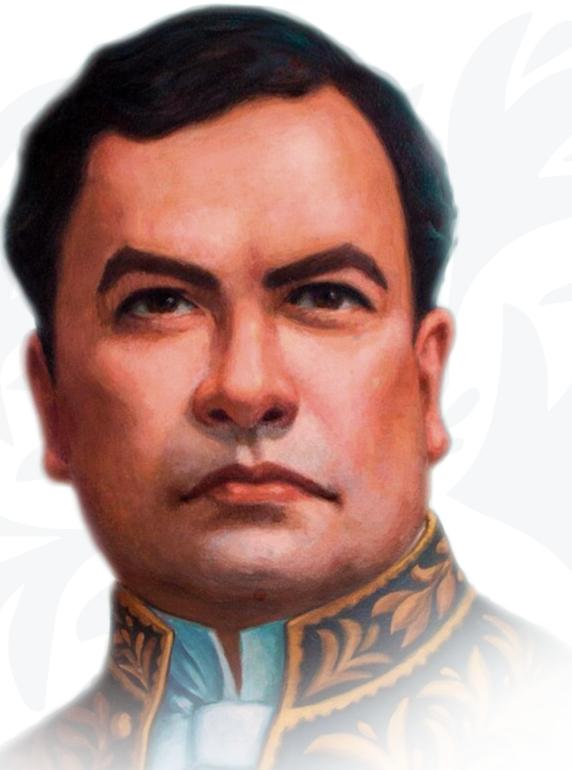


RAÍCES

Revista de Ciencias Sociales y Políticas

Enero - Junio | Año 9 N° 17. 2025



Estudios *Interdisciplinarios*

Análisis Multicriterio para Expansión Urbana
en la Unidad Hidrográfica 95-291366,
cuenca sur de Managua, Nicaragua

- Lisseth Blandón Chavarría
- María Alvarado López



Año 9. Enero-Julio 2025
Fecha de recepción: 27/01/2025
Fecha de aceptación: 20/03/2025

DOI:10.5377/raices.v17i9.20700

Análisis Multicriterio para Expansión Urbana en la Unidad Hidrográfica 95-291366, cuenca sur de Managua, Nicaragua

Multicriteria Analysis for Urban Expansion in Hydrographic Unit 95-291366, southern basin of Managua, Nicaragua

Lisseth Carolina Blandón Chavarría ●

lblandon@unan.edu.ni
<https://orcid.org/0000-0003-4125-0332>
Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua
(UNAN - Managua)

María de Jesús Alvarado López ●

mariaalvaradolopez03@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-1904-3989>
Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua
(UNAN - Managua)

Resumen

El análisis multicriterio es una herramienta esencial usada en estudios de expansión urbana, como método idóneo para evaluar las posibles zonas aptas para diferentes proyectos urbanos. El criterio principal para esta investigación es la aptitud del suelo que evalúa las características del territorio en función de su capacidad de uso para la construcción tomando en cuenta tres factores: Pendiente, litología y estabilidad de ladera, las cuales se estimaron haciendo uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG), y se determinaron zonas aptas, apta con restricciones y no aptas.

Acorde con los resultados se encontró que las zonas con menor aptitud se encuentran al sur de la cuenca, lo que coincide con pendientes mayores a 30 grados, indicando que son zonas escarpadas con posibles eventos de inestabilidad de laderas y suelos con baja cohesión. En lo que respecta a las zonas con mejor aptitud están localizadas al norte de la cuenca, y se caracterizan por ser zonas llanas, con materiales estables para el establecimiento de zonas urbanas. El objetivo fundamental de esta investigación es realizar un análisis multicriterio que muestre las zonas más seguras a urbanizar. Es importante considerar que, la planificación urbana y los estudios vinculados se deben de realizar de manera multidisciplinaria y holística.

Palabras clave: *Aptitud del suelo, SIG, análisis multicriterio, expansión urbana, áreas prioritarias.*

Abstract

Multicriteria analysis is an essential tool used in urban expansion studies, as an ideal method for evaluating potential suitable areas for different urban projects. The main criterion for this research is soil suitability, which assesses the characteristics of the territory based on its capacity for construction, taking into account three factors: slope, lithology, and slope stability. These factors were estimated using Geographic Information Systems (GIS). Suitable areas, suitable with restrictions, and unsuitable areas were determined.

According to the results, it was found that the least suitable areas are located in the south of the basin, which coincides with slopes greater than 30 degrees, indicating that these are steep areas with potential slope instability and low-cohesion soils. The most suitable areas are located in the north of the basin and are characterized by being flat areas with stable materials suitable for urban development. The fundamental objective of this research is to conduct a multicriteria analysis that identifies the safest areas for urban development. It is important to consider that urban planning and related studies must be carried out in a multidisciplinary and holistic manner.

Keywords: *: Land suitability, GIS, multicriteria analysis, urban expansion, priority areas.*

Introducción

La expansión urbana sin planificación en la actualidad representa uno de los grandes desafíos en la ordenación del territorio y la sostenibilidad de los recursos naturales. (Principi, 2021) menciona que en las últimas décadas la temática de expansión urbana ha adquirido gran relevancia en los estudios territoriales, desde el ámbito global al local debido a que se ha convertido en un fenómeno que está alterando significativamente las estructuras de las ciudades en todo el mundo. Este acelerado crecimiento de las ciudades tiene impactos ambientales en el territorio entre ellos aumento en la impermeabilización de los suelos, aumento de desechos domésticos que contaminan las aguas superficiales, aumento en la demanda en servicios básicos y una presión mayor sobre el recurso agua. Nicaragua, en especial la ciudad de Managua ha experimentado un crecimiento “sin procesos de planificación, por lo que la expansión se dio de forma descontrolada, en bajas densidades, con altos consumos de suelos rurales y suburbanos, y sin las provisiones necesarias en infraestructura y servicios básicos” BID (2013, p.51) citado por (Guerrero y otros, 2021).

Ante esta problemática, la elaboración de propuestas de expansión urbana resilientes y planificadas se vuelve crucial, para ello la implementación del análisis multicriterio en el campo de la planificación física del territorio integrando los Sistemas de Información Geográfica (SIG) han abierto una interesante vía metodológica al tratamiento de la problemática de la organización territorial. La complejidad del medio natural, evidenciada por la intervención de múltiples variables de carácter interactivo, y su respuesta a la acción humana, ha encontrado en la metodología de «Evaluación Multicriterio» (AMC, por sus siglas en inglés) un modelo teórico de gran operatividad y que según (Guerrero y otros, 2021) esta herramienta analiza el territorio y facilita la elección de zonas aptas para distintos fines, siendo una técnica enfocada a resolver un problema donde intervienen distintos criterios, con el fin de elegir la solución óptima.

Esta investigación se enmarca en el Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) número 11: Ciudades y Comunidades Sostenibles, teniendo como objetivo presentar una propuesta de expansión de áreas urbanas en la unidad hidrográfica 95-291366, zona de gran interés por ubicarse sobre el acuífero Las Sierras, uno de los principales reservorios de agua del país. Para lograr un desarrollo sostenible y seguro, en la determinación de las áreas de expansión se consideró evaluar la pendiente del terreno (Inclinación y posibles riesgos), la litología (que analiza las características del suelo y su capacidad para permitir la construcción de viviendas) y la estabilidad de las laderas (para identificar zonas propensas a deslizamientos).

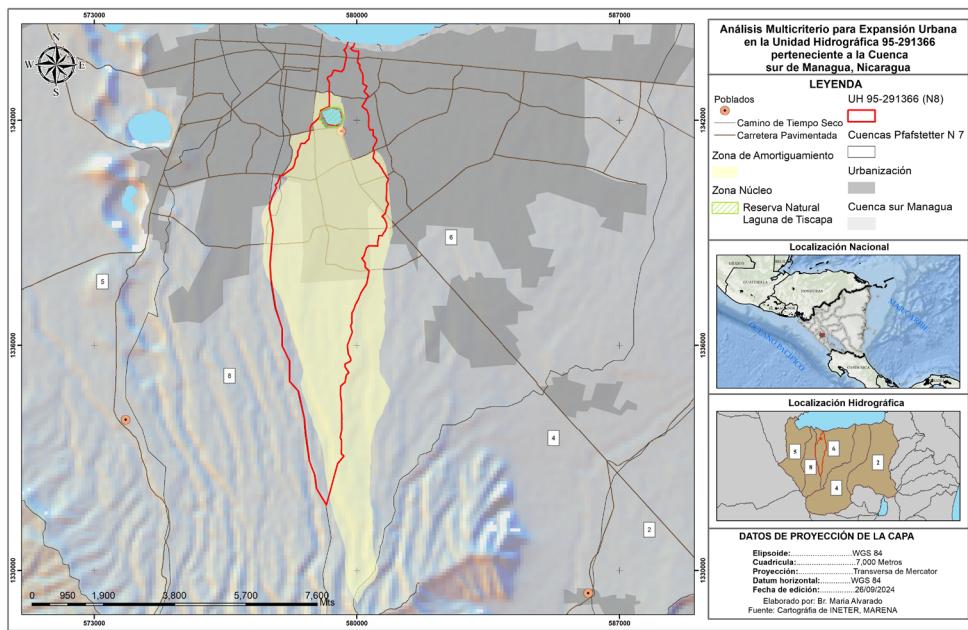
En este sentido, la presente investigación tiene como objetivo específico, evaluar la aptitud del territorio de la unidad hidrográfica 95-291366 para la expansión urbana, mediante un análisis multicriterio basado en la aptitud física; como resultado principal se obtuvieron mapas de aptitud individual para cada uno de los criterios analizados, que muestran espacial y numéricamente las zonas con mayor y menor idoneidad para el crecimiento de la urbanización; todo lo anterior, se resume en una propuesta de zonificación en la cual se considerando las restricciones identificadas.

Material y método

Descripción del área de estudio

El área en estudio corresponde a la unidad hidrográfica 95-291366 codificada y delimitada por el método Pfafstetter a nivel 8, esta se encuentra ubicada hidrográficamente en la cuenca sur de Managua; política y administrativamente se localiza en su totalidad en el departamento de Managua. Hidrológicamente esta cuenca está inserta dentro de la cuenca regional Rio San Juan (código de unidad 952). El área en estudio tiene una extensión de 20.2 km²; dentro la cuenca se ubica un antiguo cráter y que según a la categorización establecida en el Reglamento de Áreas Protegidas de Nicaragua, DECRETO N°42-91 se considera Reserva Natural Laguna de Tiscapa localizada en la parte norte de la zona de estudio (Ver figura 1).

Figura 1. Mapa de ubicación de la UH 95-291366



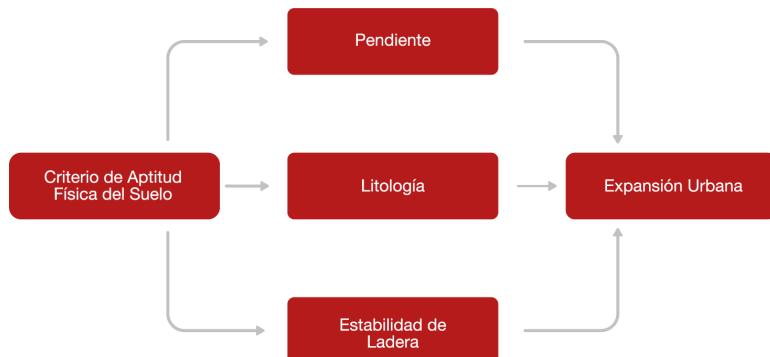
Fuente: Elaboración Propia

Tipo y método de investigación

El tipo de investigación es descriptivo – cuantitativo de corte transversal. El método empleado es un Análisis Multicriterio (AMC) y la metodología utilizada es la de Orellana Macías (2014). El primer criterio para considerar es la aptitud física del suelo, tomando en cuenta las cualidades del territorio entre ellas, zonas potenciales y/o restrictivas que evalúan características según la capacidad para la construcción o expansión de las áreas urbanas. Las tres variables fundamentales para considerar son: pendiente, litología y la estabilidad de ladera.

Se recopiló la información de las variables detalladas anteriormente y se transformaron a formato ráster empleando los sistemas de información geográfica, donde una vez obtenido los tres ráster, se empleó la calculadora ráster en el módulo de ArcMap 10.8 y se generó el ráster de expansión urbana que contiene las áreas con la mejor aptitud para el crecimiento de la mancha urbana de la ciudad de Managua (Ver figura 2: Variables fundamentales en la determinación de las zonas de expansión urbana).

Figura 2. Esquema de las variables empleadas en la determinación de zonas de las zonas de expansión urbana en la cuenca-colocar aquí.



Fuente: Elaboración Propia

En el cálculo de la pendiente (1) se empleó un modelo digital del terreno (DEM) de 12.5 metros proporcionado por el Instituto Nacional de Estudios Territoriales (INETER); el proceso realizado consistió en la elaboración de un mapa de pendiente el cual se categorizó acorde con la metodología propuestas por el INETER. A continuación, se muestra una tabla 1 que resume la categorización:

Tabla 1. Categorización de la pendiente

%Pendiente	Tipología	Aptitud
<5	Zonas Llanas	Apta
5-15%	Pendiente Moderada	Apta con restricciones
15-30%	Pendiente fuerte	No apta
30-50%	Pendiente muy fuerte	No apta
75>	Zona escarpada	No apta
.....		

Fuente: Elaboración Propia

La variable litológica referida a la capacidad portante del suelo se determinó a partir de la Guía para el Estudio del Medio Físico Aguiló y otros (2014, p. 60), cuyas categorías fueron clasificadas de mayor a menor idoneidad como: muy alta, alta, media, baja, muy baja y nula. Para el último criterio, referido a la estabilidad de laderas (3) se empleó la metodología de Mora & Vahrson (1994) y que de acuerdo con el Instituto de Estudios Territoriales INETER, (2004) este método clasifica las áreas con alta posibilidad a deslizamiento.

La metodología considera los factores condicionantes y factores desencadenantes (Ver

Tabla 2). Toda la información contenida en la tabla fue tratada y se transformó en formato ráster, además se homogenizó el tamaño del píxel. Se utilizaron datos de precipitación anual de un periodo de 39 años; se empleó la herramienta de spline en ArcGis para interpolar los datos y generar un ráster que posterior se emplea en la ecuación final de susceptibilidad a deslizamiento propuesta por Mora-Vahrson.

Tabla 2 Factores condicionantes y desencadenantes.

Factores condicionantes o intrínsecos	Geología Tipo de suelo Pendiente Uso de suelo
Factores desencadenantes o disparo	• Precipitación

Fuente: Elaboración Propia

En la obtención del ráster de estabilidad de ladera se utilizó la siguiente ecuación:

Donde:

H = Nivel de susceptibilidad a deslizamientos.

Sr = Factor pendiente.

Sl = Factor litológico.

ST = Factor taxonómico.

SC = Factor de uso de suelo.

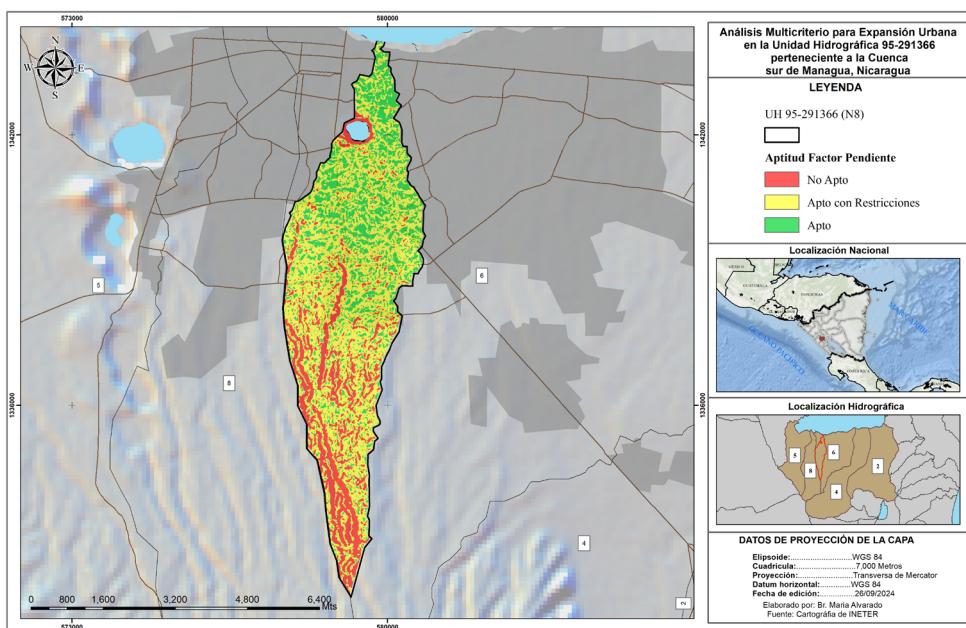
Tp = Intensidad de precipitaciones.

Finalmente, al obtener los tres ráster detallados en la figura 2 se procede a realizar el análisis multicriterio propuesto por Orellana (2014, pp.13-25) que permitió definir espacialmente las áreas de expansión urbana en la cuenca en estudio.

Resultados

El resultado del factor pendiente reveló que el 30.07% del área total de la unidad hidrográfica presenta pendientes inferiores al 5% considerándose como zonas llanas y clasificándose como apto para la expansión urbana. Un 45.29% del área tiene pendientes entre el 5-15% clasificadas como pendientes moderadas, considerándose apto con restricciones; al igual las pendientes fuertes ocupan el 13.93% del total del territorio y las pendientes muy fuertes ocupan 7.25% del total del área y van de 30 al 50%; finalmente las zonas escarpadas ocupan el 3.46% del área total de la cuenca y estas se ubican en los alrededores de la reserva natural la laguna de Tiscapa, ubicada al norte del área en estudio.

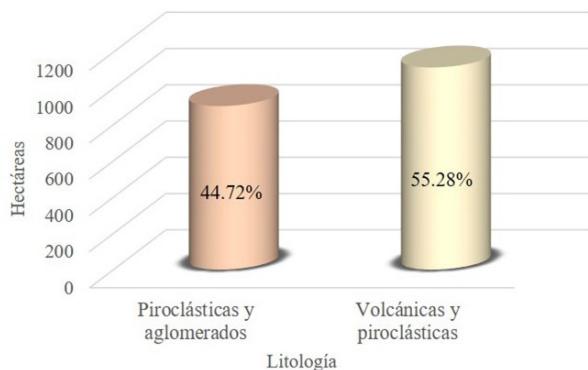
Figura 3. Mapa de Aptitud para la expansión urbana por factor pendiente



Fuente: Elaboración Propia

En cuanto al factor litológico, se identificaron dos tipos principales de rocas volcánicas del sistema cuaternario: un 55.28% corresponde a lavas, tobas, cenizas, aglomerados, escorias basálticas y andesito-basálticas, mientras que el 44.72% restante está compuesto por ignimbritas, tobas, aglomerados y escorias basalto del grupo Las Sierras. Ambos tipos de litología predominantes en la unidad hidrográfica se caracterizaron por una capacidad portante del suelo muy baja, esto se debe a que es una zona compuesta por materiales aluviales, clasificándose por tener una aptitud física del suelo no apta para la construcción (Ver Figura 4).

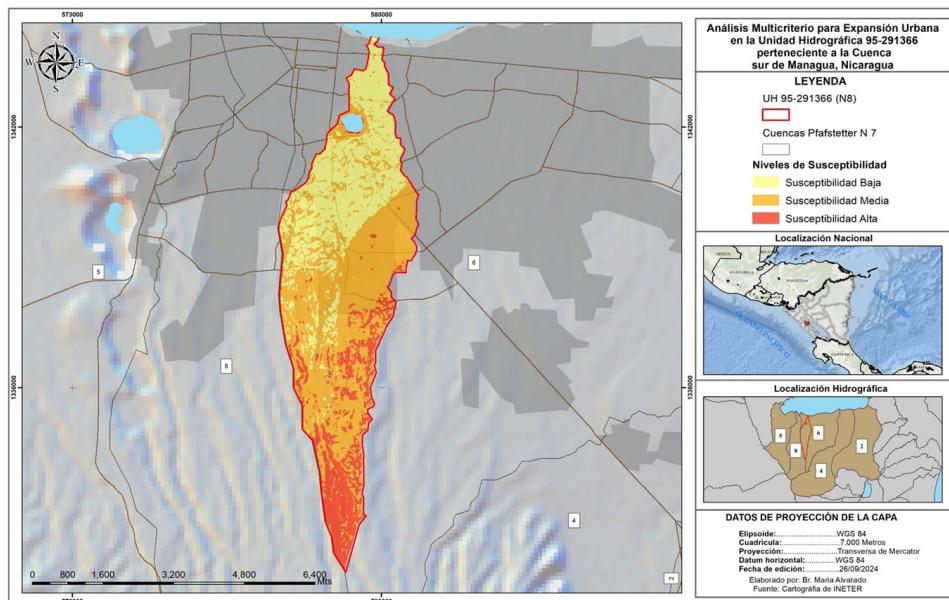
Figura 4. Composición litológica de la cuenca en estudio



Fuente: Elaboración Propia

El análisis del factor estabilidad de laderas arrojó que el 33.32% del área presenta una susceptibilidad baja a deslizamientos, el 52.36% una susceptibilidad media (asociada a pendientes entre 5.59 y 12.1 grados), y el 14.32% una susceptibilidad alta, indicando una elevada probabilidad de inestabilidad en ladera. (Ver Figura 5).

Figura 5. Mapa de Aptitud para la expansión urbana por factor pendiente/Susceptibilidad a deslizamiento



Fuente: Elaboración Propia

La propuesta de zonas seguras para la expansión urbana, resultante de la integración de los tres factores mediante el análisis multicriterio (Ver Figura 6), se identificó que el 14% del territorio se considera no apto para la urbanización debido a las condiciones de pendiente y estabilidad de laderas. Un 50% del área se clasificó como apto con restricciones, requiriendo evaluaciones adicionales y medidas de mitigación. Finalmente, el 36.47% del territorio se identificó como apto para la construcción desde la perspectiva de los criterios analizados. La superposición de esta zonificación con la capa de áreas urbanizadas existentes reveló que una porción de las edificaciones actuales se localiza en zonas clasificadas como aptas con restricciones y no aptas.

Discusión y resultados

Factor Pendiente

Los resultados obtenidos en la unidad hidrográfica muestran que el 30.07% del área presenta pendientes inferiores al 5% localizándose en la parte norte de la cuenca y se clasifican como zonas llanas y/o aptas para la expansión urbana, esta clasificación se alinea con los principios generales de planificación urbana que según la CEPAL (2016) los terrenos planos son preferidos debido a su facilidad de construcción y menor riesgo de erosión o deslizamientos, además Urriza (2018) en su estudio sobre el crecimiento urbanístico menciona que las áreas con pendientes inferiores al 5% son ideales para el desarrollo urbano porque permiten una planificación más eficiente y reducen los costos asociados con la construcción en pendientes pronunciadas; al igual el decreto 78-2001 en el capítulo IV artº 30 referido a la Política de Ordenamiento Territorial en Nicaragua establece que este rango de pendiente se consideran como adecuadas para el establecimiento y expansión de asentamientos humanos.

También en el análisis realizado, se observa que el 45.29% del área total de la cuenca presenta pendientes entre el 5% y el 15%, este rango de inclinación sugiere que estas áreas tienen una aptitud restrictiva para el desarrollo urbano, lo que implica que gran parte del terreno presenta limitaciones significativas para construir de manera segura y sostenible; Urriza (2018) menciona que las áreas con pendientes moderadas pueden aún ser viables para ciertos tipos de desarrollo, siempre y cuando se implementen las medidas adecuadas de manejo del terreno.

En cuanto a las áreas no aptas para la urbanización, las pendientes fuertes y muy fuertes, que representan el 13.93% y el 7.25% del área, respectivamente, están en rangos de inclinación del 30 al 50% y de acuerdo el estudio realizado por el Ministerio del Interior (2017) en la ciudad de Comodoro Rivadavia han establecido restricciones para la edificación en áreas con pendientes superiores al 30% debido a los riesgos asociados a deslizamiento y aumento de zonas de riesgos, al igual en Nicaragua se han establecido regulaciones que limitan el desarrollo en áreas con pendientes superiores al 15% debido a los riesgos de deslizamientos y erosión, esto según decreto 78-2001 en el capítulo IV.

Factor Litología

Según los datos obtenidos, la unidad hidrográfica presenta dos tipos de litologías (Ver figura 4), el 55.28% representan rocas que son lavas, tobas, cenizas, aglomerados, escorias basálticas y andesito-basálticas y el 44.72% pertenecen a rocas que son ignimbritas, tobas, aglomerados y escorias basalto formadas por el grupo las sierras. En resumen, la litología predominante corresponde a rocas volcánicas del sistema cuaternario debido a esto los suelos volcánicos compuestos por cenizas y piroclásticas que tienden a ser altamente porosos y granulares, lo que resulta en una baja cohesión. Esta falta de cohesión hace que estos suelos no puedan soportar cargas pesadas sin experimentar asentamientos significativos.

Además, la investigación sobre suelos volcánicos no consolidados, realizado por Vargas & Flora (2018) reportan capacidades admisibles que oscilan entre 0.94 y 1.48 kg/cm², con asentamientos diferenciales que requieren atención en el diseño estructural, y propiedades geotécnicas similares a las observadas en la unidad hidrográfica, además la baja cohesión y el ángulo de fricción alrededor de 30° reflejan la naturaleza heterogénea y poco consolidada de estos suelos volcánicos, lo que dificulta su uso en construcción convencional sin intervenciones adicionales. Esto corrobora que, aunque la litología natural no sea apta para soportar cargas urbanas significativas, el desarrollo urbanístico puede continuar mediante técnicas de estabilización y diseños adaptados a estas condiciones particulares.

También el estudio de Franesqui y otros (2015, p. 491) señala que la alta variabilidad de las propiedades geotécnicas de los suelos volcánicos dificulta su uso en la construcción, dado que estos suelos no cumplen con los estándares convencionales para materiales de construcción.

En particular, los dos grupos litológicos predominantes en la zona de estudio presentan una capacidad portante muy baja, lo que implica que la aptitud total del área para soportar construcciones es limitada. Sin embargo, a pesar de que la unidad hidrográfica no cuenta con una litología adecuada para desarrollos urbanos, este factor no ha impedido el crecimiento urbanístico actual.

En muchos casos, las deficiencias del suelo han sido compensadas mediante técnicas de mejoramiento y estabilización del terreno, permitiendo la expansión urbana en áreas con condiciones geotécnicas desfavorables.

Factor estabilidad de laderas

Los resultados del análisis del factor de estabilidad de ladera reflejan que el 52.36% del total del área estudiada, se encuentra en un estado de susceptibilidad media (Ver figura 5) presentando pendientes que varían desde 5,59 a los 12,1 grados, lo cual podría generar suelos inestables para la construcción en función de las fluctuaciones de las precipitaciones

o alteraciones humanas coincidiendo con investigaciones que identifican estabilidades de laderas como críticas ante variaciones hidrológicas y actividad humana como lo es el estudio del Cerro del Mesón realizado por Garibay y otros (2016) donde demostraron que los incrementos en humedad reducen la cohesión del suelo en pendientes similares (10° - 15°), generando factores de seguridad marginales, es decir, aunque no son las pendientes más pronunciadas, su combinación con lluvias intensas o intervenciones humanas podría desencadenar movimientos de tierra.

En muchos casos, la urbanización en estas zonas requiere estudios geotécnicos detallados y medidas de mitigación, como sistemas de drenaje, muros de contención y reforestación. Es importante resaltar que la expansión urbana en estas áreas puede ser viable, pero necesita una planificación cuidadosa y la implementación de medidas preventivas.

La segunda categoría corresponde a zonas de susceptibilidad baja con el 33.32% (Ver figura 5), consideradas como son áreas estables para expansión urbana con condiciones favorables debido a su estabilidad geológica y topográfica, lo que minimiza riesgos inmediatos asociados a deslizamientos o erosión, sugiriendo un menor impacto de factores intrínsecos como pendientes pronunciadas o material superficial inestable, lo que permite priorizarlas para proyectos de expansión urbana planificada, sin embargo, según el estudio realizado por Chaverri (2016) mencionan que las áreas identificadas como sectores aptos para usos urbanos de alta densidad, no debe interpretarse como una garantía absoluta, ya que, se tienen que tener en cuenta las medidas preventivas por cambios graduales en el equilibrio del terreno como es la interacción entre componentes naturales y antrópicos.

También el estudio realizado en el barrio Protección Guamaní, Quito por Pullas (2024) destaca en su investigación que las zonas con susceptibilidad baja mostraron estabilidad predominante (63.56% en la zona sur), respaldando su viabilidad para desarrollos planificados. Sin embargo, como señala la investigación en Quito, incluso en zonas clasificadas como estables, factores como la impermeabilización del suelo y la deforestación asociada al crecimiento urbano pueden incrementar la vulnerabilidad a fenómenos naturales a largo plazo significando que estas áreas deben darse de forma controlada y planificada.

De igual forma, los resultados obtenidos, indican que un 14,32% del área es de susceptibilidad alta, coincidiendo con estudios similares en cuanto a la necesidad de restringir actividades antrópicas en estas zonas; así lo muestra García y otros (2021) en el estudio realizado en la cuenca del Río Negro (Argentina) quien destaca que el 4,7% del área presentó susceptibilidad muy alta a inundaciones, vinculada a pendientes menores al 1% y suelos con drenaje deficiente, Aunque el porcentaje es menor, este estudio muestra que las áreas críticas se localizan cerca de cuerpos de agua y relieves deprimidos, donde la urbanización incrementaría el riesgo.

Propuesta de zonas seguras para la expansión urbana

En la figura 6 se muestra una propuesta de las zonas seguras a urbanizar en los próximos años. Las zonas no aptas para la urbanización representan el 14% del total del territorio y espacialmente se localizan en los bordes de la caldera de la reserva natural Laguna de apoyo y al sur del área en estudio. Estas zonas presentan inestabilidad de ladera y además tiene una elevada fragilidad ambiental por encontrarse el área protegida Laguna de Tiscapa. Al superponer la capa de áreas urbanizadas (Línea roja en el mapa) se observa que actualmente hay edificaciones que se encuentran en zonas apta con restricciones y no apta, si bien la expansión de la mancha urbana de departamento de Managua se ha expandido, esto se debe a múltiples factores que deberán ser abordados desde una perspectiva. Gutiérrez (2021) plantea que este fenómeno es un desafío significativo y fundamental para planificar el crecimiento de forma cuidadosa y zonificada.

Es fundamental evitar la expansión urbana descontrolada en áreas no aptas, ya que, esto podría generar problemas como la degradación ambiental, la pérdida de suelo fértil y el aumento de la vulnerabilidad ante eventos naturales. Por otro lado, las áreas aptas con restricciones ocupan el 50% del área total de la cuenca (Ver figura 6), estas zonas actualmente ya se encuentran urbanizadas, lo que representa diversos desafíos por el hecho que las áreas urbanas con restricciones para la construcción enfrentan un equilibrio delicado entre el desarrollo necesario y la protección del medio ambiente y la calidad de vida de los residentes.

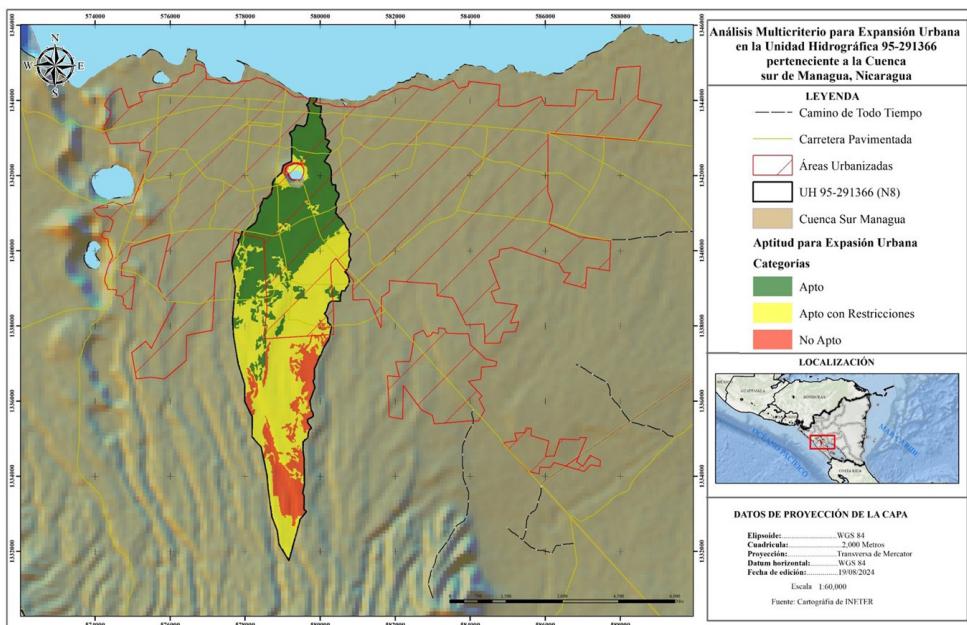
Para abordar estos desafíos, muchas ciudades están adoptando estrategias como el crecimiento inteligente y de acuerdo con Braće (2018, p. 218) esto busca promover un desarrollo más denso y sostenible dentro de los límites urbanos existentes. Esto incluye la creación de comunidades compactas que fomenten el uso mixto del suelo; además, de obras físicas como sistemas de drenaje adecuados, tratamiento de aguas residuales y protección de áreas verdes.

Las áreas aptas para la construcción están en su mayoría concentradas en la zona norte de la cuenca y ocupa el 36.47 % del área total. De esto, el 60 % ya son áreas urbanizadas con infraestructura ya establecida, el restante que corresponde al 40 % no están urbanizadas indicando que se pueden considerar para futuros desarrollos urbanísticos, tomando en cuenta que estas son las zonas más aptas para la ubicación de población. Esto podría incluir tanto proyectos residenciales como comerciales, ofreciendo oportunidades para el crecimiento económico y la expansión de la infraestructura segura y resilientes; sin embargo, la cuenca presenta en esta parte una de las fallas con mayor longitud que es a falla de Tiscapa representa un riesgo que debería considerarse en los próximos proyectos de planificación urbanística.

La planificación urbanística no es tarea de una sola disciplina, se debe de realizar estudios de carácter multidisciplinarios que incluyan variables como el riesgo a terremotos,

inundaciones, huracanes, entre otros, tomando en cuenta que nuestro territorio es una zona de multiamenazas. Por tal razón, se debe de tener una planificación cuidadosa considerando medidas de adaptación y mitigación para proteger tanto a las comunidades existentes como a las nuevas.

Figura 6. Mapa de Aptitud para la expansión urbana /Zonas seguras a urbanizar



Fuente: Elaboración Propia

Conclusiones

El análisis multicriterio, fundamentado en la evaluación individual de la pendiente, la litología y la estabilidad de laderas, permitió generar una cartografía detallada de la aptitud territorial para la expansión urbana en la unidad hidrográfica 95-291366. Los mapas resultantes evidencian una distribución heterogénea de las condiciones biofísicas. Se constató que una porción significativa del área presenta limitaciones inherentes para el desarrollo urbano convencional, como pendientes pronunciadas (21.18%), suelos con baja capacidad portante (100% del área) y susceptibilidad variable a deslizamientos (14.32% alta). Por otro lado, se identificaron zonas con condiciones más favorables, aunque limitadas, principalmente caracterizadas por pendientes suaves (30.07%).

La superposición y el análisis integrado de los criterios revelaron una clara diferenciación en la idoneidad territorial para la urbanización. Las zonas con menor idoneidad, que comprenden un 14% del área, coinciden con áreas de alta inestabilidad de laderas

y pendientes pronunciadas, particularmente en los márgenes de la Laguna de Apoyo y el sector sur. Un 50% del territorio se catalogó como apto con restricciones, señalando la necesidad de estudios específicos y medidas de mitigación para cualquier desarrollo futuro. En contraste, el 36.47% del área se identificó como la más apta para la expansión urbana desde la perspectiva de los factores analizados, concentrándose en la parte norte de la unidad hidrográfica.

La propuesta de zonificación resultante del análisis multicriterio delimita claramente las áreas según su aptitud para la expansión urbana. Se establece un 14% del territorio como no urbanizable debido a riesgos geotécnicos y ambientales significativos. Un 50% se designa como zona de expansión condicionada, donde el desarrollo debe ir precedido de estudios detallados y la implementación de medidas correctivas y preventivas. Finalmente, un 36.47% se propone como zona prioritaria para la expansión urbana, aunque se subraya la importancia de considerar la presencia de la falla de Tiscapa en la planificación. La superposición con el área urbanizada actual revela una ocupación parcial de zonas con restricciones e incluso no aptas, lo que enfatiza la urgencia de una planificación urbana informada y la necesidad de evitar la expansión descontrolada en áreas vulnerables.

Se recomienda un enfoque de crecimiento inteligente en las zonas aptas con restricciones y la preservación de las zonas no aptas para garantizar la sostenibilidad y la seguridad del territorio. Asimismo, se recomienda enfáticamente que toda expansión urbana futura se sustente en estudios interdisciplinarios que incorporen riesgos geológicos, hidrometeorológicos y sísmicos, considerando que el área se encuentra en una zona de multiamenazas.

Agradecimientos

Agradecemos profundamente al estudiante Bra. Celeste Reyes por su apoyo en el procesamiento de datos que estuvo enmarcada en el desarrollo del componente de Modelos Espacial II, carrera de Geografía, Departamento de Ciencias Sociales y Políticas, UNAN- Managua.

Listado de referencias

- Aguiló, M., Albaladejo, J., Aramburu, M., Carrasco, R., Castillo, V., Ceñal, M., Ciduentes, M., & cifuentes, P. (Febrero de 2014). *Guía para el Estudio del Medio Físico*. https://oa.upm.es/55224/1/Guia_para_la_elaboracion_de_estudios_del_medio_fisico_2.pdf
- Braće, O. (2018). *Efectos de la Expansión Urbana en la Elección de los Modos de Transporte Utilizados para los Desplazamientos Diarios en Áreas Metropolitanas. Un Estudio de Caso*. <https://institucional.us.es/revistas/andaluces/36/Articulos/Art9.pdf>
- CEPAL. (1 de Enero de 2016). *Desarrollo social inclusivo: una nueva generación de políticas para superar la pobreza y reducir la desigualdad en América Latina y el Caribe*. <https://www.cepal.org/es/publicaciones/39100-desarrollo-social-inclusivo-nueva-generacion-politicas-superar-la-pobreza>
- Chaverri, I. F. (2016). *Zonificación de la susceptibilidad a deslizamiento, por medio de la metodología Mora-Vahrson, en la microcuenca del Río Macho, San José, Costa Rica*. https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/7054/Zonificacion_susceptibilidad_deslizamiento_metodologia_mora_vahrson.pdf?sequence=1&isAllowed=true
- Francesqui , M., Yepes, J., García, C., Gallego, J., & Pérez, I. (2015). *Áridos de islas volcánicas para capas granulares de firmes de carretera*. https://ruc.udc.es/dspace/bitstream/handle/2183/27579/Francesqui_2015_AridVolcanicCapaGranular.pdf
- Garcia , G., Piccolo, M., & Bohn, V. (2021). *ESTIMACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD A INUNDACIONES EN LA CUENCA INFERIOR DE RÍO NEGRO, ARGENTINA*. Finisterra, 67. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/206865>
- Garibay, R., Córdova, A., Ibañez, R., García, G., González , A., Salan , A., & Jiménez, J. (Noviembre de 2016). *Análisis de estabilidad de ladera en el Cerro del Mesón de Poza Rica, Ver.* <https://www.reibci.org/publicados/2016/nov/1900103.pdf>
- Guerrero, J., Sampedro, L., Ruz, M., Silva, S., Fonseca, C., & Gómez, M. (Diciembre de 2021). *Análisis multicriterio para el desarrollo urbano en zonas costeras en un contexto de cambio climático: Caso en Acapulco, México*. https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?pid=S2215-38962021000400085&script=sci_arttext
- Gutiérrez , D. (20 de Diciembre de 2021). *Expansión metropolitana de la ciudad de Managua*. <https://portal.amelica.org/ameli/journal/529/5292802011/html/>
- INETER. (2004). *MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD A DESLIZAMIENTO DE NICARAGUA EL MÉTODO MORA-VAHRSON*. https://webserver2.ineter.gob.ni/desliza/estudios/Mora_Vahrson.pdf

INETER. (2021). *1er Altas Nacional de Suelos*. <https://www.ineter.gob.ni/mapa/pub/atlas-suelo/1erAltasNacionaldeSuelos.pdf>

Ministerio del Interior. (2017). *ANÁLISIS DE EXPANSIÓN URBANA (1991-2017)*. <https://www.mininterior.gov.ar/planificacion/pdf/planes-loc/CHUBUT/Analisis-de-Expansion-Urbana-Comodoro-Rivadavia.pdf>

Mora, S., & Vahrson, W. (1994). *Macrozonation methodology for landslide hazard determination*. Researchgate Association of Engineering and Geologist Vol XXI Nº1. <https://doi.org/10.2113/gseegeosci.xxi.1.49>

Orellana Macías, J. M. (2014). *Evaluación de la capacidad de acogida del territorio para usos urbanos mediante el uso de SIG y técnicas de evaluación multicriterio. El caso de la urbanización difusa en la Axarquía (Málaga)*. <https://riuma.uma.es/xmlui/bitstream/handle/10630/8643/AnalisisUrbanizacionDifusaconSIGyEMC.pdf?sequence=1>

Principi, N. (26 de Mayo de 2021). *EVALUACIÓN MULTICRITERIO APlicada a la EXPANSIÓN URBANA EN LUJÁN (BUENOS AIRES, ARGENTINA)*. https://www.researchgate.net/publication/351879227_Evaluacion_Multicriterio_aplicada_a_la_expansion_urband_en_Lujan_Buenos_Aires_Argentina

Pullas, M. (2024). *Análisis de la relación entre la susceptibilidad a fenómenos de remoción en masa y el crecimiento urbano en el barrio Protección Guamaní, Quito*. <https://repositorio.uasb.edu.ec/bitstream/10644/10131/1/T4423-MGRD-Pullas-Analisis.pdf>

Urriza, G. (2018). *EXPANSIÓN URBANA EN CIUDADES INTERMEDIAS DE CRECIMIENTO*. <https://pdfs.semanticscholar.org/ec0d/06a68ad65f0c7ae03b5d2ae2ca767498f2ce.pdf>

Vargas, V., & Flora, N. (2018). *Caracterización geotécnica de los suelos del volcánico sencca, mediante refracción sísmica y análisis de ondas superficiales (masw), en el A.A.H.H. Villa Florida del Distrito de Yura – Arequipa*. (U. N. Arequipa, Ed.) UNSA. <https://repositorio.unsa.edu.pe/items/1775e6bc-7a59-4df0-b581-84b37e30e1c4>