–96.
- Muñiz-Castro, M. A., Williams-Linera, G. y Benayas, J. M. R. (2006). Distance effect from cloud forest fragments on plant community structure in abandoned pastures in Veracruz, Mexico. *Journal of Tropical Ecology*, 22(4), 431–440. <https://doi.org/10.1017/S0266467406003221>
- Naiman, R. J., Fetherston, K. L., McKay, S. J. y Chen, J. (1998). Riparian forests. En R. J. Naiman y R. E. Bilby (Eds.), *River Ecology and management: lessons from the Pacific Coastal Ecoregion* (pp. 289–323). New York: Springer.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). (2021). Restaurar la tierra—El próximo decenio. *Unasylva* 252, Vol. 71 2020/1. <https://doi.org/10.4060/cb1600es>
- Orsi, F. y Geneletti, D. (2010). Identifying priority areas for forest landscape restoration in Chiapas (Mexico): an operational approach combining ecological and socioeconomic criteria. *Landscape and Urban Planning*, 94, 20–30. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2009.07.014>
- Orsi, F., Geneletti, D. y Newton, A. C. (2011). Towards a common set of criteria and indicators to identify forest restoration priorities: an expert panel-based approach. *Ecological Indicators*, 11, 337–347. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2010.06.001>
- Paré, L. y Gerez, P. (2012). *Al filo del agua. Congestión de la subcuenca del río Pixquiác, Veracruz*. INE-Semarnat. México D.F.: Juan Pablos Ed.
- Ramírez-Soto, A. F., García-Valencia, A., Trujillo-Santos, O., Sheseña-Hernández, I. M., Gutiérrez-Sosa, G., Contreras-Huerta, I. et al. (2021). *Guía técnica para la restauración riparia*. Red de Viveros de Biodiversidad, City Adapt y Fondo Golfo de México.
- RANP (Red Nacional de Sistemas Estatales de Áreas Naturales Protegidas). (2017). Polígonos de ANP Veracruz. Formato

- vector. Recuperado el 11 febrero, 2020 de: <https://www.anpsestatales.mx/anps.php?tema=13&estado=32>
- Saaty, T. L. (1980). *The analytic hierarchy process: planning, setting priorities, resource allocation*. New York: MacGraw-Hill.
- Sekercioglu, C. H. (2009). Tropical ecology: riparian corridors connect fragmented forest bird populations. *Current Biology*, 19, R210–R213. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2009.01.006>
- Semarnat (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales). (2023). *Decenio de las Naciones Unidas sobre la Restauración de los Ecosistemas*. Recuperado el 13 febrero, 2024 de: <https://www.gob.mx/semarnat/es/articulos/decenio-de-las-naciones-unidas-sobre-la-restauracion-de-los-ecosistemas?idiom=es>
- Sweeney, B. W., Bott, T. L., Jackson, J. K., Kaplan, L. A., Newbold, J. D., Standley, L. J. et al. (2004). Riparian deforestation, stream narrowing, and loss of stream ecosystem services. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 101, 14132–14137. <https://doi.org/10.1073/pnas.0405895101>
- Trujillo-Miranda, A. L., Toledo-Aceves, T., López-Barrera, F. y Gerez-Fernández, P. (2018). Active versus passive restoration: Recovery of cloud forest structure, diversity and soil condition in abandoned pastures. *Ecological Engineering*, 117, 50–61. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.03.011>
- IUCN (International Union for Conservation of Nature). (2020). *Recuperar nuestro futuro. El desafío de Bonn: impacto y potencial de la restauración de paisajes forestales*. Recuperado el 13 febrero, 2024 de: <https://www.bonnchallenge.org/resources/bonn-challenge-2020-report>
- Uribe, D., Geneletti, D., Del Castillo, R. F. y Orsi, F. (2014). Integrating stakeholder preferences and GIS-based multicriteria analysis to identify forest landscape restoration priorities. *Sustainability*, 6, 935–951. <https://doi.org/10.3390/su6020935>
- Valente, R. A., de Mello, K., Metedieri, J. F. y Americo, C. (2021). A multicriteria evaluation approach to set forest restoration priorities based on water ecosystem services. *Journal of Environmental Management*, 285, 112049. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112049>
- Vidriales-Chan G., García-Coll, I., Martínez, A., Gerez, P. y Muñoz-Castro, M. Á. (2012). Características del medio natural. En L. Paré y P. Gerez (Coords.), *Al filo del agua. Congestión de la subcuenca del río Pixquiac, Veracruz* (pp. 75–134). México D.F.: Juan Pablos Ed.
- Von Thaden, J., Manson, R. H., Congalton, R. G., López-Barrera, F. y Salcone, J. (2019). A regional evaluation of the effectiveness of Mexico's payments for hydrological services. *Regional Environmental Change*, 19, 1751–1764. <https://doi.org/10.1007/s10113-019-01518-3>
- Wilson, S. J., Smith, R., Chazdon, R., Durst, P., Metzel, R., Sprenkle-Hippolite, S. et al. (2022). *Assisted natural regeneration. A guide for restoring tropical forests*. Conservation International.