



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Cooperación Suiza
en América Central



Herramienta Geoespacial

para la identificación y selección de sitios potenciales para construcción de obras de **Cosecha de Agua de escorrentía en el Corredor Seco Centroamericano**

Ney Ríos y Laura Benegas

Con apoyo de
Manuel Spínola
Luis Pérez

Herramienta Geoespacial

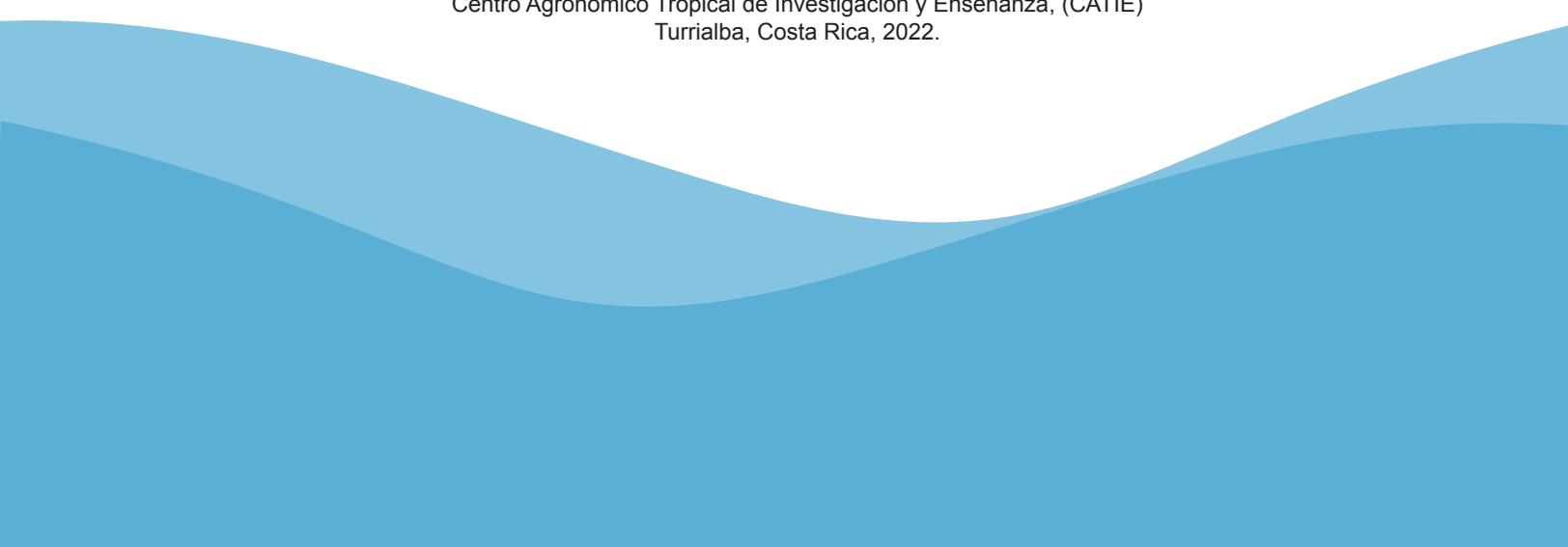
para la identificación y selección de sitios
potenciales para construcción de obras de

Cosecha de Agua de escorrentía en el Corredor Seco Centroamericano

Ney Ríos y Laura Benegas

Con apoyo de
Manuel Spínola
Luis Pérez

Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, (CATIE)
Turrialba, Costa Rica, 2022.



CATIE no asume la responsabilidad por las opiniones y afirmaciones expresadas por los autores en las páginas de este documento. Las ideas de los autores no reflejan necesariamente el punto de vista de la institución. Se autoriza la reproducción parcial o total de la información contenida en este documento, siempre y cuando se cite la fuente.

© CATIE - Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, 2022.
ISBN 978-9977-57-782-1

333.913.153

R586

Ríos, Ney

Herramienta geoespacial para la identificación y selección de sitios potenciales para construcción de obras de cosechas de agua de escorrentía en el Corredor Seco Centroamericano/ Laura Benegas Negri – 1ª ed. – Turrialba, Costa Rica : CATIE, 2022.
57 p. : il. – (Serie técnica. Manual técnico / CATIE ; no. 155)

ISBN 978-9977-57-782-1

1. Agua de escorrentía 2. Sistemas de información geográfica
3. Herramienta geoespacial 4. América Central 5. Manuales
I. CATIE II. Título III. Serie.

Citación sugerida:

Ríos, N; Benegas Negri, L. 2022. Herramienta geoespacial para la identificación y selección de sitios potenciales para construcción de obras de cosechas de agua de escorrentía en el Corredor Seco Centroamericano (en línea). Turrialba, Costa Rica, CATIE. 57 p. (Serie técnica. Manual técnico / CATIE, no. 155). Disponible en: <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/11992>

Créditos

Pedro Pablo Orozco, levantamiento de datos en campo, aportes y discusión técnica
Chris Harrison y Norvin Sepúlveda, aproximación preliminar de la herramienta
Bayardo Quintero, coordinación general del Proyecto Cosecha de Aguas, aportes y discusión técnica

Autores

Ney Ríos
Laura Benegas
Con apoyo de
Manuel Spínola
Luis Pérez

Revisión de estilo: Shirley Barquero

Diagramación

Silvia Francis Salazar, Tecnología de Información y Comunicación, CATIE

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	8
2.ASPECTOS CONCEPTUALES	10
2.1. Sequía en América Central.....	10
2.2. Sistemas de cosecha de agua de escorrentía.....	11
2.2.1. Clasificación.....	12
2.2.2. Componentes.....	12
2.2.3. Beneficios de los sistemas de cosecha de agua.....	13
2.2.4. Criterios para la selección de sitios.....	14
2.2.5. Variables para identificación y establecimiento de obras de cosecha de agua de escorrentía.....	15
2.3. Conceptos básicos que sustentan la herramienta para priorizar sitios potenciales para construir obras de cosecha de agua de escorrentía.....	16
2.3.1. Modelos estadísticos inferenciales.....	16
2.3.2. Análisis de ponderación espacial.....	16
2.3.3. Procesos preliminares.....	17
3..PROCESO METODOLÓGICO	18
3.1. FASE 1. Identificación de sitios potenciales para establecer obras de cosecha de agua por escurrimiento superficial.....	18
3.1.1.Criterios de ponderación.....	19
3.1.2.Análisis estadístico inferencial.....	21
3.1.3.Superposición ponderada fase 1.....	22
3.2.FASE 2. Predefinición de sitios para establecer obras de cosecha de agua de escurrimiento superficial.....	23
3.2.1.Análisis estadístico inferencial.....	25
3.2.2. Superposición ponderada fase 2.....	26
3.3.FASE 3: Validación in situ.....	29
3.3.1. Paso 1. Validación en el terreno.....	29
4. MANUAL DEL USUARIO DE LA HERRAMIENTA GEOESPACIAL	33
4.1. INSUMOS REQUERIDOS.....	33
4.2. INSTALACIÓN Y USO DE LA HERRAMIENTA.....	35
4.2.1. INSTALACIÓN.....	35
4.2.2. INTERFAZ DE USUARIO.....	37

4.2.2.1. Diseño.....	37
4.2.2.2. Funcionamiento.....	38
4.3. PASOS DE EJECUCIÓN DE LA HERRAMIENTA	39
4.3.1. Fase 1. Análisis hidrológico y geomorfológico	39
PASOS.....	39
RESULTADOS Fase 1	41
4.3.2. Fase 2: Análisis por condiciones particulares	42
PASOS.....	42
RESULTADOS Fase 2	45
5. ALCANCES Y LIMITACIONES DE LA HERRAMIENTA.....	46
6. CONCLUSIONES.....	48
7. RECOMENDACIONES.....	49
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50
9. ANEXOS.....	52

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Variables usadas para la selección de sitio y establecimiento de obra de cosecha de agua de escorrentía	15
Cuadro 2. Criterios y categorías de reclasificación de la variable pendiente.....	19
Cuadro 3. Criterios y categorías de reclasificación espacial de la variable red hídrica.....	20
Cuadro 4. Criterios y categorías de reclasificación espacial de la variable contenido de arcilla.....	24
Cuadro 5. Criterios y categorías de reclasificación espacial de la variable uso y cobertura del suelo.....	25

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Grados de sequía en el Corredor Seco Centroamericano	11
Figura 2.	Sistemas de cosecha de agua de lluvia en Centroamérica	11
Figura 3.	Clasificación general de los sistemas de captación de lluvia	12
Figura 4.	Componentes de un sistema de cosecha de agua de escorrentía.....	13
Figura 5.	Sistemas de cosecha de agua de lluvia para uso agrícola y ganadero	14
Figura 6.	Ejemplo de superposición ponderada	17
Figura 7.	Plataforma de datos del AW3D30 DSM	19
Figura 8.	Pendientes en porcentaje y su reclasificación para la zona del proyecto de Cosecha de Agua	20
Figura 9.	Red hídrica y su reclasificación para la zona del proyecto de Cosecha de Agua	21
Figura 10.	Análisis estadístico inferencial para la determinación de pesos para identificar sitios potenciales de obra cosecha de agua de escorrentía Fase 1	22
Figura 11.	Superposición espacial ponderada Fase 1.....	23
Figura 12.	Contenido de arcilla y su reclasificación para la zona del proyecto de Cosecha de Agua.....	24
Figura 13.	Cobertura y uso del suelo y su reclasificación para la zona del proyecto de Cosecha de Agua, Nicaragua.....	25
Figura 14.	Análisis estadístico inferencial para la determinación de pesos para predefinir sitios potenciales de obras de cosecha de agua de escorrentía Fase 2	26
Figura 15.	Superposición espacial ponderada Fase 2.....	27
Figura 16.	Resumen de fases 1 y 2 para la regionalización de zonas potenciales para establecimiento de obras de cosecha de agua de escorrentía	28
Figura 17.	Zonas de regionalización espacial óptimas (categoría 5) para el establecimiento de obras de cosecha de agua.....	28

Figura 18. Mapa de regiones óptimas para el establecimiento de obras de cosecha de agua de escorrentía en la zona del proyecto Cosecha de Agua, Nicaragua	29
Figura 19. Verificación de uso de suelo para definir sitio de construcción de obras de cosecha de agua.....	30
Figura 20. Verificación pendiente del terreno (%) para definir sitio de construcción de obras de cosecha de agua	31
Figura 21. Esquema del método de la vara para la estimación de la pendiente del terreno.....	32
Figura 22. Insumo ráster de elevación (MED) y subproductos generados por la herramienta.....	34
Figura 23. Información base e insumo ráster de la cobertura y uso de suelo	34
Figura 24. Información base e insumo ráster del contenido de arcilla.....	35
Figura 25. Insumos, fases, ponderaciones y productos de desarrollo del complemento	39

GLOSARIO

- **Shapefile:** Formato de archivo geoespacial que se emplea para almacenar la ubicación geométrica e información de atributos de entidades geográficas. Pueden ser puntos, líneas o polígonos.
- **Ráster:** Formato de archivo geoespacial que consta de una matriz de celdas (o píxeles) que contiene valores que representan información de una variable.
- **Modelo de elevación digital (MED):** Representación geoespacial de valores de altura con respecto al nivel del mar que permite identificar y conocer características morfométricas de una zona de interés (cuenca/territorio).
- **Pendiente del terreno (%):** Tiene como insumo el modelo de elevación digital y es definida como el grado de inclinación del terreno. Puede ser expresada en grados o porcentaje.
- **Análisis multicriterio:** Herramienta empleada para evaluar diversas posibles soluciones a un determinado problema, considerando un número variable de criterios.
- **Sitios para obras de cosecha de agua:** Lugares apropiados, sobre terreno, para el establecimiento de una obra de cosecha de agua, definidos con base en criterios morfométricos y prioridades de ubicación.
- **Textura:** Definida con base en la presencia de partículas que forman el suelo (arena, limo y arcilla). Tiene mucha relevancia en la construcción de obras de cosecha de agua por su efecto en la infiltración. Los suelos arcillosos (alto contenido en arcilla) son considerados de prioridad, pues limitan la pérdida de agua por infiltración de agua en las obras de cosecha de agua a construir.
- **Cobertura y uso del suelo (CUS):** Referida al uso o cobertura que se tiene sobre el suelo. Puede ser natural o vinculada con actividades productivas o de intervención antrópica. La cobertura y uso del suelo puede ser un criterio para priorizar sitios de intervención (obras de cosecha de agua).



Introducción

El Corredor Seco Centroamericano es una franja de territorio que atraviesa los países de El Salvador, Guatemala, Honduras, Nicaragua, Costa Rica y Panamá, y presenta condiciones particulares de clima. Es altamente vulnerable al cambio climático y los habitantes del área rural tienen como principal medio de vida la agricultura.

Las proyecciones climáticas para esta región son preocupantes. Para las siguientes décadas varios estudios (Hannah *et al.* 2016, Imbach *et al.* 2017, Ummenhofer y Meehl 2017, Gotlieb *et al.* 2019) proyectan una disminución en la precipitación media anual en hasta 14%, condición que podría prolongar, intensificar o aumentar las sequías. Actualmente ya se evidencian los impactos de las sequías sobre los ecosistemas y medios de vida en esta región, por lo que identificar estrategias que permitan garantizar el suministro de agua y crear resiliencia climática en sus sistemas productivos agropecuarios es necesario. Una de estas estrategias es el establecimiento de obras de cosecha que permitan garantizar la producción de agua para uso agropecuario.

El proyecto Adaptación de la Agricultura al Cambio Climático a través de la Cosecha de Agua en Nicaragua (2019-2021), cofinanciado por la Cooperación Suiza en América Central (COSUDE) y el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), ha sido implementado por el CATIE y el Instituto Nicaragüense de Tecnología Agropecuaria (INTA). El proyecto ha tenido como objetivo contribuir a que familias de pequeños y medianos productores de municipios del corredor seco, ubicados en el centro norte de Nicaragua, establezcan sistemas productivos resilientes al cambio climático y mejoren su seguridad alimentaria y nutricional.

Una de las intervenciones ha sido el establecimiento de sistemas de cosecha de agua de escorrentía, en cuyo proceso se han construido más de 600 obras de cosecha de agua. La experiencia obtenida con el establecimiento de sistemas de cosecha de agua, unido a un análisis estadístico y geoespacial, ha permitido desarrollar una herramienta orientada a identificar zonas potenciales –a nivel de fincas– para el establecimiento de obras de cosecha de agua por escorrentía.

El presente documento “Herramienta geoespacial para la identificación y selección de sitios potenciales para construcción de obras de cosecha de agua de escorrentía en el Corredor Seco Centroamericano” tiene como objetivo brindar una metodología y describir el detalle de esta, la cual permite definir zonas óptimas para el establecimiento de obras de cosecha de agua que considera variables topográficas del terreno, grado de priorización o de establecimiento de la obra y ubicación de obras construidas y en operatividad.

El presente documento consta de secciones que van desde describir el marco conceptual y metodológico vinculado con el diseño y uso de la herramienta geoespacial, en la que se brinda una descripción detallada de las variables biofísicas para la identificación y priorización de zonas y sitios, así como de los análisis estadísticos y de superposición espacial ponderada que respaldan los análisis.

También incluye una sección para el usuario de la herramienta en la plataforma QGIS que brinda los pasos de instalación y uso. La sección final corresponde a los alcances, limitaciones y recomendaciones relacionados con la herramienta geoespacial. Se espera que la herramienta sea un insumo técnico que facilite la identificación de zonas idóneas para el establecimiento de obras de cosecha de agua de escorrentía en zonas rurales del Corredor Seco Centroamericano.



2

Aspectos conceptuales

2.1. Sequía en América Central

Se entiende por sequía como el periodo de clima anormalmente seco, cuya duración es suficientemente prolongada como para causar desequilibrios hidrológicos significativos¹, como capacidad de campo y marchitez permanente. La sequía puede ser agrícola, hidrológica, hidrogeológica o meteorológica². De acuerdo con su duración/intensidad se clasifica como anormalmente seco, sequía moderada, sequía severa, extrema y excepcional. En Centroamérica, la ocurrencia de la sequía no se asocia con períodos prolongados (años) sin lluvia, sino con los siguientes factores³:

- Prolongación del “veranillo” o “canícula” (entre julio y agosto), que divide en dos partes la estación de lluvias sobre la vertiente del Pacífico, la cual evidencia el patrón bimodal de las precipitaciones en esta región.
- Distribución de las precipitaciones durante la estación lluviosa en pocos eventos de lluvia, entre períodos prolongados de días secos.
- Aumento en la temperatura del aire que, según el momento en que suceda o por cuánto tiempo se mantenga, igualmente afectará el desarrollo de los cultivos.
- Finalización temprana de la estación lluviosa.

Una visualización espacial de la severidad de las sequías en el Corredor Seco Centroamericano se presenta en la figura 1, donde se observa que la mayor parte de este territorio presenta condiciones de sequía alta.

1 De acuerdo con la Sociedad Meteorológica Norteamericana.

2 Sequía agrícola: Déficit de humedad en el suelo. Sequía hidrológica: Déficit de flujo o almacenamiento en cauces y cuerpos de agua naturales (agua en la superficie). Sequía hidrogeológica: Déficit de agua en acuíferos. Sequía meteorológica: Déficit de precipitación o grado de desviación de la precipitación al compararla con lo que en la región se considera un comportamiento “normal” de las lluvias, en una serie de tiempo preestablecida.

3 Ramírez 2001.

Vulnerabilidad Histórica a Sequía en el Corredor Seco Centroamericano

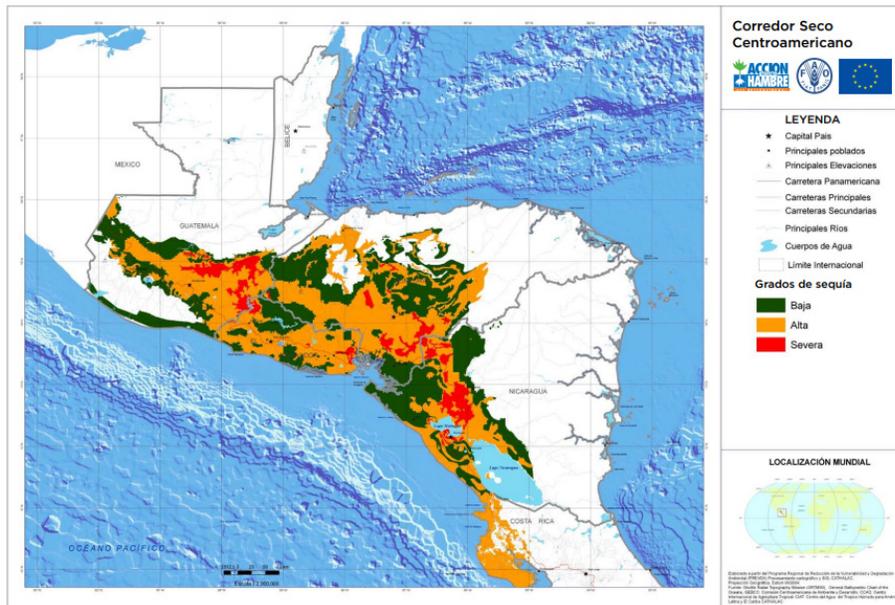


Figura 1. Grados de sequía en el corredor seco Centroamericano

Fuente: FAO 2012

2.2. Sistemas de cosecha de agua de escorrentía

Conocidos también como sistemas de captación de agua de Lluvia [*Rainwater Harvesting System*⁴], consisten en la recolección y concentración de agua de escorrentía para usos productivos (por ejemplo, agropecuarios, acuícolas, etc.), recarga de acuíferos, belleza escénica, consumo humano y usos domésticos.



Figura 2. Sistemas de cosecha de agua de lluvia en Centroamérica

4 Concepto en inglés también utilizado para sistemas de captación de agua de lluvia para servicio doméstico.

2.2.1. Clasificación

Son varios los tipos de sistemas de captación de agua de lluvia, los cuales –de acuerdo con la escala y objetivo– son diferenciados y clasificados, siendo el más común los sistemas de cosecha de agua para uso doméstico. El presente documento se enfoca en sistemas de cosecha de agua para uso agrícola y una clasificación de estos se muestra en la siguiente gráfica (Figura 3).

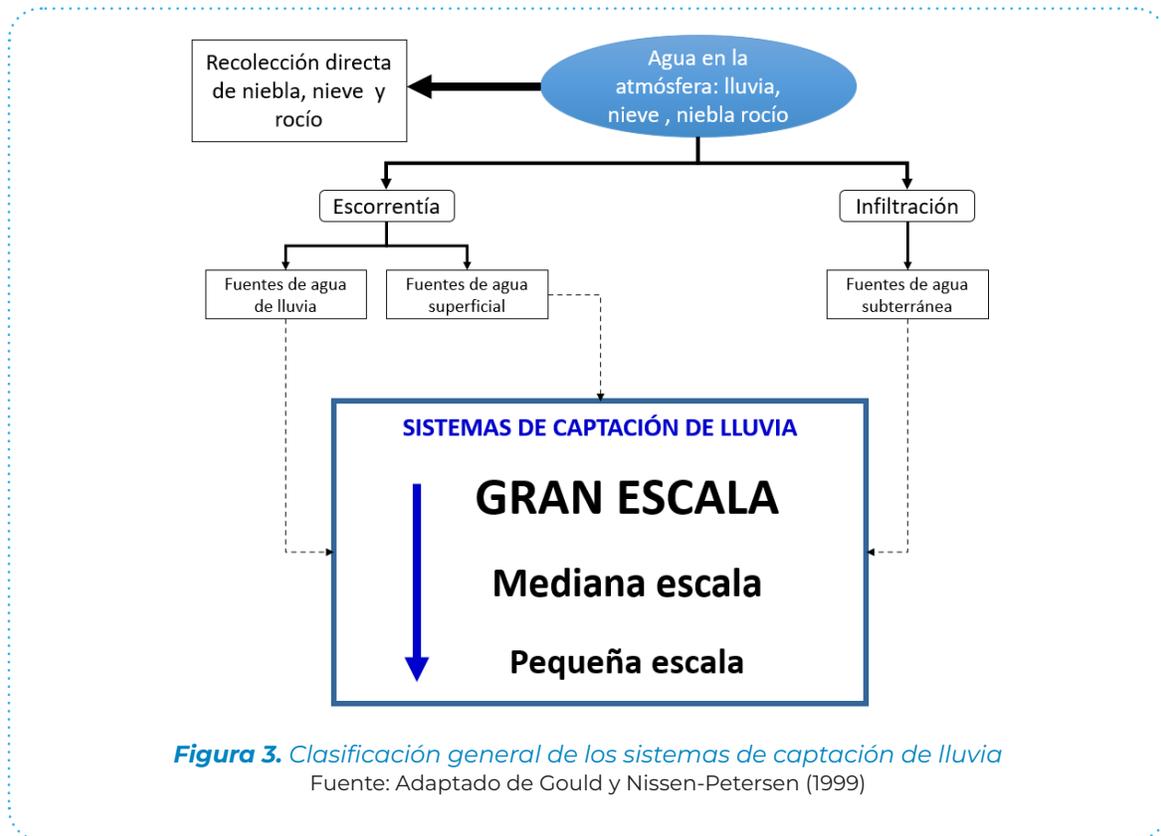


Figura 3. Clasificación general de los sistemas de captación de lluvia
Fuente: Adaptado de Gould y Nissen-Petersen (1999)

2.2.2. Componentes

En los sistemas de cosecha de agua de escorrentía se pueden identificar tres componentes: i) área de captación o recolección, ii) infraestructura y iii) área de uso o aprovechamiento.

- a. Área de captación o recolección:** Se refiere a la superficie que va a recolectar el agua de lluvia. Puede ser natural o artificial⁵, como un bosque, zona de cultivos o un área definida que permita la captación del agua de lluvia y su conducción por gravedad.

⁵ Un ejemplo de un proceso de recarga artificial se encuentra en las Amunas, que son sistemas en los que se hace la recarga hídrica por medio de intervención humana. Las Amunas son sistemas de siembra y cosecha de agua ancestrales en la zona andina de Sudamérica

- b. Infraestructura:** Vinculada con los elementos de conducción y almacenamiento. Es parte necesaria en el sistema e incluye tuberías o mangueras (instaladas próximas al área de captación para conducción del agua), así como reservorios construidos para el almacenamiento del agua de escorrentía.
- c. Área de uso o aprovechamiento:** En la mayoría de los casos es inmediata al área de almacenamiento (reservorios) y es un elemento que hace uso o se beneficia de la cosecha de agua de escorrentía. Considera los usuarios del agua (agropecuarios, forestales), así como las tecnologías a emplear para su uso (riego por goteo, gravedad, etc).



Figura 4. Componentes de un sistema de cosecha de agua de escorrentía
Foto: Pedro Pablo Orozco

2.2.3. Beneficios de los sistemas de cosecha de agua

- Con el sistema de cosecha de agua, los agricultores en épocas de sequía disponen de agua complementaria para cultivos, animales y quehaceres domésticos.
- En lo ambiental, reduce la presión sobre el recurso hídrico terrestre, como mantos acuíferos o agua subterránea.
- Brinda seguridad alimentaria, porque se tiene disponibilidad de más alimentos y más variados en época seca.
- Potencial para reducir inundaciones, debido al control/manejo de la escorrentía superficial.
- Tiene beneficios económicos, ya que los productores pueden vender productos agropecuarios y mejorar sus ingresos económicos.
- No requiere energía para la operación del sistema.



Figura 5. *Sistemas de cosecha de agua de lluvia para uso agrícola y ganadero*
En las imágenes 1 y 3, el área de aprovechamiento está ubicada alrededor del área de captación y en la imagen 3, es de acceso directo.

Foto: Pedro Pablo Orozco

SE DEBE TENER PRESENTE QUE...

- Antes de establecer sistemas de cosecha de agua es importante realizar un análisis del territorio: características y cualidades topográficas y climáticas.
- El establecimiento de sistemas de cosecha de agua responde a una demanda, pero siempre debe conocerse la oferta y condiciones de cada sitio y obra.
- Los materiales por usar deben ser de fácil adquisición y de preferencia, locales.
- Para lograr la sostenibilidad de estas tecnologías se deben considerar variables ambientales, sociales y económicas.

2.2.4. Criterios para la selección de sitios

Para la selección de un sistema apropiado de cosecha de agua deben considerarse criterios técnicos, económicos, sociales y ambientales.

- **Criterio biofísico:** Se enfoca en conocer las condiciones y particularidades biofísicas del sitio (principalmente topográficas, geológicas, edáficas, temperatura, precipitación y en algunos casos, cobertura vegetal asociada), complementadas con sus condiciones de oferta y demanda de agua.

- **Criterio económico:** Considera la capacidad económica de las familias, para así proponer el sistema más adecuado a su condición.
- **Criterio social:** Toma en cuenta la idiosincrasia del tejido social, que incluye aspectos culturales de la zona o lugar donde se propone realizar la intervención.
- **Criterio ambiental:** Cada tipo de sistema de cosecha de agua tiene su impacto ambiental. Por lo tanto, se deben contemplar los aspectos favorables a la hora del establecimiento, pero también probables efectos secundarios sobre erosión y sedimentación, como en el caso de los sistemas de escorrentía. Los sistemas de cosecha de agua o tecnologías deben estar en armonía con el ambiente o entorno en el cual serán instalados. En zonas rurales, deben contribuir a su mejora o sostenibilidad, así como en procesos de recuperación y restauración de suelos, bosques y aguas.
- **Criterio de gestión del riesgo:** Se trata del manejo de la incertidumbre relacionada con variables biofísicas (afectación de las obras por condiciones del terreno, por ejemplo, deslizamientos o derrumbes), socioeconómicas (vinculada con el empoderamiento de actividades de establecimiento, manejo y mantenimiento de las obras) y ambientales, como cambios en patrones y cantidad de las precipitaciones que podrían afectar la operatividad de las obras de cosecha de agua de escorrentía.

La viabilidad de un sistema de cosecha de agua de escorrentía se **sustenta en la precipitación**. Conocer su comportamiento en cuanto a cantidad, intensidad, distribución y frecuencia es importante y necesario.

2.2.5. Variables para identificación y establecimiento de obras de cosecha de agua de escorrentía

Son aquellas variables al establecimiento de obras de cosecha de agua, principalmente variables biofísicas, complementadas con variables socioeconómicas. Además, es posible que se consideren como criterios para la selección/identificación de sitios o establecimiento de las obras de cosecha de agua (Cuadro 1).

Cuadro 1. Variables usadas para la selección de sitio y establecimiento de obras de cosecha de agua de escorrentía

Variable	Tipo	Importancia
Textura del suelo	Biofísica	Criterio de selección de sitio: Vinculado con procesos de infiltración del lugar donde se establece la obra de cosecha de agua. Son deseables contenidos altos de arcilla para evitar pérdida de agua por infiltración.
Pendiente del terreno	Biofísica	Criterio de selección de sitio: Su análisis permite, por un lado, evitar peligro de colapso de agua y por otro, garantizar el proceso de escurrimiento superficial que suministre agua en las obras de cosecha de agua.

Variable	Tipo	Importancia
Uso o cobertura del suelo	Biofísica	Criterio de establecimiento de la obra⁶: Permite definir el lugar de establecimiento de la obra de cosecha de agua, de acuerdo con la priorización de una cobertura en particular y objetivos de la intervención.
Accesibilidad	Biofísica	Criterio de establecimiento de la obra: Se priorizan sitios a una distancia determinada de un camino o acceso vial.
Susceptibilidad a deslizamientos	Riesgo	Criterio de selección de sitio: Evita identificar terrenos con riesgo a deslizamientos.
Población	Social	Criterio de selección de sitio: Se prioriza lugares con población cercana o ubicación de contrapartes.

Es importante tener presente que un **criterio de selección de sitio** permite identificar zonas potenciales en el territorio que presentan condiciones apropiadas para establecer obras de cosecha de agua. Asimismo, un **criterio de establecimiento** ayuda a definir los sitios donde establecerlas.

2.3. Conceptos básicos que sustentan la herramienta para priorizar sitios potenciales para construir obras de cosecha de agua de escorrentía

2.3.1. Modelos estadísticos inferenciales

Un modelo estadístico es una ecuación matemática que reproduce los fenómenos que se observan de la forma más exacta posible y permite determinar patrones asociados. Asimismo, un modelo estadístico inferencial se orienta a entender las relaciones entre los patrones de las variables analizadas para comprender un fenómeno y puede ser del tipo **i) explicativo:** cuando con base en datos existentes ilustra la relación de variables definidas como relevantes para la comprensión de un fenómeno o **ii) predictivo:** cuando se usa un proceso de análisis de datos para realizar predicciones basadas en datos existentes, con el fin de predecir o explicar el comportamiento de eventos futuros. La selección de un modelo estadístico debe estar en función de los objetivos de análisis definidos y su disponibilidad de datos.

En este documento se comparte el proceso de análisis estadístico que ha permitido identificar zonas óptimas para el establecimiento de obras de cosecha de agua por escorrentía superficial, tomando en cuenta la ubicación de obras construidas y en operatividad.

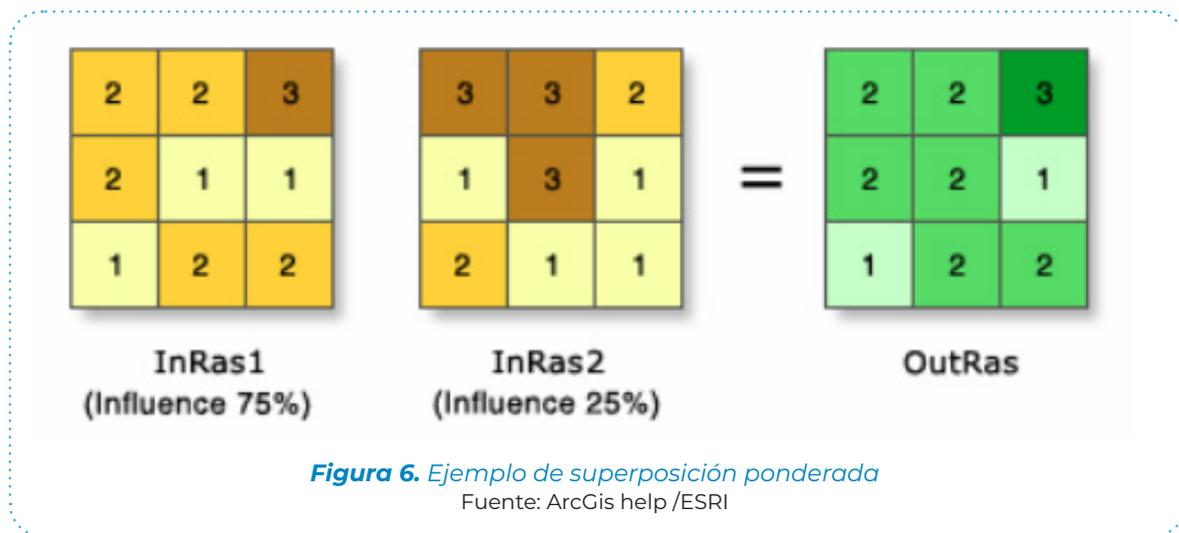
2.3.2. Análisis de ponderación espacial

Es un proceso geoespacial que permite realizar evaluaciones multicriterio enfocadas en resolver el análisis de decisión, en el que intervienen varios factores con valoraciones

⁶ El proyecto de cosecha de agua en Nicaragua lo considera como criterio de selección de sitio para evitar la selección o construcción en zonas boscosas.

diferentes. Es decir, la implementación de esta función ayuda a superponer varios rásteres con una escala de medición común y pondera cada uno según su importancia (ESRI/ArcGIS help⁷). Es un proceso frecuentemente usado para definir sitios o zonas de importancia con base en pesos relativos de insumos geoespaciales relevantes, pesos que en el presente estudio fueron obtenidos mediante el análisis estadístico que consideró variables topográficas, de priorización y obras de cosecha de agua en operatividad.

Este análisis utiliza archivos en formato ráster clasificados bajo una escala común, a los cuales se les asigna un peso o influencia de porcentaje y de acuerdo con esto, los valores de las celdas se multiplican con el peso asignado o influencia de porcentaje. El resultado es un ráster con valor entero (Figura 6).



2.3.3. Procesos preliminares

Para los efectos de la herramienta presentada en este manual, los procesos preliminares con respecto a su diseño e implementación son aquellos pasos, pruebas y ejercicios realizados durante la ejecución del Proyecto Cosecha de Agua que –de manera conjunta– generan tanto insumos (datos medidos-corroboración en campo) como reflexión y análisis de los procesos. En este sentido, el personal técnico del proyecto cosecha de agua, con base en criterios técnicos, experiencia en campo y análisis geoespaciales iniciales, identificó un grupo de variables asociadas con el establecimiento de obras de cosecha de agua de escorrentía (textura, pendiente, susceptibilidad a deslizamientos, cultivos, uso actual del suelo, población y accesibilidad), que fueron consideradas y ajustadas en la elaboración de la herramienta geoespacial.

7 <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/weighted-overlay.htm>

3

Proceso metodológico

El protocolo usado en la elaboración de la herramienta geoespacial toma como un insumo los 626 sitios de obras de cosecha establecidas por el proyecto que –junto con criterios de ponderación basados en variables definidas y análisis estadísticos inferenciales– permitió establecer dos fases de análisis: a) una orientada a identificar y definir sitios potenciales para el establecimiento de obras de cosecha de agua, con base en las condiciones topográficas e hidrológicas y b) otra con énfasis en predefinir las zonas potenciales de acuerdo con las condiciones deseables del terreno o por priorización de sitio para la construcción de la obra. También se definen pasos de validación *in situ*, tomando como insumo los resultados de la herramienta para definir el lugar de establecimiento de las obras de cosecha de agua.

3.1. FASE 1. Identificación de sitios potenciales para establecer obras de cosecha de agua por escurrimiento superficial

Esta fase se enfoca en identificar y definir sitios potenciales para el establecimiento de obras de cosecha de agua, con base en las condiciones topográficas e hidrológicas de la zona de interés. Es decir, parte por entender la escorrentía como proceso en las condiciones naturales del terreno y definir, de acuerdo con criterios técnicos, variables que permitan establecer obras de cosecha de agua de escorrentía.

El insumo base es el modelo de elevación digital (en formato ráster) a alta resolución de la zona de interés⁸, de los cuales se obtendrán los subproductos: pendientes (%) y red hídrica.

⁸ Para la zona del proyecto cosecha de agua en Nicaragua, la herramienta usa el modelo de elevación digital AW3D30 MED de alta precisión, producto de la Agencia Aeroespacial Japonesa (JAXA), generado del MED AW3D de 5 metros de resolución. Disponible en: <https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d30/data/index.htm>

AW3D30 DSM data map

Please click the area which downloads a mosaic.

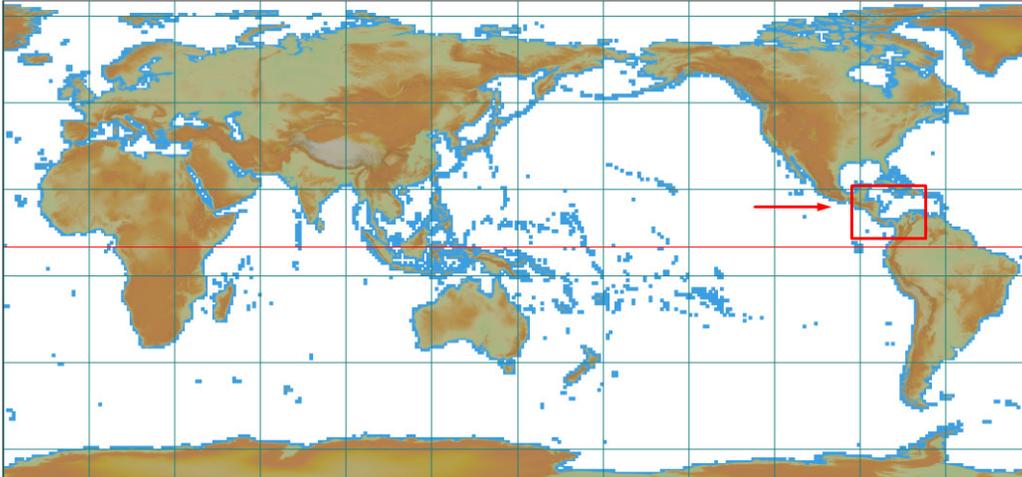


Figura 7. Plataforma de datos del AW3D30 DSM

3.1.1. Criterios de ponderación

El tratamiento a los subproductos del modelo de elevación digital (pendientes y distancia a red hídrica de orden 1) se describe a continuación.

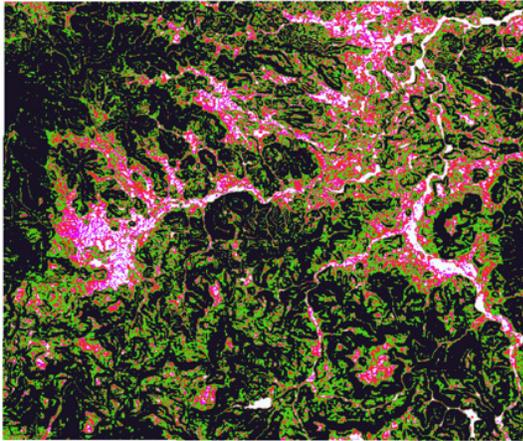
- **Pendientes:** Subproducto del MED expresado en porcentaje y reclasificado en 5 categorías de acuerdo con la aptitud del sitio. En este sentido, las pendientes fueron reclasificadas en 5 escalas y categorías⁹.

Cuadro 2. Criterios y categorías de reclasificación de la variable pendiente

Pendiente (%)	Escala	Aptitud del sitio	Categorización de sitios
> 20	1	Muy baja	Inaceptable
10-20	2	Baja	Aceptable
5-10	3	Media	Adecuado
3-5	4	Alta	Muy adecuado
< 3	5	Muy Alta	Óptimo

⁹ Rangos validados por las obras establecidas en el proyecto y estudios relacionados indican que "la construcción de reservorios para cosecha de agua lluvia no debe llevarse a cabo en áreas con pendientes mayores al 5% (Al-Adamat *et al.* 2010, citado por Valencia 2020), debido a que zonas con menor porcentaje de pendiente tienen mayor factibilidad para la recolección de agua lluvia (Agri 2020).

Pendiente (%)



Reclasificado en 5 clases

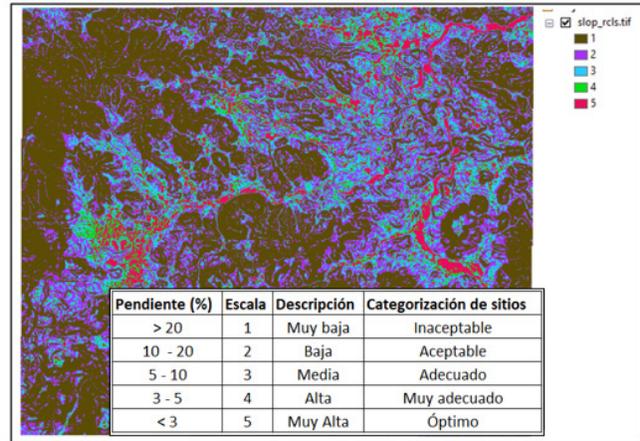
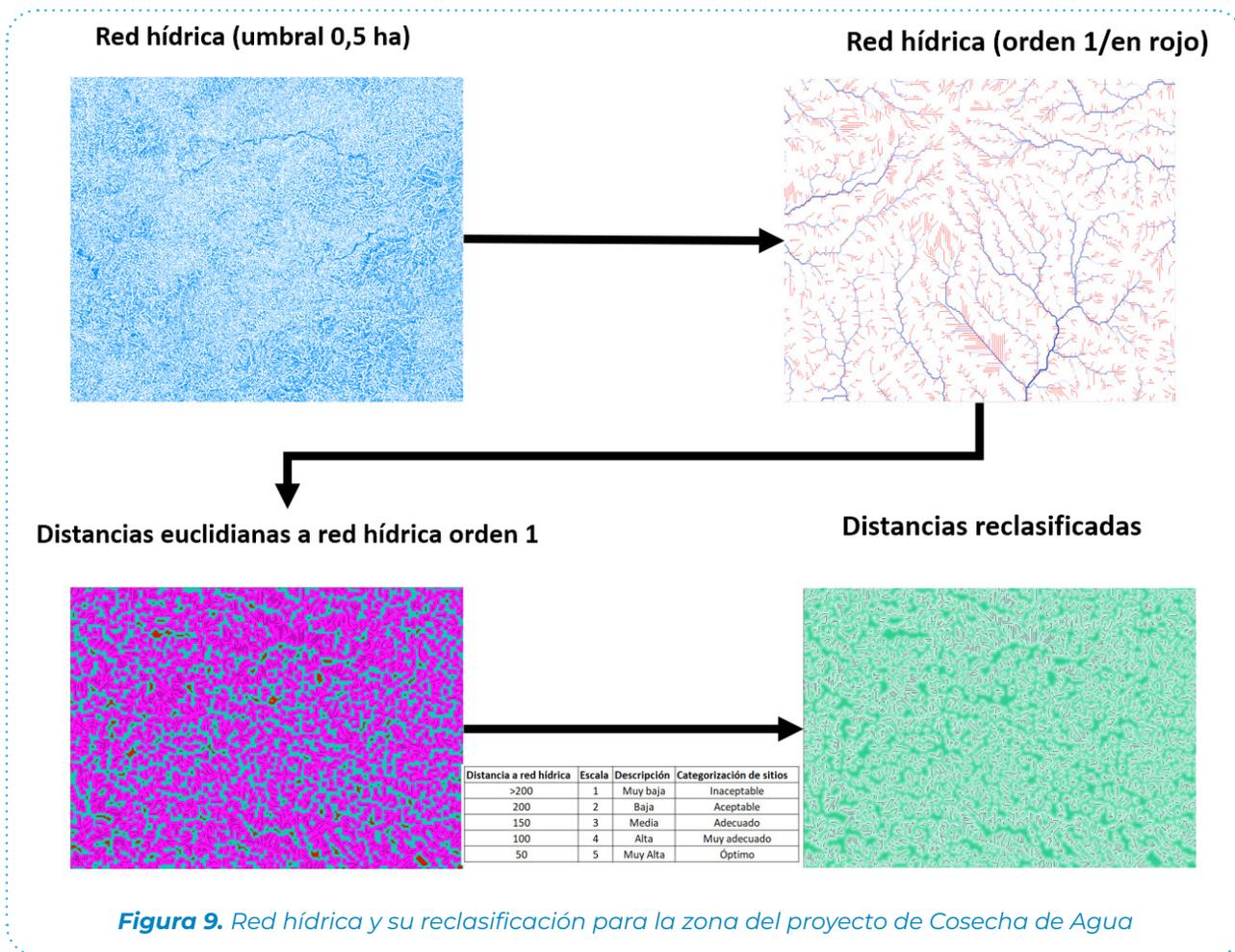


Figura 8. Pendientes en porcentaje y su reclasificación para la zona del proyecto de Cosecha de Agua

Distancia a la red hídrica: Subproducto del MED y obtenida mediante procesos de definición de red hídrica (dirección-acumulación de flujo y definición de umbral de escorrentía) para la zona de análisis. Debido a que el objetivo de la herramienta es identificar sitios idóneos, a escala de finca, en la zona del proyecto se consideró tener una red hídrica detallada de orden 1, que se logró con un área de acumulación de flujo= 0,5 ha. Una vez generada la red hídrica total, solo se consideró el orden de corrientes de orden 1, para lo cual se determinó distancias euclídeas, cuyos rangos y reclasificación se muestra a continuación.

Cuadro 3. Criterios y categorías de reclasificación espacial de la variable red hídrica

Distancia a red hídrica	Escala	Aptitud del sitio	Categorización de sitios
>200	1	Muy baja	Inaceptable
200	2	Baja	Aceptable
150	3	Media	Adecuado
100	4	Alta	Muy adecuado
50	5	Muy Alta	Óptimo



3.1.2. Análisis estadístico inferencial

Tomando como insumos los sitios de obras construidas y los archivos ráster reclasificados de las variables pendiente y distancia a red hídrica orden 1, se realizó un análisis estadístico inferencial del tipo explicativo para definir los pesos de importancia de las variables sobre la ubicación de las obras construidas (figura 10¹⁰).

10 Si bien al inicio fue incluida la variable de curvatura del terreno, los análisis evidencian una importancia residual, lo cual puede explicarse debido a que dicha propiedad del terreno está considerada en los procesos de definición de una red hídrica (dirección-acumulación de flujo).

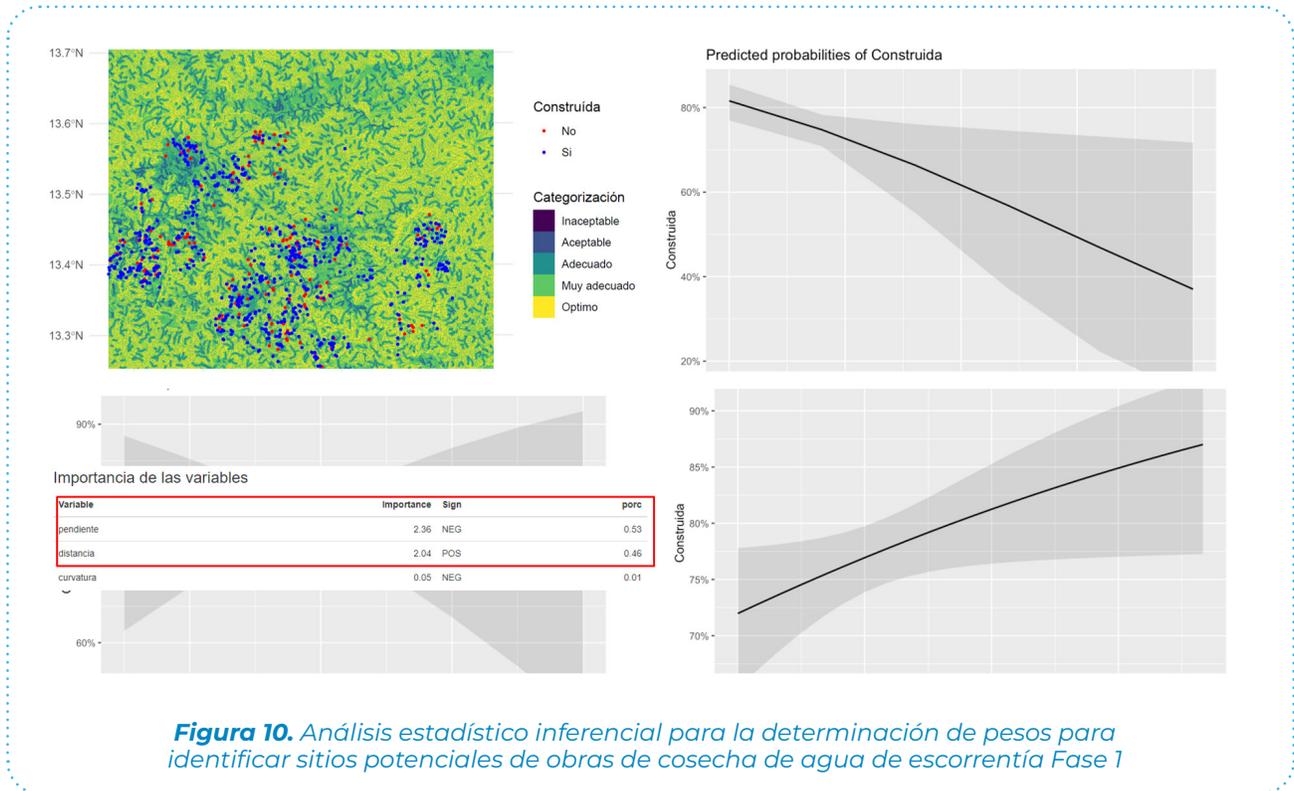


Figura 10. Análisis estadístico inferencial para la determinación de pesos para identificar sitios potenciales de obras de cosecha de agua de escorrentía Fase 1

3.1.3. Superposición ponderada fase 1

Con base en los subproductos reclasificados de pendiente y distancia a red hídrica, y tomando en cuenta el resultado del análisis estadístico inferencial, los archivos espaciales fueron combinados con sus pesos determinados (50% para pendientes y 50% para distancia a red hídrica) y se generó un producto geoespacial formato ráster denominado ponderación-morfometría, el cual muestra una regionalización de las zonas potenciales para el establecimiento de obras de cosecha de agua que considera solo variables morfométricas e hidrológicas.

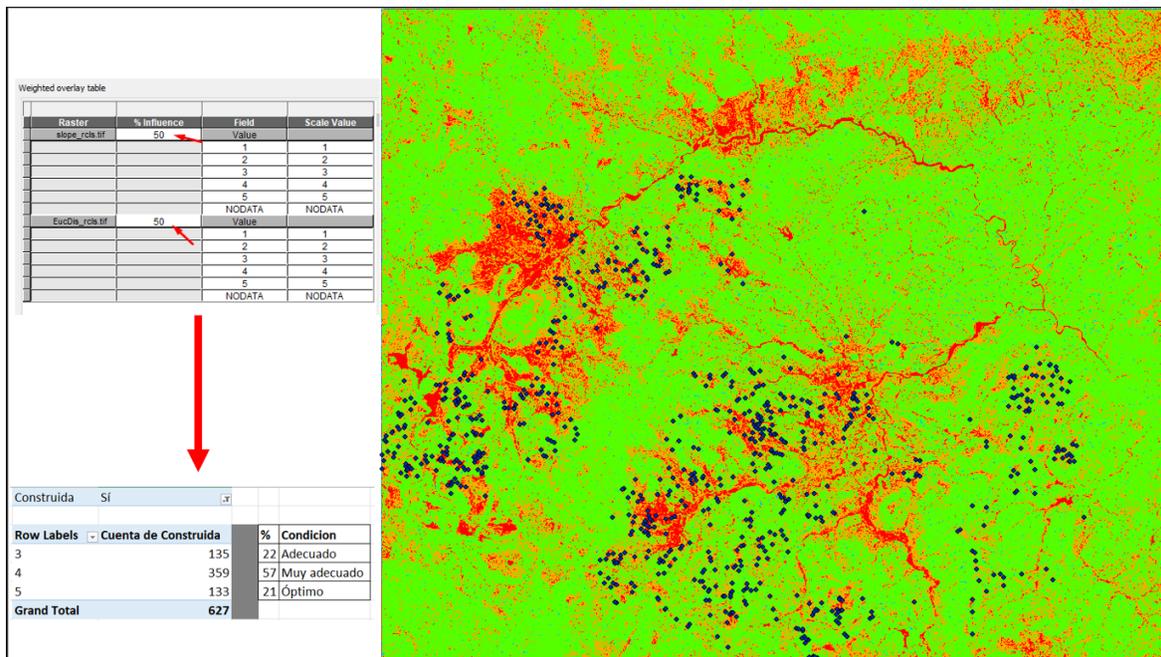


Figura 11. Superposición espacial ponderada Fase 1
La capa resultante “ponderación-morfometría” muestra la regionalización espacial de zonas potenciales para la identificación de sitios para obras de cosecha de agua con base en variables de topográficas e hidrológicas.

En la zona del proyecto, la regionalización generada en esta fase muestra que los sitios de obras de cosecha de agua construidas por el proyecto se ubican en categorías adecuadas (22%) y muy adecuadas u óptimas (78%). Ningún sitio se ubicó en categorías aceptables o inaceptables.

3.2. FASE 2. Predefinición de sitios para establecer obras de cosecha de agua de escurrimiento superficial

En esta fase se considera la inclusión de variables vinculadas con criterios de establecimiento de las obras, ya sea por condiciones deseables del terreno o priorización de construcción relacionada con el uso del suelo. Las variables consideradas son contenido de arcilla del suelo –como condición particular de sitio– y uso agropecuario, como sitio prioritario para el establecimiento de obras de cosecha de agua.

- **Contenido de arcilla:** Sitios con presencia de suelos arcillosos (alto contenido en arcilla) fueron considerados como óptimos, debido al potencial de limitar la pérdida de agua en las obras de cosecha de agua por infiltración. Para realizar el análisis el insumo espacial de contenido de arcilla (formato ráster)¹¹ fue reclasificado de acuerdo con sus valores de contenido (Cuadro 4, Figura 12).

¹¹ Fuente: <https://data.isric.org/geonetwork/srv/spa/catalog.search#/home>

Cuadro 4. Criterios y categorías de reclasificación espacial de la variable contenido de arcilla

Contenido Arcilla	Escala	Aptitud del sitio	Categorización de sitios
0	1	Muy baja	Inaceptable
0-100	2	Baja	Aceptable
100-200	3	Media	Adecuado
200-300	4	Alta	Muy adecuado
>300	5	Muy Alta	Óptimo

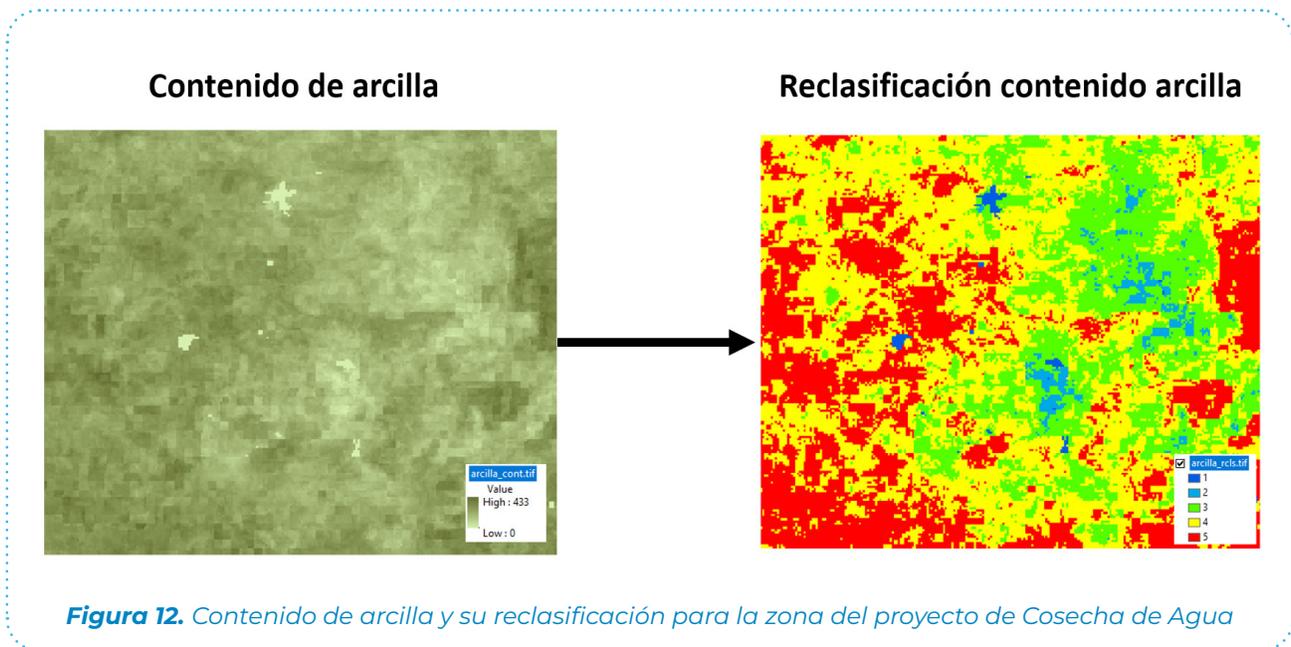


Figura 12. Contenido de arcilla y su reclasificación para la zona del proyecto de Cosecha de Agua

- **Uso de suelo prioritario:** El proyecto considera la actividad agrícola/agropecuaria como uso prioritario para el establecimiento de obras de cosecha de agua.

El formato ideal para realizar el análisis espacial es ráster. Sin embargo, si se cuenta con una capa en formato *shapefile*, este insumo debe ser convertido a formato ráster respetando sus categorías de uso y a la resolución del modelo de elevación digital usado en la fase 1, para luego ser reclasificado de acuerdo con los criterios de categorización (Cuadro 5, Figura 13).

Cuadro 5. Criterios y categorías de reclasificación espacial de la variable uso y cobertura del suelo

Uso	Escala	Priorización	Categorización de sitios
Centro poblado/urbano	1	Muy baja	Inaceptable
Cultivos perennes	2	Baja	Aceptable
Tacotal y arbustivas	3	Media	Adecuado
Sin vegetación	4	Alta	Muy adecuado
Cultivos anuales, pastos y herbáceas	5	Muy Alta	Óptimo

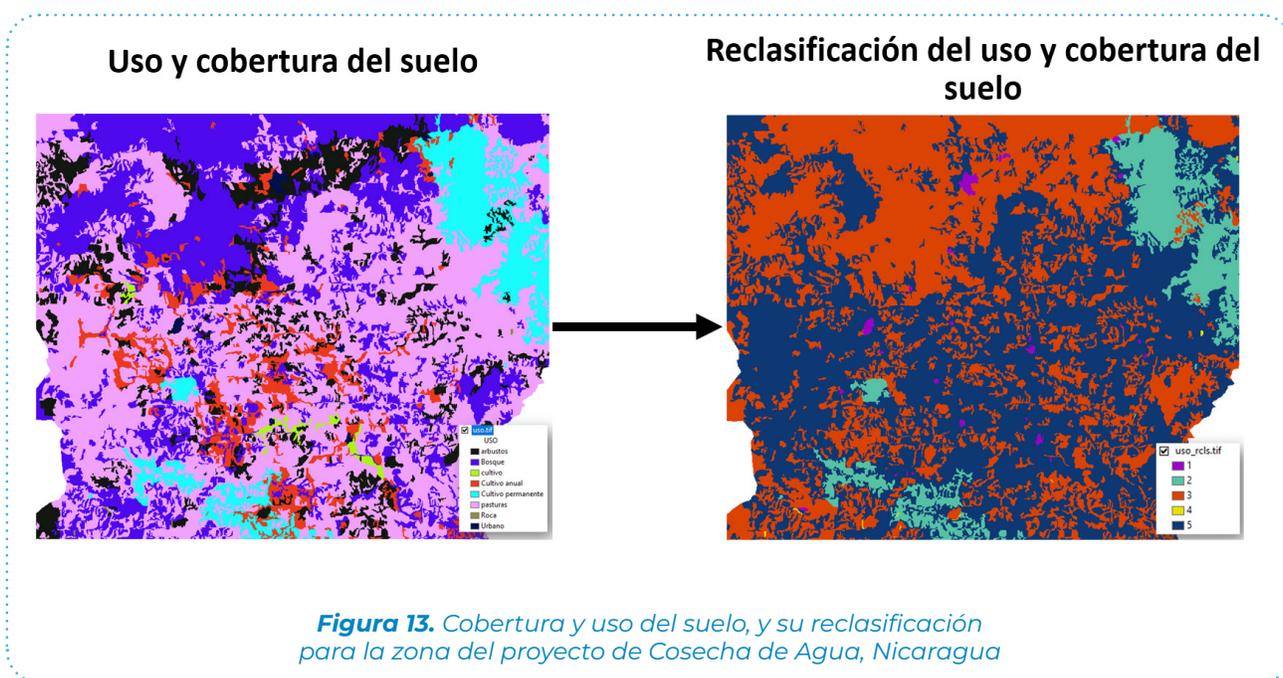


Figura 13. Cobertura y uso del suelo, y su reclasificación para la zona del proyecto de Cosecha de Agua, Nicaragua

En la fase 2, para los análisis multicriterio de superposición ponderada y modelos estadísticos predictivos, se consideran archivos geoespaciales tipo ráster. En el caso de solamente tener un insumo vectorial (por ejemplo, con variables discretas, como es cobertura y uso de suelo), estas deberán ser convertidas al formato requerido.

3.2.1. Análisis estadístico inferencial

Tomando como insumos los puntos de ubicación de las obras, la capa morfo y los archivos ráster reclasificados de las variables (uso de suelo y contenido de arcilla), se realizó un análisis estadístico inferencial del tipo explicativo para definir los pesos de importancia de las variables sobre la ubicación de las obras construidas (figura 14¹²).

12 Detalle de análisis estadístico inferencial que genera las gráficas mostradas en la sección de Anexos.

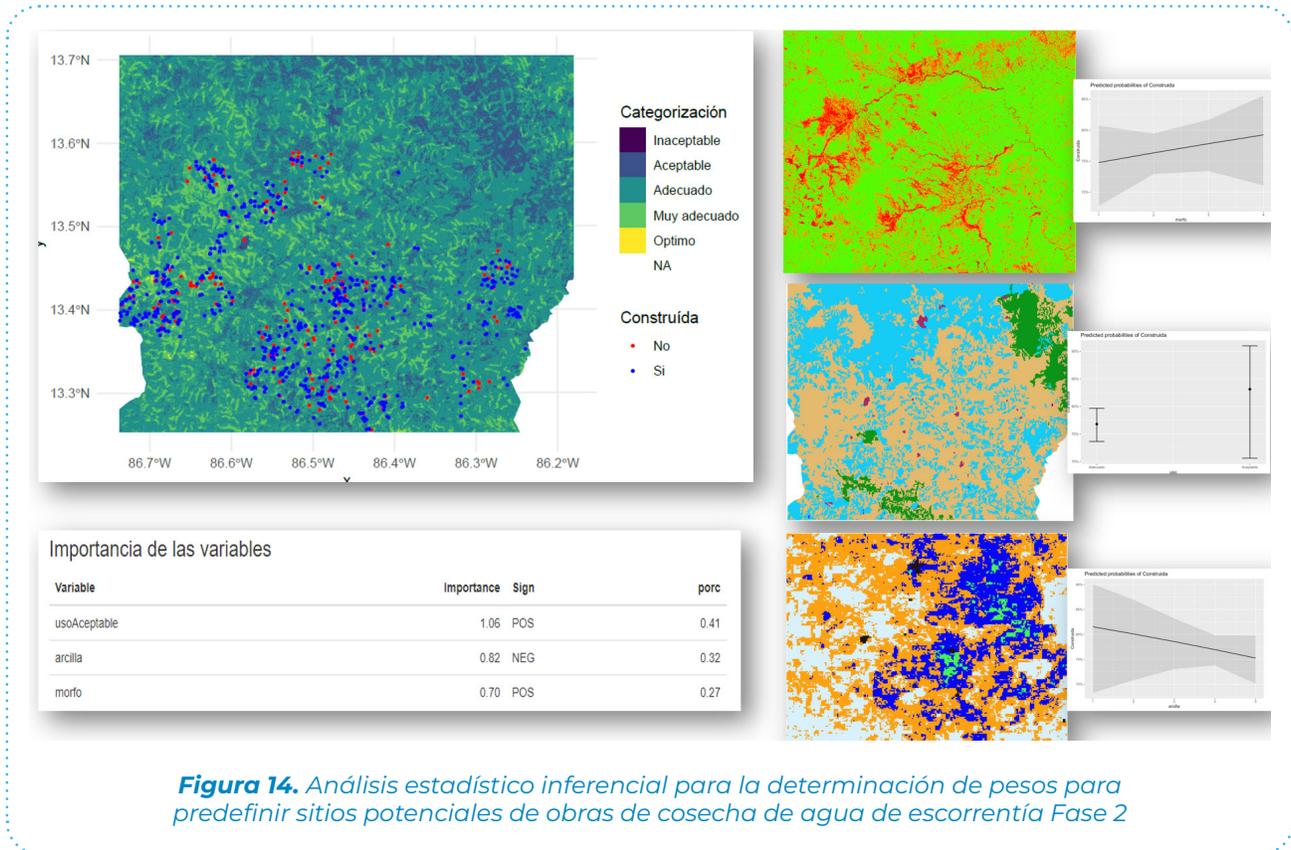


Figura 14. Análisis estadístico inferencial para la determinación de pesos para predefinir sitios potenciales de obras de cosecha de agua de escorrentía Fase 2

3.2.2. Superposición ponderada fase 2

Considerando los pesos correspondientes para las capas uso de suelo, contenido de arcilla y morfo determinados en el análisis estadístico previo (ajustados a 40-30-30) y los archivos ráster reclasificados de dichas variables, se realizó el proceso de superposición ponderada, la cual genera el ráster categorizado con regiones óptimas para el establecimiento de obras de cosecha de agua de escorrentía (figura 15).

Raster	% Influence	Field	Scale Value
uso_solo.tif	40	Value	
		1	1
		2	2
		3	3
		4	4
		5	5
arcilla_solo.tif	30	NODATA	NODATA
		Value	
		1	1
		2	2
		3	3
		4	4
		5	5
morfo	30	NODATA	NODATA
		Value	
		1	1
		2	2
		3	3

Etiquetas de fila	Cuenta de Construida	%	Condición
3	60	10	Adecuado
4	426	68	Muy adecuado
5	141	22	Optimo
Total general	627		90

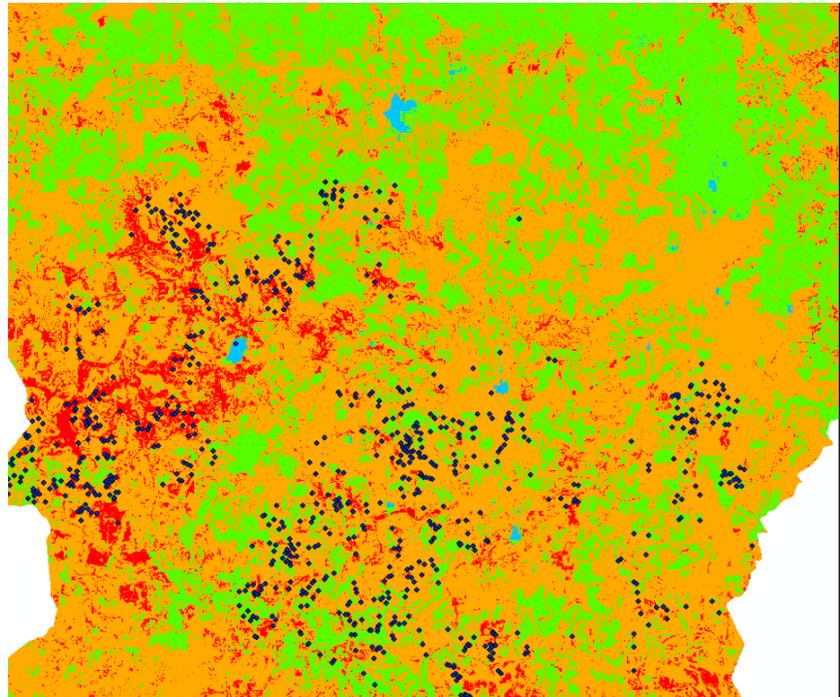


Figura 15. Superposición espacial ponderada Fase 2
La capa ráster generada muestra la regionalización de zonas potenciales para la preselección de sitios para establecer obras de cosecha de agua.

Con base en la salida de los modelos predictivos, los pesos para las variables se establecieron en 50% para la cobertura y uso de suelo, 30% para el contenido de arcilla y 30% para la capa morfo.

Los análisis de la fase 2 permitieron tener un archivo ráster de zonas potenciales para la preselección de sitios en los que establecer obras de cosecha de agua que –para el caso de la zona del proyecto– evidencia que 90% de las obras construidas se ubican en zonas muy adecuadas y óptimas (68% y 22%, respectivamente) y 10% en zonas adecuadas. Ninguna en zonas aceptables o inadecuadas.

A continuación, se muestra el resumen de las fases 1 y 2 para la regionalización de zonas potenciales para el establecimiento de obras de cosecha de agua de escorrentía, así como las regiones óptimas (categoría 5) para el establecimiento de obras de cosecha de agua (figuras 16 y 17).

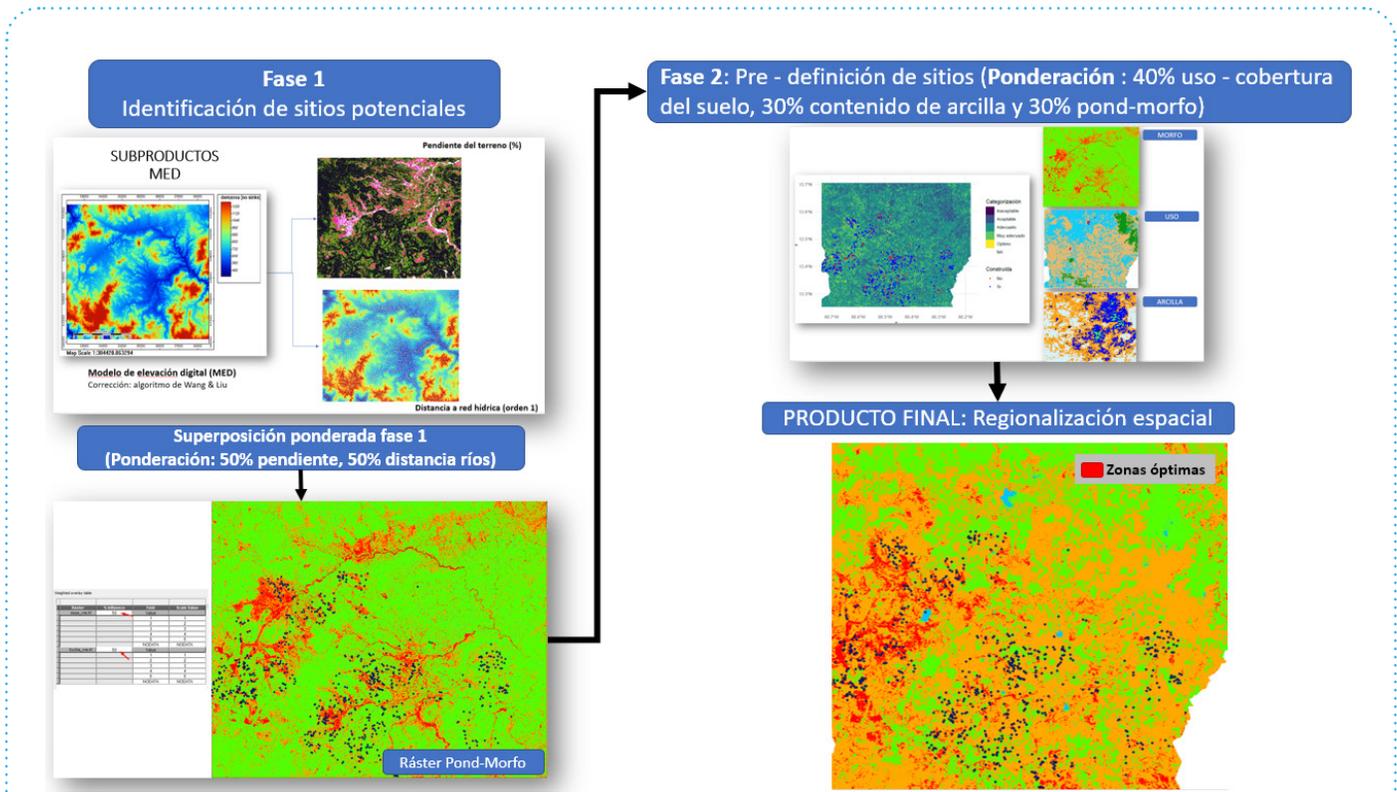


Figura 16. Resumen de fases 1 y 2 para la regionalización de zonas potenciales para el establecimiento de obras de cosecha de agua de escorrentía

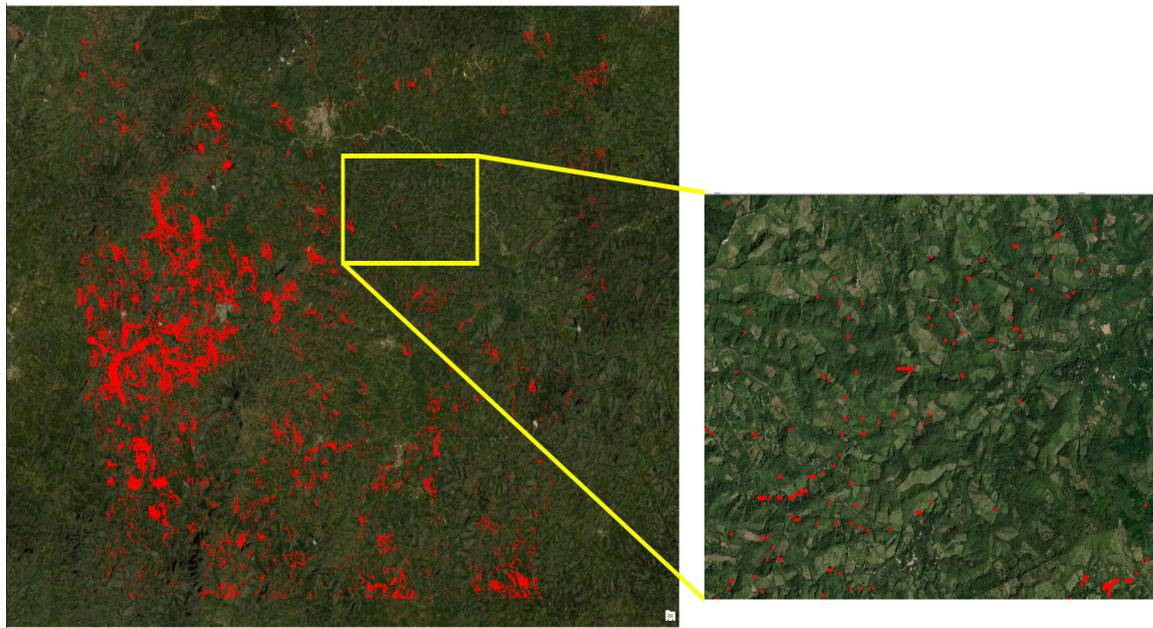


Figura 17. Zonas de regionalización espacial óptimas (categoría 5) para establecimiento de obras de cosecha de agua

3.3. FASE 3: Validación *in situ*

Esta es una fase complementaria a la herramienta y usa el producto final de esta (mapa de regionalización de zonas óptimas) para identificar en el terreno las zonas de mayor aptitud definidas en el mapa que –junto con pruebas de campo en los lugares indicados– permitirá elegir los sitios para el establecimiento de cosecha de agua. Esta fase considera dos pasos: i) identificar en el terreno las zonas de mayor aptitud, definidas por la herramienta y ii) pruebas *in situ* para escoger sitios candidatos para el establecimiento de las obras.

3.3.1. Pasos

Paso 1. Validación en el terreno

Tomando como insumo el mapa de regionalización de zonas óptimas generado por la herramienta geoespacial, se las identificará en el terreno. Los pasos sugeridos son superponer los polígonos de zonas óptimas sobre Google Earth Pro e identificarlos sobre una finca o zona de interés.

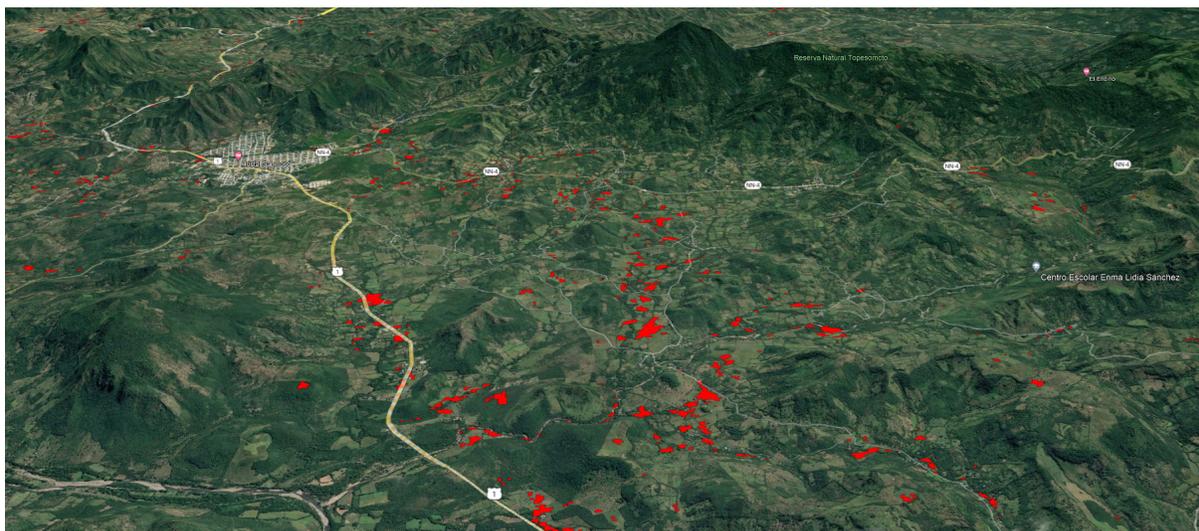


Figura 18. Mapa de regiones óptimas para el establecimiento de obras de cosecha de agua de escorrentía en la zona del proyecto Cosecha de Agua, Nicaragua. El color rojo muestra las zonas óptimas para el establecimiento de obras generadas por la herramienta geoespacial.

Paso 2. Pruebas *in situ* para definir sitios candidatos para el establecimiento de las obras

Una vez ubicado(s) el(los) sitio(s) potencial(es), se procederá a realizar pruebas *in situ* que contemplen variables que han sido consideradas como criterios para definirlos como

sitios candidatos para la construcción de obras de cosecha de agua. Estos criterios son verificación de uso de suelo, definición de valores de pendiente y pruebas de textura en suelo (contenido de arcilla).

1. Verificación de uso de suelo: La zona óptima a seleccionar debe estar próxima a un uso de suelo considerado como prioritario o a beneficiar (por ejemplo, por riego). El proyecto Cosecha de Agua cataloga el uso agropecuario como prioritario.



Figura 19. Verificación de uso de suelo para definir sitio de construcción de obra de cosecha de agua
Fuente: Franklin Ruíz

2. Definición de valores de pendiente: Por ser obras de escorrentía donde se pretende establecer los sistemas de cosecha de agua, es importante garantizar una buena área de recarga y una pendiente adecuada que tenga el suficiente nivel entre la base de la obra (vaso) y el área de riego o de uso de agua. Es necesario recordar que debe existir al menos un diferencial de altura de un metro y para eso es fundamental estimar la pendiente. Las pendientes del área de emplazamiento de la obra deben ser como máximo de 12% (superficie por donde escurre el agua) y un mínimo de entre 3 a 5%.



Figura 20. Verificación pendiente del terreno (%) para definir sitio de construcción de obra de cosecha de agua

Foto: Pedro Pablo Orozco

Método de la vara

- Para realizar la prueba de pendiente a nivel de campo puede emplearse el método de la vara.

Materiales:

- Vara o palo de 2 metros
- Instrumento nivel de cualquier tipo
- Cinta métrica
- Calculadora

Protocolo:

- Colocar la vara sobre el campo, nivelar.
- Medir la altura del suelo a la vara.
- Aplicar fórmula: $P(\%) = \left(\frac{h}{d}\right) * 100$

Donde:

h= altura del suelo a la vara (m)

d= distancia (tamaño de la vara= 2 m)

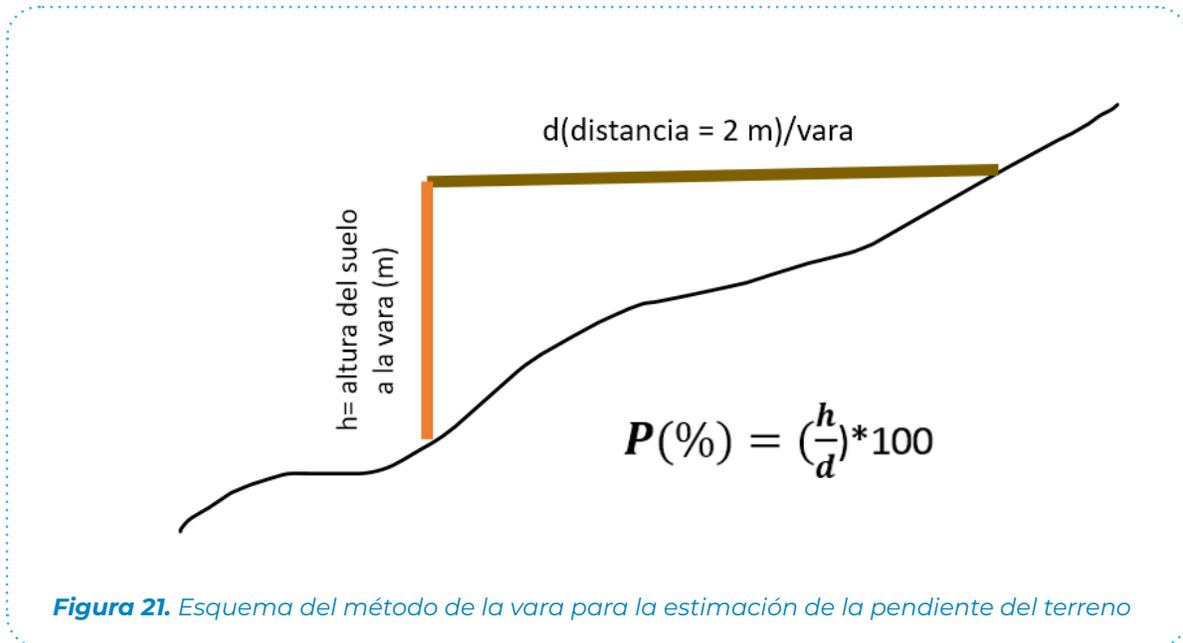


Figura 21. Esquema del método de la vara para la estimación de la pendiente del terreno

3. Pruebas de textura en suelo: Los suelos con alto contenido de arcilla son apropiados para establecer obras de cosecha de agua de escorrentía. El sitio por definir debe tener un alto contenido de arcilla en su primer metro de suelo para que, al ser compactada, impermeabilice el vaso y evite la infiltración del agua almacenada.

NOTA: Si en la finca no hay un sitio con esta condición, es mejor no construir la obra.

Una vez identificadas las zonas de mayor aptitud que han cumplido los criterios de uso prioritario y pendiente, se procederá a realizar una prueba de campo que permita descartar o confirmar un sitio¹³.

Materiales e insumos:

Herramientas para cavar y tomar muestra del suelo (pico, pala), agua y recipiente o plástico (lugar donde hacer la mezcla del suelo para determinar su elasticidad).

Protocolo:

- Hacer un hueco en el suelo de un metro en cuadro por 1,5 metros de profundidad.
- Del suelo removido tomar un puñado y hacer una prueba de elasticidad, o llenar el hueco con agua para hacer la prueba de infiltración.
- Si los resultados son buenos, con solo colocar una capa de lodo arcilloso de unos 30 cm de espesor, debidamente apelmazado, la obra podrá contener el agua por más tiempo.

13 Con base en el fascículo 2 generado por el Proyecto Cosecha de Agua: "EL SISTEMA DE COSECHA DE AGUA DE ESCORRENTÍAS".

4

Manual del usuario de la herramienta geoespacial

La herramienta consiste en un complemento para QGIS desarrollado con PyQGIS. El complemento hace uso extensivo de la caja de herramientas de procesos para acceder a los algoritmos de SAGA GIS, GDAL y los propios de QGIS. Además, permite definir zonas aptas para la ubicación de obras de captación de agua a nivel de fincas. La selección se realiza considerando una serie de criterios morfológicos, edafológicos y de cobertura del suelo.

En esta sección se presentan los pasos a seguir, junto con la descripción esquemática de insumos y procesos realizados por la herramienta (complemento de QGIS) para elegir los sitios idóneos para la cosecha de agua de escorrentía.

4.1. Insumos requeridos

Son necesarias tres capas en formato ráster (modelo de elevación digital, coberturas y usos del suelo y contenido de arcilla), las cuales deben ser reclasificadas de acuerdo con los criterios establecidos.

- **Modelo de elevación digital (MED):** Archivo en formato ráster que representa elevación en metros sobre el nivel del mar (m s. n. m) de una zona de interés. La herramienta generará como subproductos los rústeres de pendientes y distancia a orden 1, que serán reclasificados de acuerdo con criterios establecidos.¹⁴

¹⁴ **Pendiente del terreno (%)**: Definida como el grado de inclinación del terreno. Si bien puede ser expresada en grados o porcentaje, para el presente análisis será determinada en porcentaje.

Distancia a red hídrica: Con base en procesos de dirección y acumulación de flujo, se determinará la red hídrica y sus órdenes en la zona de interés. El algoritmo por usar será el de Strahler, para determinar las distancia euclídeas sobre la red hídrica de orden 1.

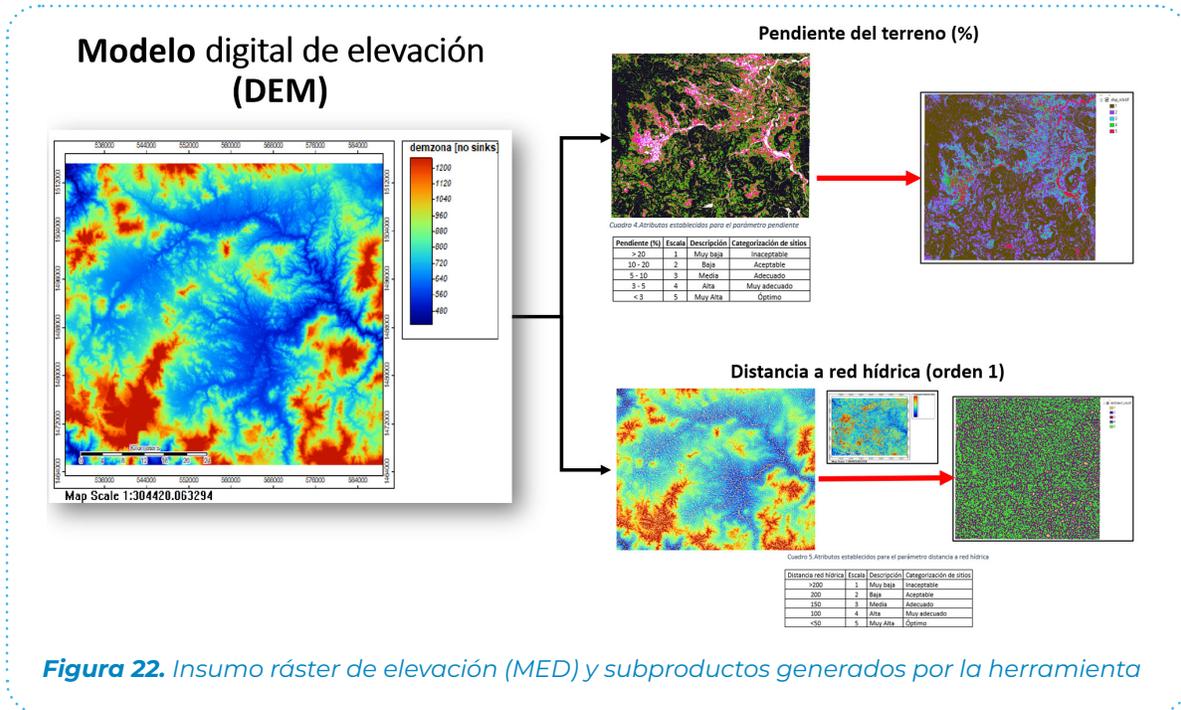


Figura 22. Insumo ráster de elevación (MED) y subproductos generados por la herramienta

- **Uso de suelo:** Archivo ráster vinculado con la cobertura y uso del suelo de la zona de interés que ha sido reclasificado según la prioridad de intervención o establecimiento de una obra de cosecha de agua. Por ejemplo, si la prioridad es construir obras para uso agropecuario, la reclasificación de este ráster (en una escala de 1-5) tendría los pixeles de uso agropecuario con valores de 5.

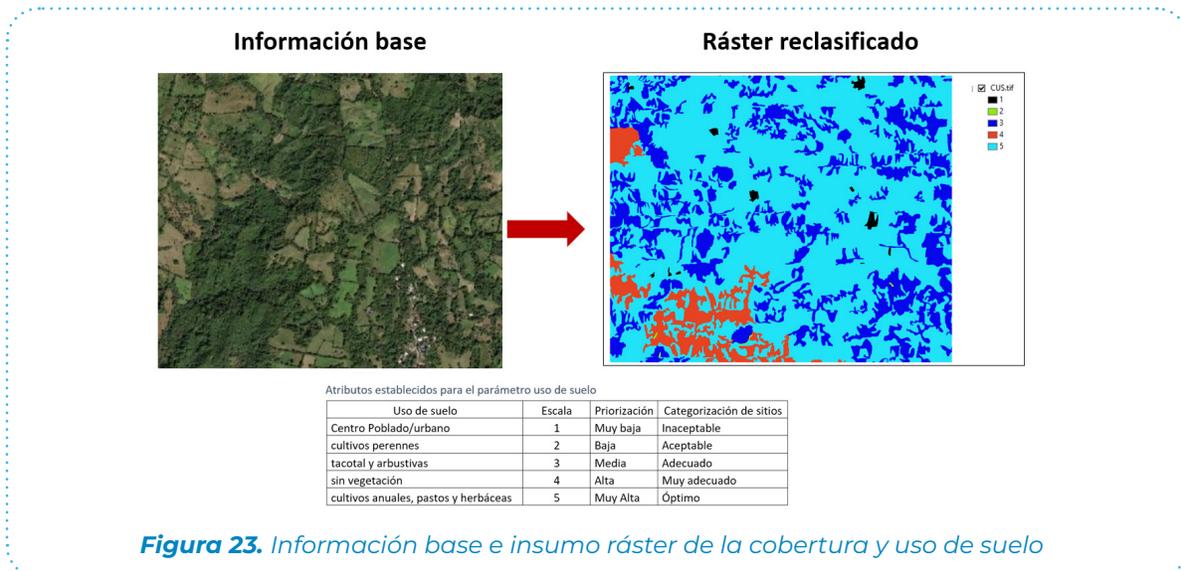
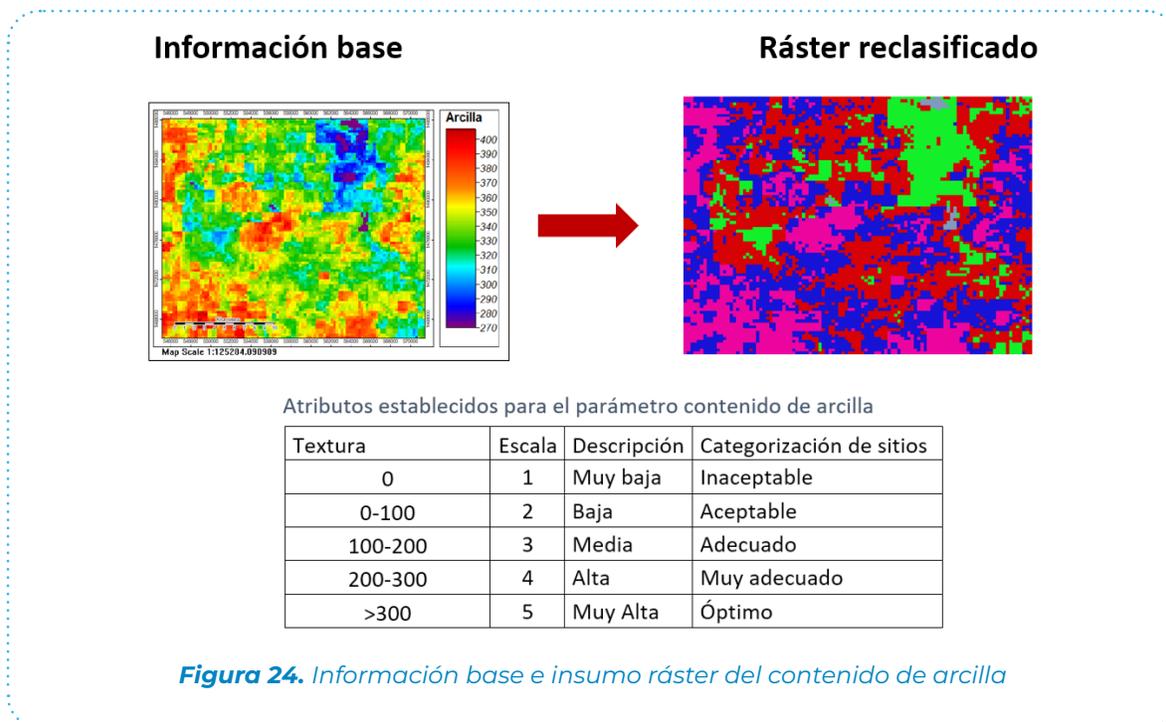


Figura 23. Información base e insumo ráster de la cobertura y uso de suelo

NOTA: Si se tiene información de coberturas del suelo en formato *shapefile*, este debe ser convertido a formato ráster y seguir el procedimiento correspondiente.

- **Contenido de arcilla:** Archivo tipo ráster vinculado con tasas de infiltración. Altos contenidos de arcilla son deseables al tener tasas bajas de infiltración en la obra a construir.

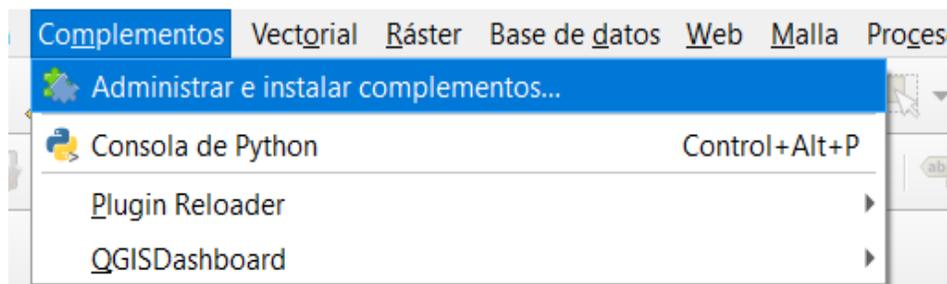


4.2. Instalación y uso de la herramienta

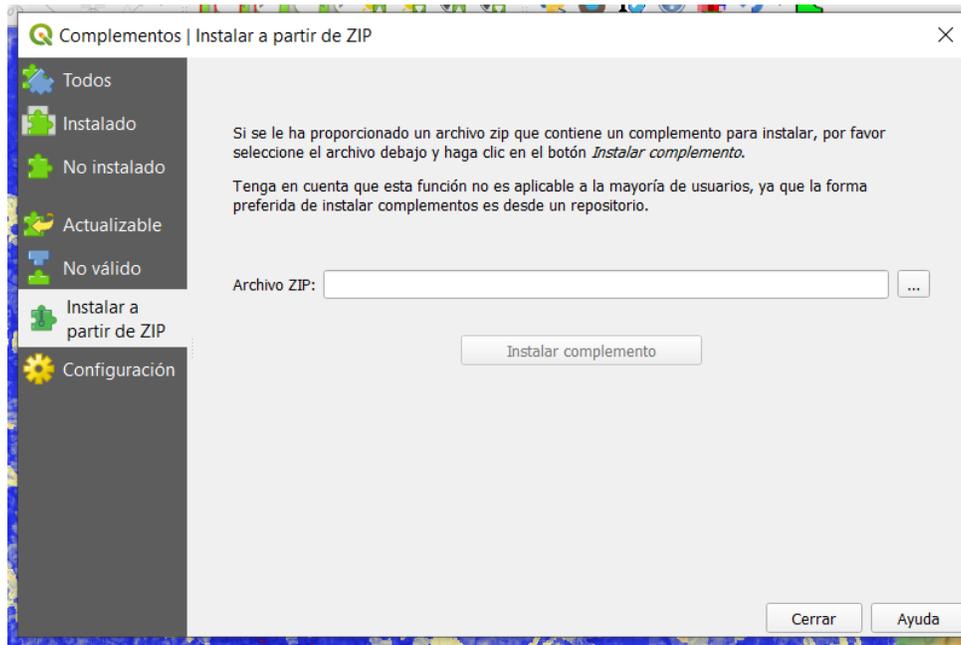
Consiste en una serie de pasos y orientaciones sobre la instalación de la herramienta o complemento de QGIS, así como también los elementos del diseño y funcionamiento que permiten al usuario conocer todo el proceso que esta desarrolla.

4.2.1. Instalación

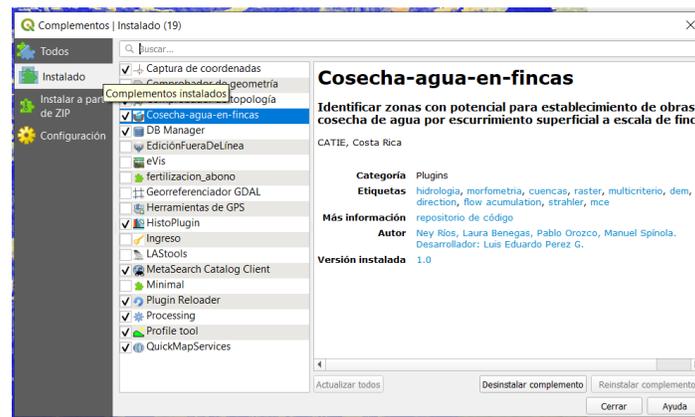
El complemento puede ser instalado mediante la opción, menú *Complementos > Administrar e instalar complementos...*



En la ventana *Complementos*, se selecciona la opción *Instalar a partir de ZIP*. Al hacer clic en el botón con tres puntos ubicado a la derecha, se despliega una caja de diálogo que permite buscar el archivo zip y seleccionarlo. Luego se hace clic en el botón *Instalar complementos* para realizar la instalación.

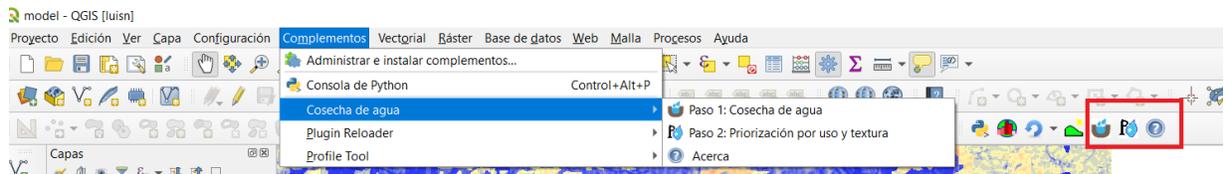


Luego de instalarlo, se debe activar el complemento. Para eso, en la ventana de *Complementos* se haga clic en la pestaña *Complementos instalados*. Después se selecciona el complemento *Cosecha de agua*, como se muestra en la imagen.



4.2.2. Interfaz de usuario

Al activar el complemento, se adiciona un submenú en el menú complementos y tres botones en la barra de botones. Todas las herramientas del complemento son accesibles mediante dicho menú o por medio de la barra de botones.



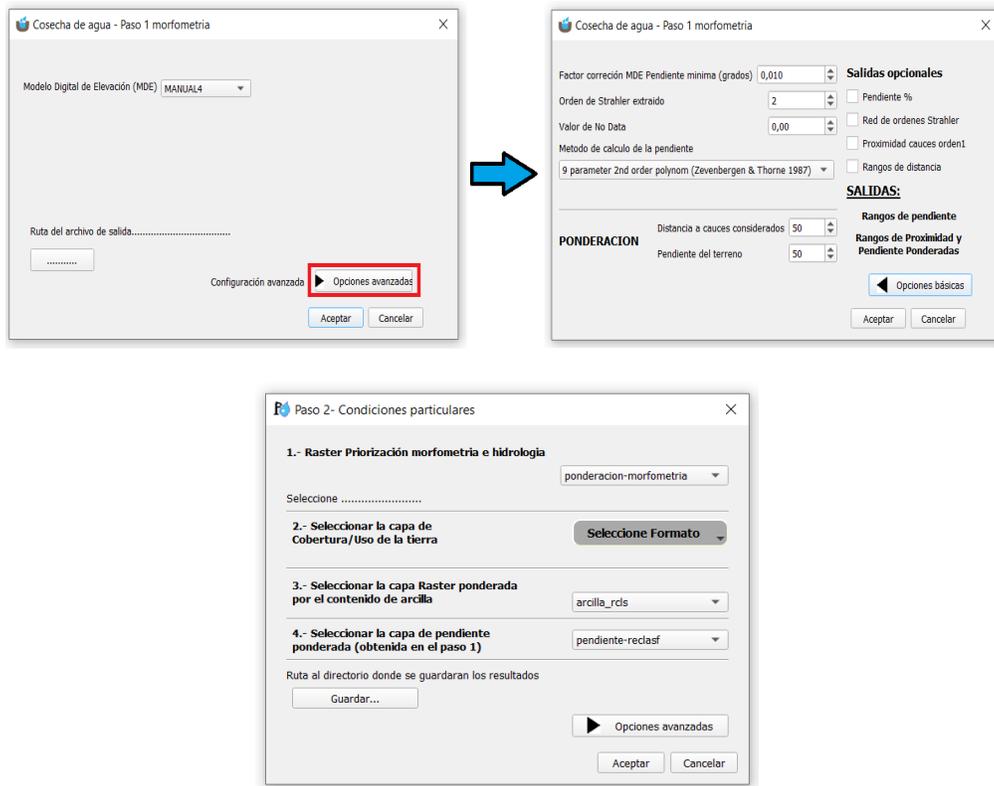
Cada botón o menú despliega una caja de diálogo. Las dos primeras opciones –cuyos nombres comienzan con Paso 1 y Paso 2, respectivamente– despliegan asistentes para la introducción de los parámetros que permitirán realizar el respectivo análisis.



Por otro lado, el submenú o botón con el nombre “Acerca” abre una ventana con información general del proyecto y autores.

4.2.2.1. Diseño

El complemento cuenta con un diseño intuitivo, mediante asistentes que requieren un mínimo de insumos y configuraciones, con salidas predeterminadas. Sin embargo, también se brinda la opción de configuración avanzada por si el usuario desea modificar los valores que tiene por defecto y personalizar el peso de las capas.



4.2.2.2. Funcionamiento

El objetivo del complemento es generar una capa ráster que muestre diversos grados de idoneidad para la ubicación de obras de captación de aguas para pequeñas fincas. Para lograrlo se debe llevar a cabo un análisis en dos fases.

- 1. Identificación de sitios potenciales:** Se realiza con base en un análisis hidrológico y geomorfológico para identificar zonas apropiadas con potencial de escurrimiento y acumulación de agua. Este proceso genera una capa ráster de zonas óptimas llamada “morfo”.
- 2. Predefinición de sitio:** Tomando en cuenta variables de priorización basadas en las condiciones particulares del territorio (contenido arcilla) y beneficiario de la obra (uso agropecuario), se combina con la capa ráster generada en la fase 1 “análisis hidrológico y geomórfico”. El resultado final es un archivo ráster de zonas óptimas para el establecimiento de obras de cosecha de agua para el territorio bajo análisis.

NOTA: Estos pasos deben ejecutarse en secuencia. Los insumos del primer paso serán requeridos para ejecutar el segundo.

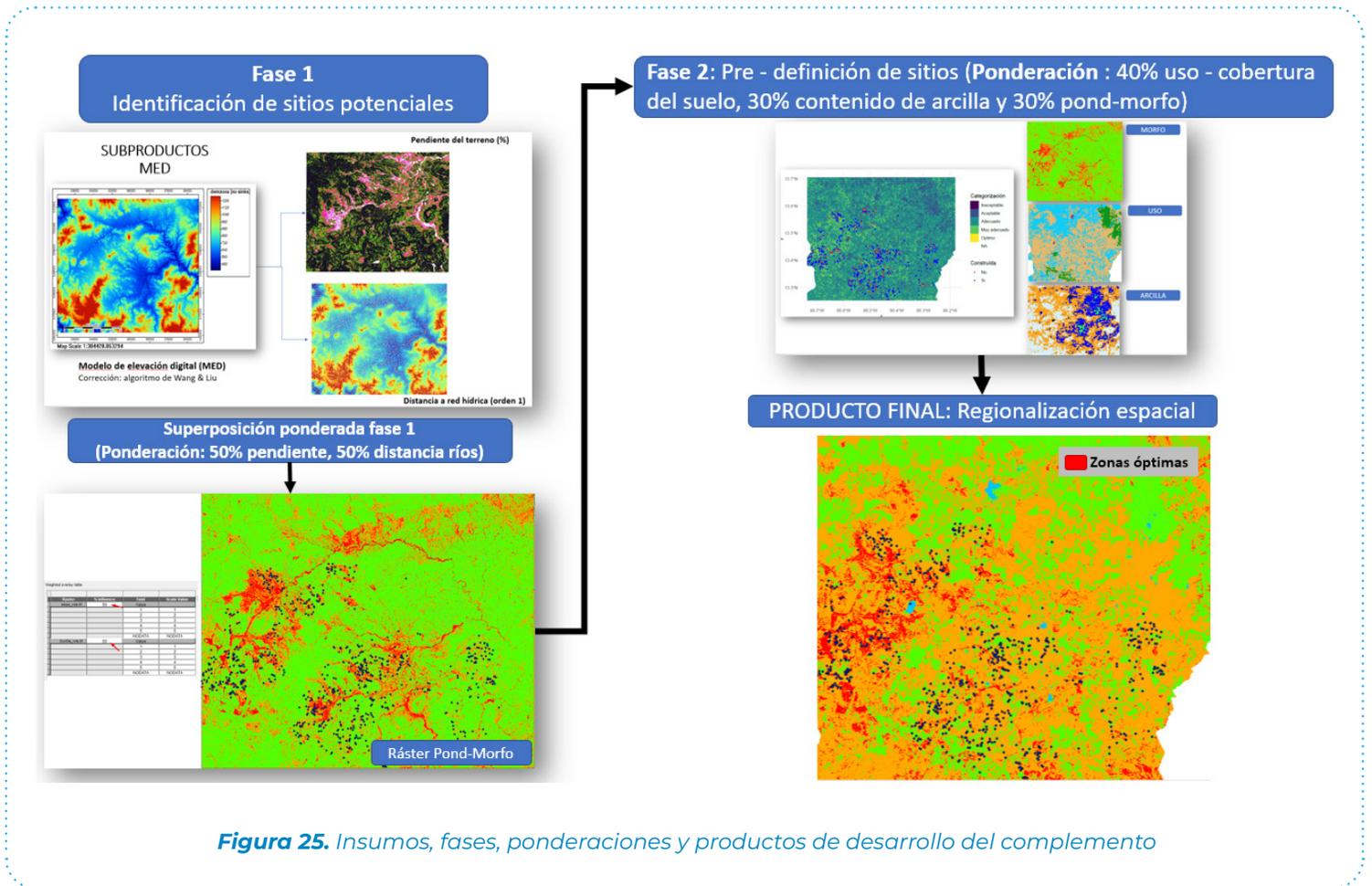


Figura 25. Insumos, fases, ponderaciones y productos de desarrollo del complemento

4.3. Pasos de ejecución de la herramienta



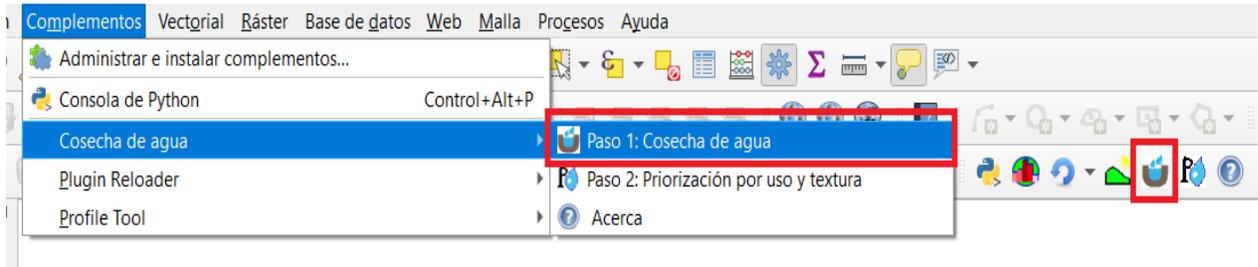
IMPORTANTE: Antes de realizar los procesos, se debe estar seguro de que los insumos geoespaciales a usar estén en la misma proyección y tengan la misma resolución espacial.

4.3.1. Fase 1. Análisis hidrológico y geomorfológico

PASOS:

1

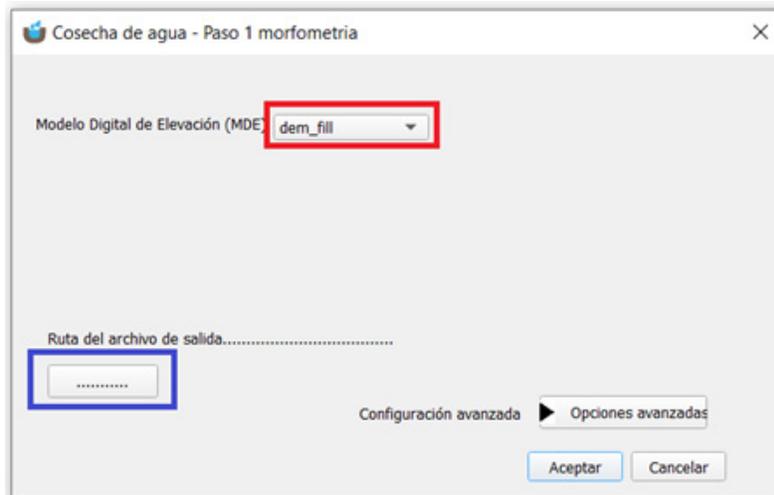
En el menú *Complementos > Cosecha de Agua* seleccionar la opción “Paso 1: Cosecha de agua”. También se puede acceder en el botón con el mismo ícono ubicado en la barra de botones.



2

Carga de insumos fase 1 y selección de carpeta de salidas

- Elegir el *modelo digital de elevaciones* del área de estudio (recuadro rojo).
- Definir la carpeta donde se guardarán los archivos producidos en el análisis (recuadro azul).
 - Al hacer clic en el botón con puntos debajo del texto *Ruta del archivo de salida*, se despliega un diálogo que permite escoger un directorio donde se guardarán los archivos de salida.
 - Por último, al hacer clic en *Aceptar*, se inicia el procesamiento. Al finalizar, las capas ráster generadas serán cargadas en la vista de QGIS.

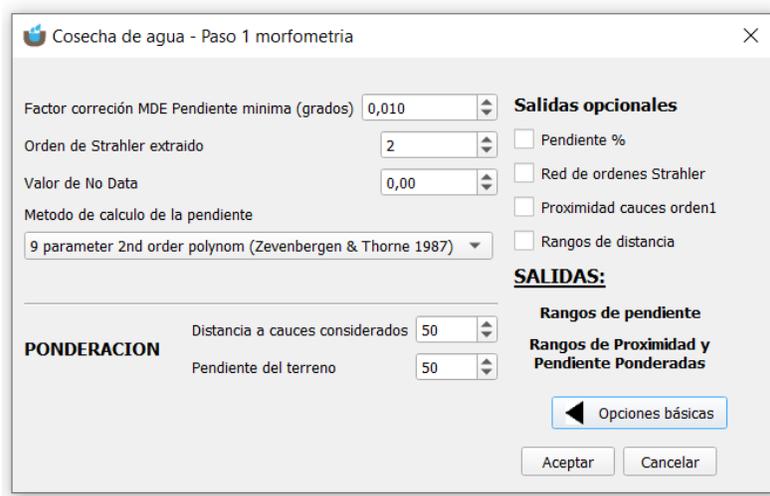


3

Configuración avanzada: Fase 1

Es importante considerar que, si bien la herramienta requiere un mínimo de insumos y configuraciones, el análisis realizado ejecuta múltiples procesos encadenados, lo que genera varios productos intermedios, como pendiente (%), red de órdenes según Strahler, proximidad a cauces orden 1 y rangos de distancia a cauces orden 1. Si se desea que dichos productos sean guardados de forma permanente y cargados en la vista de QGIS,

estos deben seleccionarse en opciones avanzadas, donde también se puede ajustar el peso en las ponderaciones que vienen por defecto.



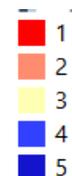
- Al hacer clic en el botón “Opciones avanzadas”, se puede visualizar y editar los diferentes parámetros configurados por defecto. También es posible seleccionar cuál de los productos intermedios generados durante el proceso se desea que sea cargado en la vista de QGIS.

RESULTADOS Fase 1

En este paso se obtendrán dos resultados:

- Ráster ponderado por morfometría: Esta capa presenta valores de 1 a 5. Los mayores valores representan zonas con mayor idoneidad para la ubicación de obras de captación de agua.
- Ráster de pendientes reclasificado

Ambas capas estarán clasificadas con valores de 1 a 5, lo que representa su mayor o menor aptitud para ubicar obras de conservación.

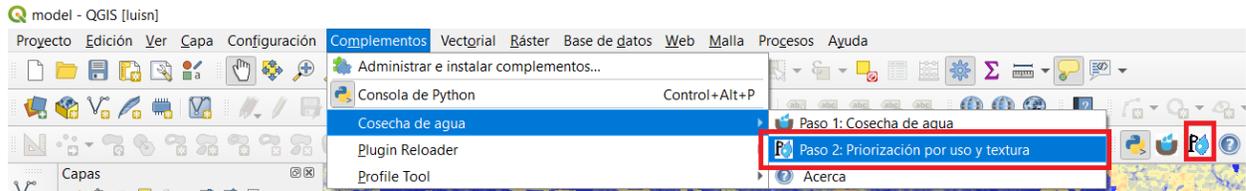


4.3.2. Fase 2: Análisis por condiciones particulares

PASOS:

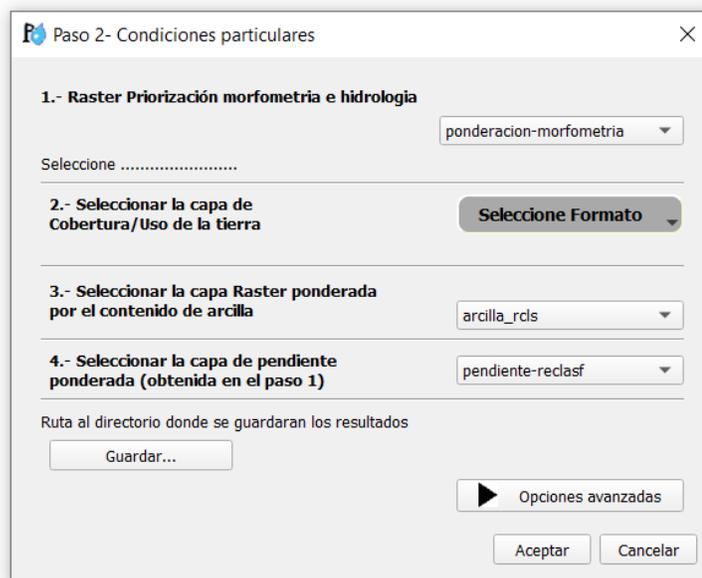
1

En el menú Complementos > Cosecha de Agua seleccionar la opción “Paso 2: Priorización por uso y textura”. También se puede acceder en el botón con el mismo ícono ubicado en la barra de botones.



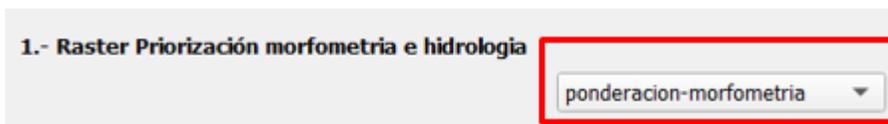
2

Carga de insumos: Como se puede observar en la caja de diálogo que se despliega, este proceso requiere un mayor número de insumos en comparación con el anterior.

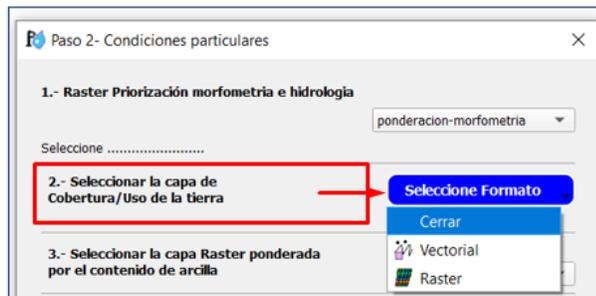


Específicamente para este proceso se debe introducir cuatro capas: dos obtenidas del proceso anterior (ráster ponderado por morfometría y ráster de pendientes reclasificado) y dos nuevas capas ráster reclasificadas del *contenido de arcilla* y *cobertura vegetal/uso*.

- En la sección 1.- “Ráster Priorización morfométrica e hidrológica”, cargar el archivo ráster “Ráster ponderación - morfometría”.



- En la sección 2.- “Seleccionar la capa de cobertura/uso de la tierra” tiene dos opciones:



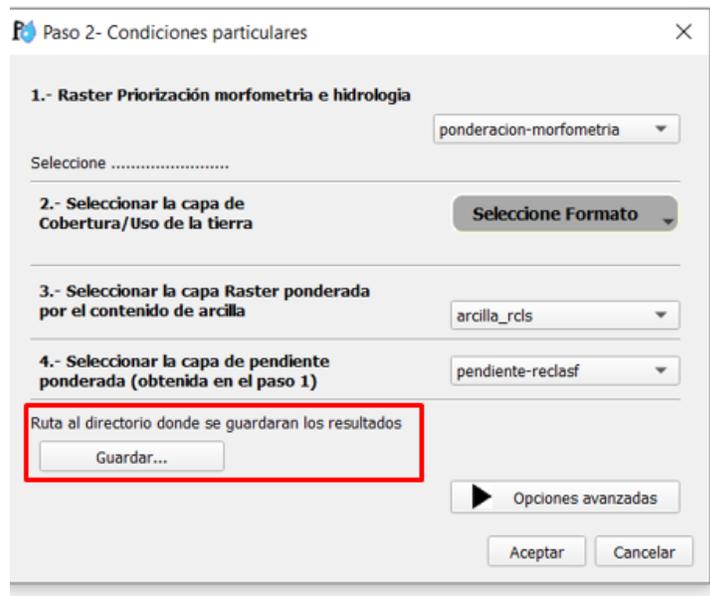
- En el caso de ráster, al hacer clic sobre el botón “Seleccione Formato”, elegir de la lista que se despliega la opción “Ráster” y cargar la capa de uso de suelo reclasificada.
- En el caso de tener un archivo *shapefile*, al hacer clic sobre el botón “Seleccione Formato”, escoger de la lista que se despliega la opción “Vectorial”. El asistente se expandirá e incorporará las listas que permiten seleccionar la capa vectorial, en cualquiera de los formatos soportados por QGIS (*shapefile*, *geopackage*, otros). Bajo esta opción se deberá elegir el campo de la tabla de atributos de dicha capa con la ponderación de 1 a 5 de las *coberturas/uso* presentes.
- En la sección 3.- “Seleccionar la capa ráster ponderada para el contenido de arcilla” se debe seleccionar la capa ráster reclasificada vinculada con el contenido de arcilla.



- En la sección 4.- “Seleccionar la capa de pendiente ponderada” se debe escoger la capa ráster reclasificada de pendientes generada en el paso 1.



- Luego de elegir en las listas las capas requeridas y definir el directorio donde se guardarán los archivos de salida, se puede hacer clic en “Aceptar” para que se realicen los procesos.



3

Configuración avanzada del paso 2

- Al hacer clic en el botón “Opciones avanzadas”, se puede visualizar y editar los diferentes parámetros configurados por defecto. Es decir, permiten al usuario editar los pesos asignados a las capas que forman parte de la superposición ponderada. También es posible modificar los criterios para generar la capa de áreas óptimas en zonas de baja pendiente. Por defecto, el complemento determina las zonas con aptitud mayor o igual a 5, ubicadas en pendientes menores a 5%.
- En el caso de que el usuario introduzca una capa vectorial como entrada para cobertura vegetal/uso de la tierra, puede seleccionar la opción “Uso de la tierra” en la parte inferior del asistente. De esta manera, se añadirá la capa ingresada rasterizada en la vista de QGIS al finalizar los procesos.
- Al hacer clic en la flecha y texto “opciones básicas”, se regresa al menú principal.

Paso 2- Condiciones particulares

Ponderación:

1.- Ponderación de morfometria 30

2.- Uso de la tierra 40

3.- Textura del suelo 30

**Configuración del rango de aptitud de cosecha y el de pendiente.
Se consideraran pendientes con % inferiores al rango seleccionado:**

Rango de aptitud cosecha de agua menor o igual a 5 El resultado por defecto considera zonas optimas aquellas con una aptitud igual a 5 y pendiente inferior a 5%.

Rango de pendiente <= 5 % En esta sección puede configurar el rango de aptitud y de pendiente

Cargar las capas rasterizadas en el mapa

Uso de la tierra

Opciones basicas

Aceptar Cancelar

RESULTADOS Fase 2

En esta etapa se producen dos nuevas capas ráster.

- Capa de aptitud de cosecha, la cual presenta valores de 1 a 5. Los mayores valores representan las zonas más idóneas para la cosecha de agua de escorrentía.
- El producto final del complemento es una capa que precisa las zonas con mayor idoneidad. Esto se realiza determinando las zonas óptimas con pendientes inferiores a 5%.

5

Alcances y limitaciones de la herramienta

Las técnicas geoespaciales que se desarrollan mediante el *plugin* ejecutan una serie de procesos internos basados en álgebra de mapas y ponderación geoespacial que toma en cuenta insumos topográficos, hidrológicos, de textura y prioridad de intervención que –al final– permite definir regiones con potencial óptimo para el establecimiento de cosechas de agua. Las regiones definidas son zonas en las que es viable el establecimiento de infraestructura orientada a captar/cosechar agua de escorrentía a nivel de fincas o zonas determinadas en paisajes o territorios para dichos fines.

El primer paso se enfoca en un “análisis hidrológico y geomorfológico” toma como insumo principal el modelo de elevación digital (MED) y tiene como subproductos información de pendientes, órdenes de red hídrica, proximidad a cauces en formatos ráster y su respectiva reclasificación con base en criterios técnicos.

El segundo paso se orienta en el análisis de las condiciones particulares del área de interés, como condiciones texturales y uso de suelo prioritario. Las condiciones texturales se enfocan en el contenido de arcilla. Valores altos son deseables para evitar pérdidas considerables por infiltración. Por su parte, el uso de suelo prioritario implica la selección de un uso o cobertura de suelo a beneficiar o donde se quiere establecer la obra de cosecha de agua, por ejemplo, los usos agropecuarios. El producto final (en formato ráster) muestra regiones en el territorio que cumplen los óptimos valores de las capas espaciales determinadas para el establecimiento de obras de cosecha de agua por escorrentía superficial.

En síntesis, la herramienta permite definir regiones o zonas apropiadas para el establecimiento de obras de cosecha de agua de escorrentía funcionales con base en variables topográficas, hidrológicas, edáficas y de priorización para un área de interés. Este es el insumo principal para definir a nivel de campo los sitios exactos para establecer las obras de cosecha de agua y es aquí donde el trabajo de gabinete, previo a la verificación de campo, reducirá el tiempo de inspección y selección de sitios potenciales. Esta definición *in situ* debe tomar en cuenta las particularidades del lugar.

Algunas técnicas para emplear a nivel de campo en esta verificación pueden ser el método del puño para corroborar y determinar el contenido de arcilla (textura al tacto), el uso de clinómetro (o eclímetro), método de la vara para definir pendiente y la observación visual para corroborar el uso/cobertura de suelo. Algunos aspectos adicionales para verificar son la presencia de riesgos como deslizamientos u otros que se pueden determinar localmente y en conjunto con los productores y usuarios de estos lugares, así como la accesibilidad o estado de caminos para llegar a ellos.

Este tipo de verificación *in situ* es necesaria con cualquier tipo de herramienta que se emplee a nivel de gabinete y que busque optimizar el trabajo de campo, siendo imposible eliminar este proceso si se desea implementar realmente proyectos o iniciativas de cosecha de aguas para la adaptación a la variabilidad y cambio climático en sitios vulnerables como, por ejemplo, el Corredor Seco Centroamericano.

La herramienta (*plugin*) para identificar regiones óptimas para obras de cosecha de agua ha sido desarrollada para condiciones tropicales, en las que los patrones de precipitación garantizan la operatividad de las obras de cosecha de agua de lluvia. Al no incluir en su versión actual (inicial) la variable climática de precipitación ni tampoco los modelos estructurales de las obras de cosecha de agua, no es posible determinar el volumen potencial de agua de lluvia a captar. Además, si no se consideran variables socioeconómicas, no es posible discriminar con más detalle dichos factores que potencialmente podrían facilitar el acceso y atención a ciertos grupos sociales específicos.



6

Conclusiones

- La herramienta (*plugin*) ha sido desarrollada para condiciones tropicales, en las que patrones de precipitación garantizan la operatividad de las obras de cosecha de agua de lluvia.
- Las variables, criterios técnicos, ponderaciones y fases que contempla el proceso metodológico desarrollado permiten utilizar los procesos naturales de escorrentía superficial a nivel territorial e incorporarlos con análisis de condición y priorización de sitio para la identificación potencial de obras de cosecha de agua de escorrentía.
- Las variables de pendiente y distancia a red hídrica del orden 1 juegan un papel determinante para definir sitios potenciales de obras enfocadas en cosecha de agua por escorrentía.
- El uso de modelos de elevación digital de alta precisión como el AW3D30 mejoran significativamente los análisis espaciales morfométricos.
- Variables como curvatura del terreno e índice de humedad topográfica, consideradas en análisis preliminares, tienen poca relevancia en la definición de sitios potenciales para obras de cosecha de agua por escorrentía a escalas menores. Al parecer, el proceso de definición de la red hídrica absorbe características hidráulicas deseadas de dichas variables.
- Las ponderaciones de variables utilizadas con base en modelos estadísticos inferenciales que toman en cuenta sitios de obras establecidos y en funcionamiento han ayudado a establecer ponderaciones apropiadas en las variables consideradas.
- De acuerdo con la regionalización que brinda la herramienta en este manual, las obras instaladas por el proyecto Cosecha de Agua se ubican en zonas consideradas óptimas y muy adecuadas, por lo cual se concluye que han sido ubicadas en sitios idóneos.
- Disponer de la mayor resolución espacial posible de las variables puede mejorar el proceso de regionalización de zonas óptimas para el establecimiento de obras de cosecha de agua.



7

Recomendaciones

- La inclusión de variables climáticas puede mejorar el análisis. Por ejemplo, incorporar una variable del potencial de evapotranspiración permitiría estimar la pérdida potencial de agua por esta variable. Asimismo, la inclusión de variables climáticas históricas o proyectadas puede brindar información de vulnerabilidad y riesgo climático operativo de las obras a establecer.
- Para evitar errores en la ejecución de la herramienta se sugiere usar una versión estable de QGIS¹⁵ y guardar las salidas en una carpeta de ruta larga. Se recomienda crear una vinculada con una unidad o disco (por ejemplo “C:\salidasHerramienta”).
- En lo posible, los insumos geoespaciales a emplear con la herramienta geoespacial deben ser del tipo ráster y de fuentes oficiales y validadas. Deben tener la misma proyección.
- Se sugiere explorar usos alternos de la herramienta (fases de análisis y productos generados), relacionados con los análisis territoriales e hidrológicos.

¹⁵ Disponible en: <https://qgis.org/es/site/forusers/download.html>

8

Referencias bibliográficas

- Adham, A; Riksen, M; Ouassar, M; Ritsema, O. 2016. Identification of suitable sites for rainwater harvesting structures in arid and semi-arid regions: A review. *International Soil and Water Conservation Research* 4(2):108-120. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2016.03.001>.
- Aghaloo, K; Chiu, Y.R. 2020. Identifying optimal sites for a rainwater-harvesting agricultural scheme in Iran using the Best-Worst Method and fuzzy logic in a GIS-based decision support system. *Water* 12(7):1913. Disponible en <https://doi.org/10.3390/w12071913>.
- Al-Adamat R; Diabat A; Shatnawi G. 2010. Combining GIS with Multicriteria Decision Making for Siting Water Harvesting Ponds in Northern Jordan. *Journal of Arid Environments* 74(11):1471-77. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2010.07.001>
- Al-Adamat, R. 2008. GIS as a decision support system for siting water harvesting ponds in the Basalt Aquifer/ NEJordan. *Journal of Environmental Assessment Policy and Management* 10(02):189-206.
- Cáceres, J. 2016. Localización óptima de zonas potenciales para cosecha de agua lluvia en la zona sur de Honduras, año 2016. *Revista Ciencias Espaciales* 10(1):158-176.
- Congalton, R.G. 1997. Exploring and evaluating the consequences of vector-to-raster and raster-to-vector conversion, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 63(4):425-434.
- FAO. 2012. Estudio de caracterización del corredor seco centroamericano. Países CA-4. Tomo 1. Acción contra el hambre, Unión Europea, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FA). Roma, Italia.
- Hannah, L; Donatti, C.I; Harvey, C.A; Alfaro, E; Rodríguez, D.A; Bouroncle, C; Castellanos, E; Díaz, F; Fung, E; Hidalgo, H; Imbach, P. Läderach, P; Landrum, J; Solano, A. 2016. Regional modeling of climate change impacts on smallholder agriculture and ecosystems in Central America. *Climatic Change* 141(1):29-45. DOI: 10.1007/s10584-016-1867-y.
- Imbach, P; Beardsley, M; Bouroncle, C; Medellín, C; Läderach, P; Hidalgo, H; Alfaro, E; Van Etten, J; Allan, R; Hemming, D. Stone, R; Hannah, L. and Donatti, C. I. 2017. Climate change, ecosystems and smallholder agriculture in Central America: an introduction to the special issue. *Climatic Change* 141(1):1-12. DOI: 10.1007/s10584-017-1920-5.
- Imbach, P; Chou, SC; Lyra, A; Rodrigues, D; Rodríguez, D; Latinovic, D; Siqueira, G; Silva, A; Garofolo, L; Georgiou, S. 2018. Future climate change scenarios in Central America at high spatial resolution. *PLoS ONE* 13(4): e0193570. DOI: 10.1371/journal.pone.0193570.
- Ummenhofer, CC; Meehl, GA. 2017 Extreme weather and climate events with ecological relevance: a review. *Phil. Trans. R. Soc. B* 372: 20160135. DOI: 10.1098/rstb.2016.0135.
- Gotlieb, Y; Pérez-Briceño, P; Hidalgo, H; Alfaro, E. 2019. The Central American Dry Corridor: a consensus statement and its background. *Revista Yu'am* 3(5):42-51.

- Kahinda, J.M; Lillie, E.S.B; Taigbenu, A.E; Taute, M; Boroto, R.J. 2008. Developing suitability maps for rainwater harvesting in South Africa. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* 33(8):788-799.
- Malczewski, J. 2004. GIS-based land-use suitability analysis: a critical overview. *Progress in Planning* 62(1):3-65.
- Mugo, G.M; Odera, P.A. 2019. Site selection for rainwater harvesting structures in Kiambu County-Kenya. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science* 22(2):155-164. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2018.05.003>
- Valencia J; Espinosa H; Garzón D; Guevara E; Leverón S; Quintero M. 2020. Manual de Usuario de AGRI-Fuentes Mundiales. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). Cali, Colombia. 41 p.
- Wade, T.C; Wickham, J.D; Nash, M.S; Neale, A.C; Riitters, K.H; Jones, K.B. 2003. A comparison of vector and raster GIS methods for calculating landscape metrics used in environmental assessments. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 69(12):1399-1405.
- Wu, R.S; Molina, G.L.L; Hussain, F. (2018). Optimal sites identification for rainwater harvesting in northeastern Guatemala by analytical hierarchy process. *Water Resources Management* 32(12):4139-4153.

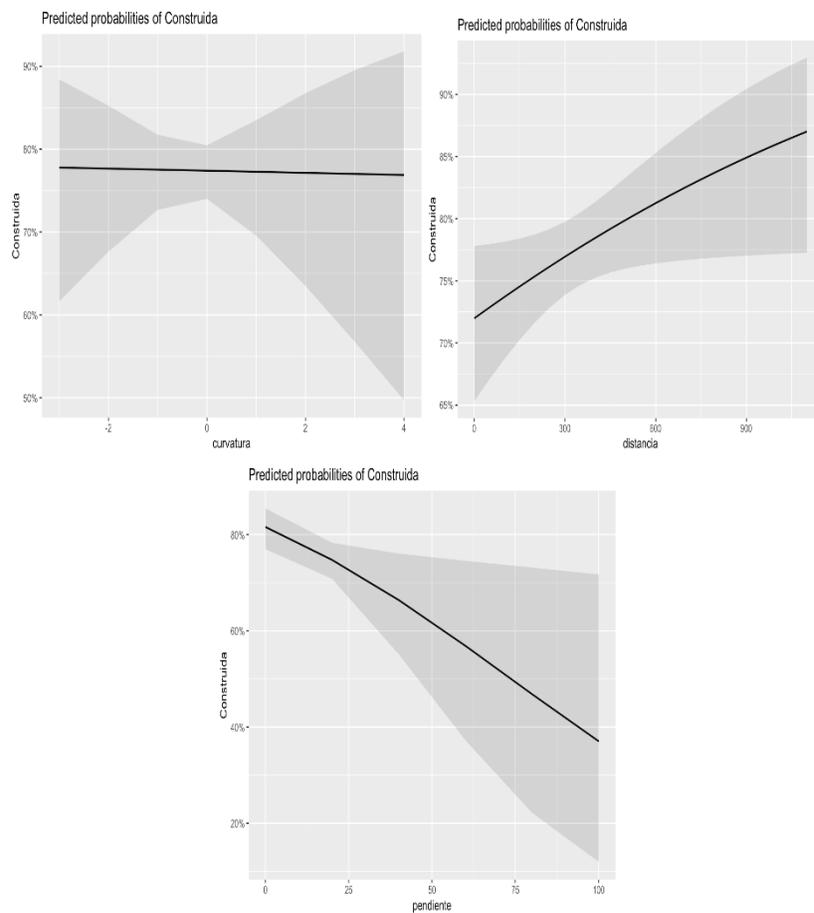
9

Anexos

Modelos estadísticos predictivos

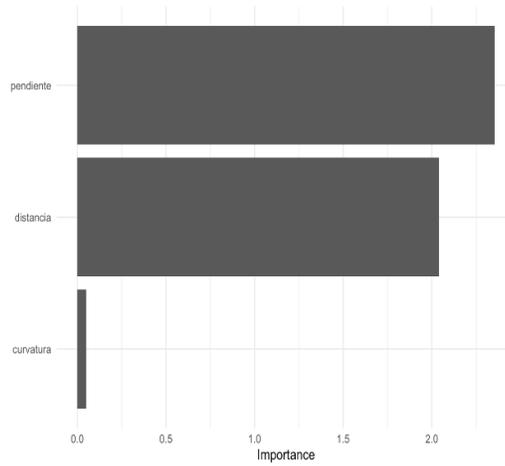
Fase 1

\$curvatura- distancia - pendiente



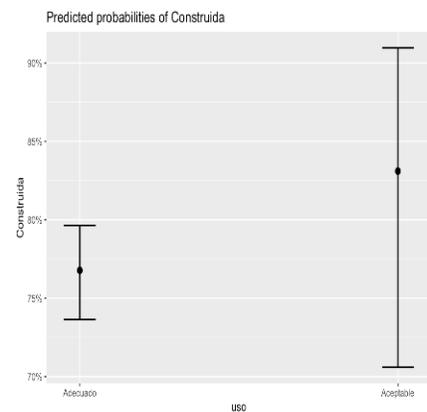
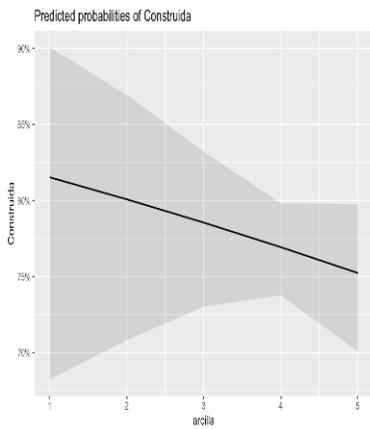
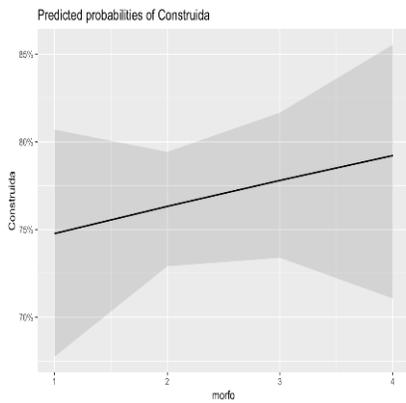
Importancia de las variables

Variable	Sign	porc
pendiente	NEG	0.53
distancia	POS	0.46
curvatura	NEG	0.01



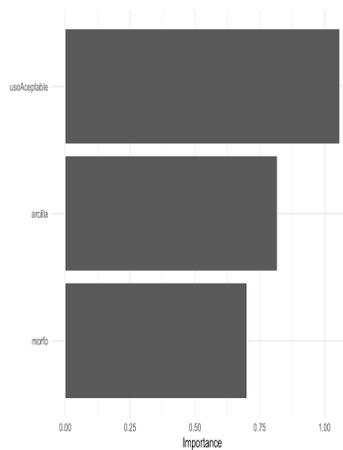
Fase 2

\$morfo -contenido arcilla - uso



Importancia de las variables

Variable	Sign	porc
Cobertura y uso del suelo	POS	0.41
Contenido de arcilla (%)	NEG	0.32
Morfo (variables morfométricas/Fase 1)	POS	0.27

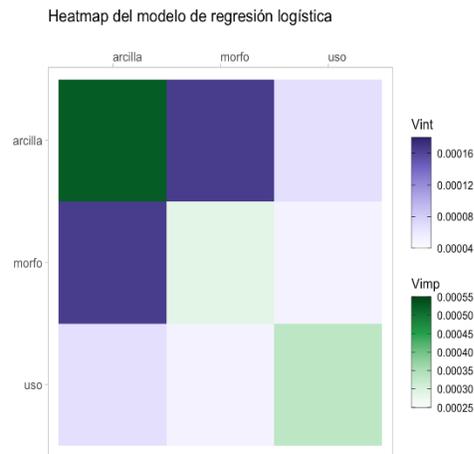


```
set.seed(101)

viFit_morfo <- vivi(
  fit = mod_morfo,
  data = df_morfo,
  response = "Construida",
  gridSize = 10,
  importanceType = NULL,
  nmax = 100,
  reorder = TRUE,
  class = 1,
  predictFun = NULL
)

## Agnostic variable importance method used.
## Calculating interactions...

viviHeatmap(mat = viFit_morfo) + ggtitle("Heatmap del modelo de regresión logística")
```



El valor de importancia de la variable (Vimp) se utiliza para expresar (en una cantidad escalar) el grado en que una variable afecta el valor de la respuesta a través del modelo elegido. La interacción de variables (Vint) es una cantidad escalar que mide el grado en que dos (o más) variables se combinan para afectar a la variable de respuesta. Se destacan por importancia la variable arcilla y por interacción, la variable morfo.



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Cooperación Suiza
en América Central



Solutions for the Inclusive Green Development
Soluciones para el Desarrollo Verde Inclusivo

CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza) es un centro regional dedicado a la investigación y la enseñanza de posgrado en agricultura, manejo, conservación y uso sostenible de los recursos naturales. Sus miembros son Belice, Bolivia, Colombia, Costa Rica, El Salvador, Guatemala, Honduras, México, Nicaragua, Panamá, Paraguay, República Dominicana, Venezuela y el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA).



Solutions for the Inclusive Green Development
Soluciones para el Desarrollo Verde Inclusivo

Sede Central, CATIE
Cartago, Turrialba, 30501
Costa Rica
Tel. + (506) 2558-2000

www.catie.ac.cr

ISBN: 978-9977-57-782-1



9 789977 577821