



Modelación del cambio de coberturas y uso del suelo para predecir la expansión urbana y evaluar su impacto en el sistema de drenaje: Caso de estudio en el sector El Porvenir, Rionegro.

Sebastián Soto Blanco

Trabajo de grado presentado para optar al título de Ingeniero Sanitario

Asesor

Neiler de Jesús Medina Peña, Doctor (PhD)

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Sanitaria
Medellín, Antioquia, Colombia
2024

Cita

(Soto Blanco, 2024)

Referencia

Estilo APA 7 (2020)

Soto Blanco, S. (2024). *Modelación del cambio de coberturas y uso del suelo para predecir la expansión urbana y evaluar su impacto en el sistema de drenaje: Caso de estudio en el sector El Porvenir, Rionegro*. [Trabajo de grado profesional]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.



Seleccione biblioteca, CRAI o centro de documentación UdeA (A-Z)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

A mi mamá, quien siempre ha estado a mi lado en los buenos y malos momentos, y que siempre ha creído en mí. Su apoyo incondicional y su fe en mis capacidades han sido una fuente constante de fortaleza e inspiración.

Agradecimientos

A mi profesor, quien siempre ha estado dispuesto a guiarme y ofrecerme ideas, y a mis amigos Carolina, Jairo, Santiago, Maryori y Felipe, quienes han creído en mí y apoyado mi proceso de diversas maneras.

Contenido

Resumen	10
Abstract	11
Introducción	12
1. Objetivos	14
1.1 Objetivo general	14
1.2 Objetivos específicos.....	14
2. Marco teórico.....	15
3. Descripción del área de estudio y la problemática	18
3.1 Área de estudio.....	18
3.2 Problemática e información recopilada en campo.....	21
4. Metodología	28
4.1 Recopilación de la información.....	28
4.1.1 Información topográfica y modelo digital de terreno (DEM)	30
4.1.2 Redes Alcantarillado y Drenaje	30
4.1.3 Vías	31
4.2 Procesamiento en Arc GIS	32
4.2.1 Pendiente.....	32
4.2.2 Distancia a variables estáticas.....	33
4.2.3 Uso de suelo perímetro porvenir.....	36
4.3 Dinamica EGO	38
4.3.1 Determinación de escenarios	38
4.3.2 Cubo ráster	39
4.3.3 Matriz de transición	39
4.3.4 Determinación del peso de evidencia	40

4.3.5	Correlación evidencia	41
4.3.6	Simulación del modelo	42
4.3.7	Validación de un modelo de cambio de uso de suelo	44
4.4	Modelación EPA SWMM	45
4.4.1	Lluvia del 28 octubre con ajuste de cambio climático.....	45
4.4.2	Curva numero.....	45
4.4.3	N-Manning zona impermeable y permeable.....	47
4.4.4	Geodatabase de la red de alcantarillado de agua lluvia, residual y combinada.....	47
5.	Resultados y Análisis	49
5.1	Modificación de la matriz transición para escenarios con 7 clasificaciones de uso de suelos	49
5.2	Modificación de la matriz transición para escenarios con 5 clasificaciones de uso de suelos	50
5.3	Correlación	52
5.4	Simulación de cobertura de suelos a 2049	53
5.5	Validación en la Predicción del cambio de Uso del Suelo.....	54
5.6	Inundaciones escenarios con 7 clasificaciones de uso de suelo	55
5.7	Inundaciones escenarios con 5 clasificaciones de uso de suelo	57
6.	Conclusiones	60
7.	Recomendaciones	62
8.	Bibliografía	64
Anexo 1	imágenes satelitales descargadas en Google Earth pro.....	68
Anexo 2	Cobertura de uso de suelo con clasificación de uso de suelo 7 y 5	73
Anexo 3	Cobertura de uso de suelo para el año 2049 con clasificación de uso de suelo 7 y 5.....	82

Lista de Tablas

Tabla 1 Escenarios llevados a DINAMICA EGO con clasificación de uso de suelo 7	38
Tabla 2 Escenarios llevados a DINAMICA EGO con clasificación de uso de suelo 5	38
Tabla 3 Clasificación uso de suelo.	46
Tabla 4 Ecuaciones para determina el valor de curva número.	46
Tabla 5 N de Manning aginado a cada tipo de suelo.	47
Tabla 6 Matriz de transición con 7 clasificación de uso de suelo.	50
Tabla 7 Matriz de transición modificada 7 clasificaciones de uso de suelo.	50
Tabla 8 Matriz de transición 5 clasificaciones de uso de suelo.	51
Tabla 9 Matriz de transición modificada 5 clasificaciones de uso de suelo.	52
Tabla 10 Porcentaje de similitud para escenario con 7 clasificaciones de uso de suelo.	55
Tabla 11 Porcentaje de similitud para escenario con clasificaciones de uso de suelo	55

Lista de Figuras

Figura 1 Localización área de estudio.....	18
Figura 2 Crecimiento de huella urbana del municipio Rionegro	19
Figura 3 Delimitación cuenca porvenir.....	20
Figura 4 Sector propenso a ser inundado ubicado en la calle 40 con Carrera 61F.	22
Figura 5 Medidas de prevención para prevenir inundaciones dentro de las viviendas.	23
Figura 6 Inundación ocurrida en la calle 40 con carrera 61F el 28 de octubre de 2022.	23
Figura 7 Lago de Vegas de la Calleja.	24
Figura 8 Nivel del agua del lago de Vegas de la Calleja el día 28 de octubre de 2022.	25
Figura 9 Nivel del agua del rio Negro el día 28 de octubre de 2022	25
Figura 10 Registro fotográfico de la zona ubicada en la carrera 62.....	26
Figura 11 Registro fotográfico de la zona ubicada en la carrera 62.....	26
Figura 12 Descripción de la metodología a implementar en este trabajo.	28
Figura 13 Imágenes descargadas de Google Earth pro de los años 2002	29
Figura 14 Información topográfica del sector porvenir	30
Figura 15 Redes de Alcantarillado y cuerpos de agua sector porvenir	31
Figura 16 Vías del sector porvenir.....	32
Figura 17 Mapa de pendiente sector porvenir.....	33
Figura 18 Mapa de distancia a las vías sector porvenir	34
Figura 19 Mapa de distancia a cuerpos de agua sector porvenir.....	35
Figura 20 Mapa de distancia a las redes de alcantarillado sector porvenir	35
Figura 21 Cobertura del Uso del Suelo en el Sector Porvenir en el Año 2002 con Siete Categorías de Clasificación.....	37
Figura 22 Cobertura del Uso del Suelo en el Sector Porvenir en el Año 2002 con cinco Categorías de Clasificación.....	37
Figura 23 Cubo ráster.....	39

Figura 24 Matriz de transición	40
Figura 25 Rangos y pesos de evidencias	41
Figura 26 Correlación de evidencia	42
Figura 27 Simulación	44
Figura 28 Validación de los escenarios generados por Dinamica EGO	44
Figura 27 Luvia del 28 de octubre 2022 con ajuste de cambio climático	45
Figura 30 Elementos que compone todo el sistema alcantarillado del sector porvenir	48
Figura 31 Correlación entre variables	52
Figura 32 Cobertura de uso del suelo para el perímetro de Porvenir en el escenario M1 para el año 2049	53
Figura 33 Cobertura de uso del suelo para el perímetro de Porvenir en el escenario N1 para el año 2049	54
Figura 34 Numero de MH inundadas con 7 clasificaciones de uso de suelo	56
Figura 35 Porcentaje de caudal recibido en los escenarios M5 y M6 en comparación con el actual	57
Figura 36 Numero de MH inundadas con 7 clasificaciones de uso de suelo	58
Figura 37 Caudal recibido por los MH 5 variables	59

Siglas, Acrónimos y Abreviaturas

EPA SWMM	U.S. Environmental Protection Agency Storm Water Management Model
DEM	Modelo de elevación digital
MH	Cámara de inspección
EPM	Empresa Públicas de Medellín

Resumen

El sector El Porvenir del municipio de Rionegro ha venido presentando un aumento considerable en el número de eventos de inundación, los cuales entre otros se asocian a factores como el aumento en las intensidades de lluvias asociadas al cambio climático, y a la falta de planificación urbana adecuada que ha llevado al cambio de coberturas y de uso del suelo, lo que ha contribuido a la impermeabilización del terreno, aumentando la escorrentía superficial y aumentando así el riesgo por inundación, en particular en las zonas bajas del municipio. En esta tesis se llevaron a cabo escenarios de modelación de cambio de coberturas en el municipio a un horizonte de diseño de 25 años, es decir hasta el año 2049, esto con el fin de estimar como podría ser la ocupación del territorio y los cambios en la impermeabilización del terreno si se continua con el ritmo expansionista en este sector del municipio. Una vez realizadas diferentes simulaciones de cambio de cobertura, a través del software DINAMICA EGO, se establecieron cuáles fueron las más adecuadas y con estos modelos de cobertura se modelaron las redes de alcantarillado para evaluar su posible impacto y aumento de las inundaciones, para de esta manera tener una herramienta de planeación del territorio con perspectiva hidráulica y de disminución de inundaciones.

Palabras clave: Cambios de Cobertura de suelo, Simulación, DINAMICA EGO, Expansión urbana, Drenaje urbano, Inundaciones.

Abstract

El Porvenir a sector of the municipality of Rionegro, Antioquia in Colombia, has been experiencing a considerable increase in the number of flood events, which are associated with factors such as the increase in rainfall intensities linked to climate change and the lack of adequate urban planning. This has led to changes in land cover and land use, contributing to soil impermeabilization, increasing surface runoff, and thereby increasing the flood risk, particularly in the lower areas of this neighborhood of the municipality. In this thesis, scenarios of land cover change modeling in the municipality were conducted with a design horizon of 25 years, i.e., until the year 2049, with the aim of estimating how land occupation and soil impermeabilization might evolve if the expansionist trend in this sector of the municipality continues. After performing various land cover change simulations using the DINAMICA EGO software, the most suitable scenarios were established. Using these land cover models, the sewer networks were modeled to evaluate their potential impact and the increase in flooding, thus providing a territorial planning tool with a hydraulic perspective and flood reduction focus.

Keywords: Land Cover Changes, Simulation, DINAMICA EGO, Urban Expansion, Urban Drainage, Floods.

Introducción

La expansión urbana, impulsada por factores como el crecimiento de la población y el desarrollo económico, tiene implicaciones significativas para el cambio de cobertura y uso del suelo, especialmente en el contexto de predecir la expansión urbana y evaluar su impacto en los sistemas de drenaje. La rápida urbanización y el aumento asociado de superficies impermeables plantean desafíos para la infraestructura de drenaje, afectando la eficiencia de los sistemas de drenaje urbano (Zhou, 2014). A medida que las ciudades se expanden, la demanda de desarrollo de infraestructura se intensifica, impactando el medio ambiente natural y necesitando la evaluación de soluciones de drenaje sostenibles para mitigar los efectos adversos (Zhang et al, 2022). La interacción entre el cambio climático y la urbanización complica aún más la gestión de los sistemas de drenaje urbano, ya que estos factores contribuyen al aumento de extremos de precipitación y cambios ambientales que tensan la infraestructura existente (Zhou, 2014).

El análisis de cambios en la cobertura y uso del suelo es fundamental para comprender las dinámicas de crecimiento urbano y su impacto en el medio ambiente (Zeng, Yu, & Li, 2018). En el sector El Porvenir del municipio de Rionegro, el cual es parte de las zonas de expansión del área urbana del municipio, se ha observado un rápido crecimiento urbano durante las últimas dos décadas, lo que ha llevado a cambios significativos en el uso del suelo y en el cambio del tipo de coberturas. Este estudio tiene como objetivo poder llevar a cabo la simulación de cambios de cobertura en este sector del municipio en un horizonte de 25 años, siendo este seleccionado como el tiempo de diseño de los sistemas de alcantarillado y drenaje en el territorio colombiano (RAS 2017). La simulación planteada permitió tener una aproximación a los tipos de cobertura esperados para el año 2049 y poder estimar de esta manera el grado de impermeabilización del terreno. Este nivel esperado de impermeabilización fue usado para estimar los parámetros hidrológicos de un escenario de drenaje futuro y de esta manera poder determinar el impacto del crecimiento urbano en la red de drenaje y el aumento de las inundaciones asociadas a este.

Para llevar a cabo dicha simulación de cambios de cobertura se usó una técnica de modelación basada en autómatas celulares, a través del Programa DINAMICA EGO, DINAMICA EGO es una herramienta poderosa para la simulación de dinámicas espaciales y temporales, permitiendo la integración de múltiples variables y escenarios para prever posibles futuros cambios

en el uso del suelo (Soares-Filho et al., 2018). El programa seleccionado, hace uso de mapas de cobertura de un año inicial, que para nuestro caso fue el año 2002, un año final de referencia para la calibración de los modelos (año 2024), y un año intermedio por medio del cual se pueden evaluar métricas de desempeño de las diferentes simulaciones, este año fue variable en esta tesis, a fin de poder tener diferentes escenarios y seleccionar aquellos de mejor desempeño. El uso de técnicas avanzadas de modelación espacial permite simular la expansión urbana y evaluar su influencia en el sistema de drenaje urbano, proporcionando información valiosa para la planificación y gestión sostenible del territorio (Zeng, Yu, & Li, 2018).

El crecimiento urbano descontrolado puede tener efectos adversos en el sistema de drenaje urbano, incrementando el riesgo de inundaciones y la contaminación de cuerpos de agua. Es crucial evaluar cómo la expansión de las áreas urbanas influye en la capacidad de los sistemas de drenaje para manejar el agua pluvial y residual. Estudios previos han demostrado que la urbanización no planificada puede alterar significativamente el ciclo hidrológico, aumentando la escorrentía superficial y disminuyendo la infiltración (Li et al., 2019; Wang & Zhang, 2020).

En conclusión, modelar el cambio de cobertura y uso del suelo para predecir la expansión urbana y evaluar su impacto en los sistemas de drenaje requiere un enfoque multidisciplinario que considere las complejas interacciones entre la urbanización, el cambio climático y la infraestructura de drenaje. Al incorporar soluciones de drenaje sostenibles, aprovechar los enfoques basados en la naturaleza e integrar marcos de evaluación avanzados, los responsables de políticas y los planificadores urbanos pueden anticipar y gestionar mejor los desafíos que plantea la expansión urbana en los sistemas de drenaje. A través de una planificación proactiva e intervenciones estratégicas, las ciudades pueden mejorar su resiliencia ante las presiones del crecimiento urbano y asegurar la gestión sostenible de su infraestructura de drenaje en medio de condiciones ambientales en evolución.

El análisis presentado en este trabajo proporciona una base para el desarrollo de políticas de planificación urbana que mitiguen los impactos negativos del crecimiento urbano en el sistema de drenaje. Al identificar áreas de riesgo y proyectar futuros escenarios de expansión urbana, los planificadores pueden diseñar estrategias más efectivas para gestionar el drenaje urbano y proteger los recursos hídricos (Zhou et al., 2021).

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

Analizar el cambio de coberturas y uso del suelo en el sector El Porvenir del municipio de Rionegro, mediante técnicas de modelación avanzada basada en autómatas celulares, haciendo uso del Programa DINAMICA EGO, con el fin de simular la expansión urbana a un horizonte de 25 años, y evaluar su influencia en el sistema de drenaje urbano.

1.2 Objetivos específicos

- Realizar un análisis detallado del cambio histórico de coberturas y uso del suelo en el sector El Porvenir del municipio de Rionegro, utilizando imágenes satelitales y datos geoespaciales.
- Aplicar técnicas de modelación y simulación para predecir la expansión urbana en el área de estudio durante un período de tiempo determinado.
- Evaluar el impacto potencial de la expansión urbana prevista en el sistema de drenaje urbano del municipio, considerando factores como la impermeabilización del suelo, el aumento de escorrentía superficial.
- Evaluar el impacto potencial esperado del cambio climático en el aumento de las inundaciones en el caso de estudio planteado.

2. Marco teórico

El conocimiento de los cambios en las coberturas y el uso del suelo es fundamental para la planificación de ciudades y la gestión de riesgos ambientales. Varios estudios se han centrado en modelar el cambio de cobertura y uso del suelo para predecir la expansión urbana y evaluar sus efectos en los sistemas de drenaje. Zhang et al, (2022) destacaron los impactos negativos de la urbanización en los sistemas de drenaje, enfatizando problemas como el aumento de las tasas de aguas residuales y de escorrentía pluvial debido al desarrollo urbano. Comprender estos impactos es crucial para desarrollar soluciones de drenaje sostenible y disminuir los riesgos por inundaciones.

El monitoreo de los cambios en el uso del suelo es crucial para entender las dinámicas territoriales y su impacto en los ecosistemas y las infraestructuras urbanas Zhao et al., (2018). La urbanización, la deforestación y otros cambios en la cobertura del suelo pueden tener efectos significativos en el medio ambiente. La predicción precisa de la expansión urbana es esencial para una planificación urbana informada. Ye (2023) enfatizó la importancia de predicciones realistas en la planificación urbana para asegurar un desarrollo sostenible en aspectos tanto ambientales como socioeconómicos. Analizar los cambios históricos en el uso del suelo y prever las tendencias futuras, como lo discutido por Rimal et al. (2020), puede apoyar una planificación efectiva del uso del suelo y resultados sostenibles

En este proceso de simulación de cambios de uso de suelo y cobertura, las imágenes satelitales y los datos geoespaciales son herramientas poderosas para realizar este tipo de análisis. Google Earth Pro, en particular, proporciona acceso a imágenes históricas y actuales, permitiendo un análisis temporal detallado Lu et al., (2018). Estudios recientes han demostrado la efectividad de las imágenes satelitales para monitorear cambios en la cobertura del suelo en diferentes contextos geográficos (Wang & Liu, 2019). En Colombia, investigaciones han evidenciado patrones de urbanización y sus efectos ambientales Gómez et al., (2020).

Las técnicas de modelación y simulación espacial son esenciales para predecir escenarios futuros de cambios en el uso del suelo y son fundamentales para la planificación urbana sostenible García et al., (2020). Dentro de las técnicas de modelación aparecen programas computacionales como DINAMICA EGO, la cual es una herramienta avanzada para la modelación espacial de

cambios en la cobertura del suelo, utilizando algoritmos de autómatas celulares y modelación basada en agentes para simular dinámicas espaciales complejas Soares-Filho et al., (2018). Investigaciones recientes han aplicado DINAMICA EGO para predecir la expansión urbana y evaluar sus impactos, destacando la importancia de considerar factores socioeconómicos y ambientales en la modelación Oliveira et al., (2019).

Poder simular o predecir en cierta medida la expansión urbana, y en particular la impermeabilización del suelo permite estimar el aumento esperado en la escorrentía superficial y de esta manera evaluar el rendimiento de los sistemas de drenaje urbano y en cierta medida proyectar el riesgo futuro de inundaciones urbanas Li et al. (2018). Evaluar estos impactos es crucial para una gestión eficaz del agua pluvial, Este enfoque, un poco más holístico permite una comprensión más matizada de las interacciones entre la expansión urbana, los cambios en la cobertura del suelo y el rendimiento del sistema de drenaje, facilitando la toma de decisiones informadas en la planificación urbana y el desarrollo de infraestructura.

Para abordar los desafíos que la expansión urbana plantea a los sistemas de drenaje, los investigadores han propuesto varios marcos de evaluación y metodologías. Coelho et al. (2022) se centraron en evaluar métodos para cobrar tarifas de drenaje urbano con el fin de financiar el mantenimiento de las redes de drenaje, enfatizando la importancia de mecanismos de financiamiento sostenibles para asegurar el correcto funcionamiento de los sistemas de drenaje. Tran et al. (2011) presentaron un marco de evaluación para analizar los impactos del cambio climático y la urbanización en los sistemas de drenaje urbano, destacando la necesidad de medidas proactivas para abordar los riesgos de inundaciones urbanas. Estos estudios subrayan la complejidad de la dinámica de expansión urbana y el papel crítico de una gestión efectiva de los sistemas de drenaje para mitigar los riesgos potenciales.

Es así como la integración de herramientas de modelación y monitoreo es vital para desarrollar estrategias de gestión sostenible que mitiguen los impactos negativos de la expansión urbana. El uso combinado de DINAMICA EGO para la predicción de cambios en la cobertura del suelo y EPA SWMM para la evaluación de impactos en el drenaje urbano proporciona una base sólida para la planificación y la toma de decisiones informadas. El modelo EPA SWMM es una herramienta eficaz para simular el comportamiento del agua pluvial en áreas urbanas, permitiendo

evaluar diferentes escenarios de desarrollo y su impacto en el drenaje urbano Rossman, (2018). Estudios recientes han utilizado EPA SWMM para analizar el impacto de la urbanización en sistemas de drenaje, demostrando su aplicabilidad en diversos contextos urbanos Chen et al., (2019). Estos estudios enfatizan la necesidad de integrar la planificación urbana con la gestión de recursos hídricos.

Adicionalmente, en el ámbito del desarrollo urbano, el impacto del cambio climático en la infraestructura de drenaje es una consideración crítica. El cambio climático y la urbanización están convergiendo para desafiar los sistemas de drenaje de las ciudades debido a sus efectos adversos sobre los patrones de precipitación y el entorno urbano Zhou, (2014). A medida que las ciudades se expanden, se vuelve cada vez más importante modelar este crecimiento para comprender los mecanismos y las consecuencias ambientales de la expansión urbana Zeng et al., (2018). En conclusión, considerar los impactos del cambio climático y la urbanización en la infraestructura de drenaje es esencial para diseñar sistemas urbanos resilientes.

En conclusión, entender el impacto de cambio climático, así como realizar modelación de los cambios en la cobertura y el uso del suelo son esenciales para entender, evaluar y gestionar los impactos de la expansión urbana en varios sistemas, como la infraestructura de drenaje en los sistemas de drenaje. La utilización de datos y de herramientas avanzadas como las imágenes satelitales, datos geoespaciales, DINAMICA EGO y EPA-SWMM permite a los planificadores urbanos y a los ingenieros sanitarios anticipar los desafíos y desarrollar soluciones sostenibles para la gestión del agua pluvial y la infraestructura urbana. A través de la utilización de técnicas de modelado avanzadas, la planificación proactiva y la integración de diversas metodologías, es posible mejorar la resiliencia de las ciudades frente a la expansión urbana y los cambios ambientales, así como una herramienta para que los investigadores y los responsables de políticas puedan comprender mejor y planificar un desarrollo urbano sostenible

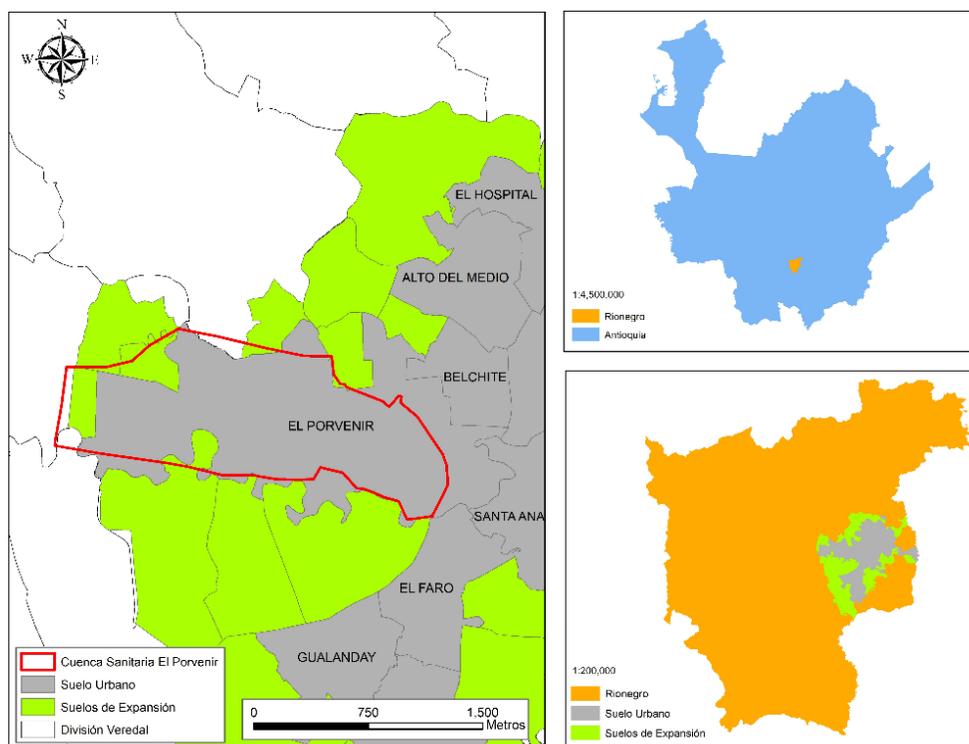
3. Descripción del área de estudio y la problemática

3.1 Área de estudio

El área de estudio de este trabajo se localiza en el municipio de Rionegro, Antioquia, Colombia, específicamente en el barrio Porvenir (ver Figura 1). Este municipio ha experimentado un notable crecimiento urbanístico, comercial e industrial en las últimas décadas, impulsado por el fortalecimiento de su economía a través de la industria, el comercio y la construcción. Esto se debe en parte a su ubicación geográfica estratégica, cercana al valle de Aburrá, y al hecho de contar con el aeropuerto José María Córdova, el segundo más importante del país (Amaya, 2021; IDOM, 2018; Ramírez y Gómez, 2020). Además, la zona urbana presenta oportunidades turísticas gracias a su proximidad a lugares como Llano grande, Comfama, Tutucán y San Antonio, y alberga numerosos sitios históricos y culturales de relevancia IDOM, (2018). También se destaca su fácil conexión con otros municipios del oriente antioqueño, los cuales están igualmente experimentando altas tasas de crecimiento y expansión.

Figura 1

Localización área de estudio

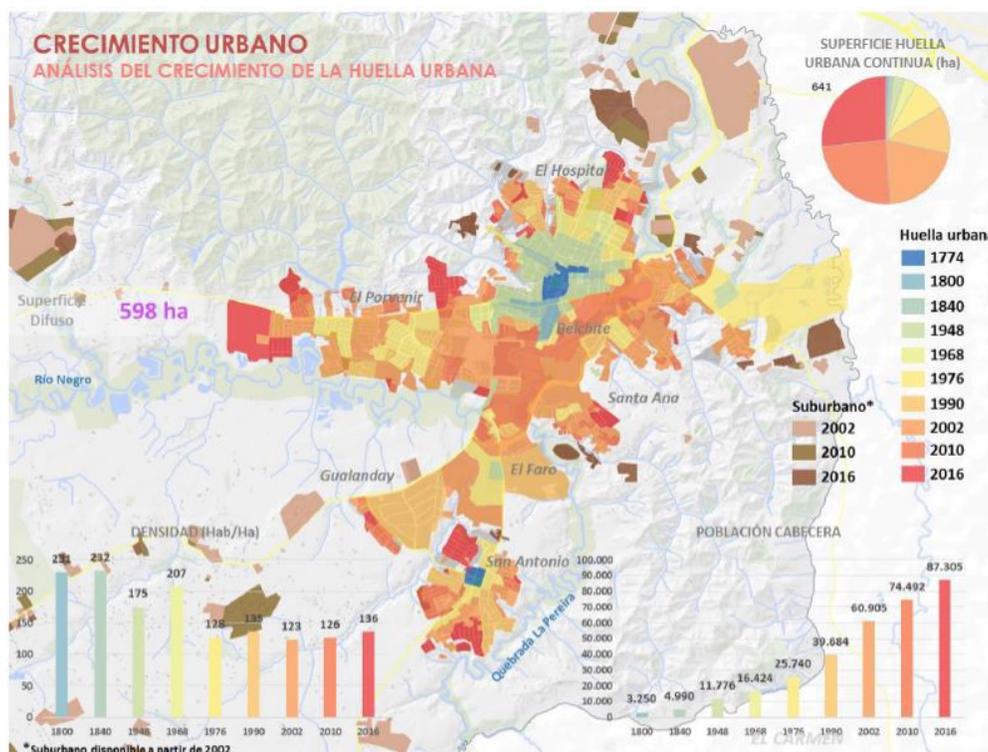


Nota. Fuente elaboración propia

Teniendo en cuenta las condiciones poblacionales de este municipio, la Figura 2 muestra el crecimiento y expansión de la huella urbana de Rionegro hasta el año 2016. Según el estudio urbanístico de IDOM (2018), para ese año la huella urbana del municipio era de 641 hectáreas (ha) y la población alcanzaba los 87,305 habitantes (hab). Esto da como resultado una densidad poblacional de 136 hab/ha. Este crecimiento urbano continúa hoy en el municipio.

Figura 2

Crecimiento de huella urbana del municipio Rionegro

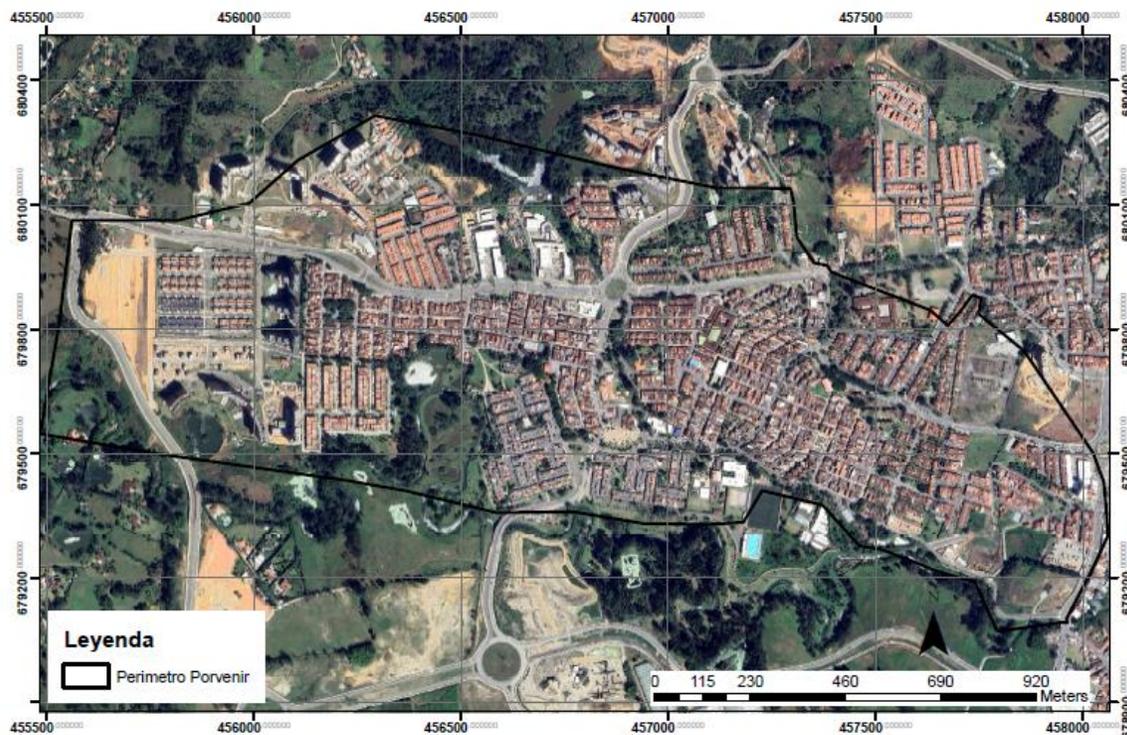


Nota. Fuente IDOM, 2018

El área de estudio de esta investigación es el barrio El Porvenir, ubicado en el sector occidental del municipio de Rionegro. Este barrio presenta una huella urbana significativa que está en proceso de expansión, especialmente hacia el oeste, como se ilustra en la Figura 3. El Porvenir es uno de los sectores más grandes del municipio y destaca por el crecimiento de su infraestructura. En 2016, la población del barrio era de aproximadamente 27,368 personas, consolidándose como uno de los polos de desarrollo del municipio en el Oriente antioqueño (Municipio de Rionegro y UCO, 2018; Palacio, 2019).

Figura 3

Delimitación cuenca porvenir



Nota. Fuente elaboración propia

El Plan de Ordenamiento Territorial de Rionegro de 2018 (Municipio de Rionegro y UCO, 2018), establecido por el acuerdo 056 de 2011, ha designado varias zonas de expansión, entre las cuales se encuentran áreas en el norte y oeste del barrio El Porvenir. Estas áreas, actualmente fuera de los límites urbanos, están experimentando un significativo desarrollo urbanístico, destacándose especialmente la zona norte del sector El Porvenir. Este crecimiento se debe al aumento de los usos mixtos a lo largo del eje de la calle 47, que además sirve como la principal vía de acceso desde el Aeropuerto José María Córdova al centro urbano del municipio. Como resultado, se ha generado un punto de convergencia donde se están llevando a cabo numerosos proyectos nuevos, principalmente de carácter residencial IDOM, (2018).

Entre los diversos proyectos en desarrollo, se observa una tendencia a dirigirse a grupos socioeconómicos altos. Las tipologías de vivienda incluyen conjuntos unifamiliares cerrados, edificios multifamiliares de gran altura (más de 10 pisos) y viviendas unifamiliares, todas con una

vía de acceso principal que conecta con la calle 47, comunicando así con el Aeropuerto José María Córdova y el centro urbano de Rionegro IDOM, (2018).

Es importante destacar que, aunque existen variaciones socioeconómicas en algunas zonas, en general, el barrio El Porvenir alberga una población de clase media y se caracteriza por viviendas unifamiliares de dos a tres pisos. No obstante, el barrio también se beneficia de la importante vía que conecta el centro urbano con el Aeropuerto José María Córdova. En los últimos años, se ha observado un crecimiento en el barrio con la construcción de conjuntos residenciales de estratos medios, predominando las viviendas de dos pisos.

Según la revisión y ajuste del POT de Rionegro (Municipio de Rionegro y UCO, 2018), el barrio El Porvenir presenta una economía diversa, con una comunidad que alberga variadas actividades comerciales y residenciales que contribuyen al desarrollo económico del área. Además, se destaca por su diversidad cultural y por contar con numerosos espacios que facilitan la integración comunitaria y fortalecen los lazos sociales, lo que conduce a la transformación del territorio (Municipio de Rionegro y UCO, 2018).

En términos de infraestructura de drenaje y alcantarillado, este barrio cuenta en algunos sectores con sistemas de alcantarillado pluvial, de aguas residuales y combinados. Sin embargo, algunas zonas han experimentado inundaciones y encharcamientos durante fuertes lluvias, según informes de prensa (Álvarez, 2022; Cortés, 2022; J. Ramírez, 2021). Se describirán más características y detalles de la problemática de las inundaciones en las siguientes secciones de este estudio.

3.2 Problemática e información recopilada en campo

Durante el recorrido de campo, varios residentes expresaron su preocupación por las frecuentes inundaciones que afectan tanto las vías como el interior de sus viviendas durante la temporada de lluvias, incluso en eventos no extremos. Estas observaciones refuerzan los problemas de inundaciones reportados en los artículos de prensa mencionados en la sección anterior. Según la información recopilada, en la parte baja del barrio El Porvenir, específicamente en las áreas cercanas a la quebrada Malpaso y el río Negro, existen dos tipos de inundaciones.

El primer tipo de inundación ocurre debido al aumento del nivel y desbordamiento de la quebrada Malpaso y el Lago de Vegas de la Calleja. En estos eventos, el agua de lluvia (o

combinada) y la propia agua de la quebrada no pueden ser descargadas por las redes de alcantarillado debido a los altos niveles de las fuentes receptoras, lo que provoca que el agua retroceda por las tuberías y salga a la superficie a través de las cámaras de inspección, los sumideros e incluso los sifones de piso de las viviendas. La zona identificada que sufre este tipo de inundación se encuentra en la Calle 40 con Carrera 61F.

El segundo tipo de inundación mencionado por la comunidad ocurre debido a la incapacidad hidráulica del sistema de alcantarillado. Es decir, las tuberías no tienen el diámetro y la pendiente adecuados, lo que genera una sobrepresión de agua en las tuberías, haciendo que esta salga por las cámaras de inspección del sistema.

A continuación, se presentan algunos registros fotográficos proporcionados por la comunidad, que evidencian los tipos de inundaciones descritos. Para ilustrar el primer tipo de inundación mencionado por los residentes de El Porvenir, se muestra la inundación ocurrida en el barrio Vegas de la Calleja, en la Calle 40 con Carrera 61F, el 28 de octubre de 2022. En la Figura 4 se puede ver uno de los sectores más propensos a inundaciones. Esta área tiene la desventaja de contar con una topografía muy plana, que visualmente se asemeja a una batea. Según testimonios de los habitantes, esta es una zona que se inunda frecuentemente durante eventos de precipitación.

Figura 4

Sector propenso a ser inundado ubicado en la calle 40 con Carrera 61F.



Fuente: Propia, salida de campo

En este mismo lugar, algunos residentes informaron que el nivel del agua ha llegado a alcanzar entre 10 y 15 cm dentro de sus viviendas. Incluso, en la Figura 5 se muestran las medidas preventivas que toman estos habitantes para evitar inundaciones, ya que el agua se retorna por los sifones de piso de las viviendas.

Figura 5

Medidas de prevención para prevenir inundaciones dentro de las viviendas.



Fuente: Habitante del sector.

En la Figura 6 se muestra la inundación que tuvo lugar en este sector el 28 de octubre de 2022. En la imagen se puede ver que toda la Calle 40 estaba inundada, y el nivel del agua era lo suficientemente alto como para ingresar a las viviendas adyacentes a esta calle.

Figura 6

Inundación ocurrida en la calle 40 con carrera 61F el 28 de octubre de 2022.



Fuente: Habitante del sector.

En esta misma área se encuentra el lago de Vegas de la Calleja, que recibe descargas de aguas lluvias para amortiguar los picos de caudal que ocurren en la red durante eventos de precipitación. No obstante, los residentes del barrio han informado que, durante lluvias intensas, el lago se desborda y causa inundaciones en la calle 40 y en las zonas cercanas. La Figura 7 muestra las condiciones del lago de Vegas de la Calleja en el momento de la visita de campo. Es importante destacar que, durante la visita y en los días anteriores, no se registraron eventos de precipitación.

Figura 7

Lago de Vegas de la Calleja.



Fuente: Propia, salida de campo

En la Figura 8 se muestra el alto nivel del agua del lago de Vegas de la Calleja, mientras que en la Figura 9 se observa el nivel del río Negro el 28 de octubre de 2022. Es importante destacar que, cerca de esta área específica, la quebrada Malpaso desemboca en el cauce del río Negro. Aunque no se dispone de un registro fotográfico de la quebrada Malpaso en esa fecha, se presume que su nivel de agua también era elevado, lo que podría haber provocado el colapso del sistema de alcantarillado en las zonas cercanas a la quebrada.

Figura 8

Nivel del agua del lago de Vegas de la Calleja el día 28 de octubre de 2022.



Fuente: Habitante del sector.

Figura 9

Nivel del agua del río Negro el día 28 de octubre de 2022



Fuente: Propia, Extracción de Google maps (Izquierda) y salida de campo (derecha)

Para ilustrar el segundo tipo de inundación mencionado por la comunidad de El Porvenir, se presenta la inundación causada por la incapacidad hidráulica del sistema de alcantarillado en la carrera 62 y áreas circundantes. En la Figura 10 se muestran las fotografías recopiladas durante la visita de campo a esta zona específica. Este sector se caracteriza por un cambio significativo de pendiente, pasando de una zona con alta inclinación a una zona muy plana.

Figura 10

Registro fotográfico de la zona ubicada en la carrera 62.



Fuente: Propia, salida de campo

En la Figura 11, se muestra la inundación ocurrida el 13 de noviembre de 2022 en toda la carrera 62. Se observa que el sistema de alcantarillado, debido a un aumento de presión, provoca el desprendimiento de una de las tapas de las cámaras de inspección, lo que resulta en la salida de agua de dicha cámara e inunda la zona de la carrera 62.

Figura 11

Registro fotográfico de la zona ubicada en la carrera 62.



Fuente: Habitante del sector.

En resumen, a partir de los datos recopilados antes de la salida de campo, las observaciones directas realizadas durante la misma, y la interacción con los residentes del sector, se plantean los siguientes comentarios:

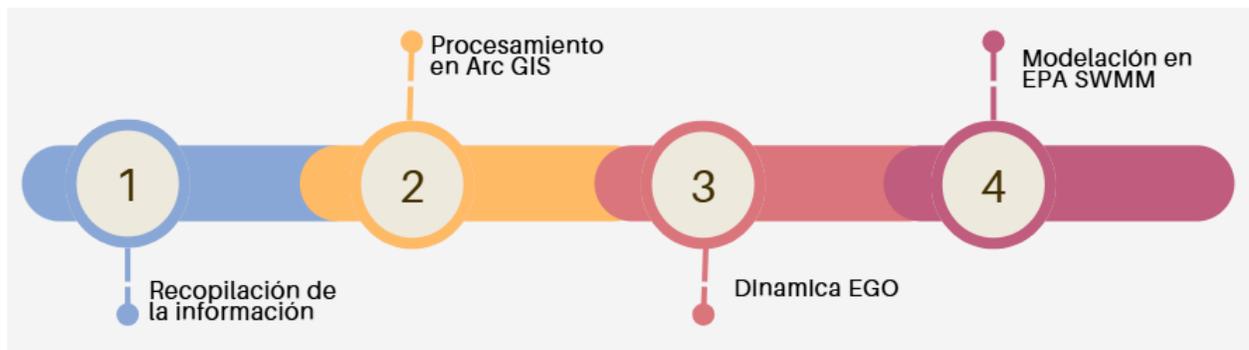
- En la parte baja de la cuenca de El Porvenir, los sistemas de alcantarillado de aguas lluvias generan frecuentes inundaciones, según lo indicado por la comunidad. Por lo tanto, es necesario considerar soluciones integrales desde la parte alta de la cuenca para evitar que el caudal pico de aguas lluvias llegue a la quebrada durante eventos de precipitación.
- Durante eventos de precipitación, el nivel del agua en la quebrada Malpaso y en el río Negro supera la cota de descarga de las tuberías de alcantarillado, impidiendo la descarga por gravedad de las aguas lluvias y/o combinadas de las redes. Esto genera un efecto de remanso de agua al interior de las redes de alcantarillado, aumentando el riesgo de inundaciones en las vías y zonas bajas circundantes.

4. Metodología

Para alcanzar los objetivos propuestos en esta investigación, se utilizará una metodología basada en cuatro etapas, las cuales se ilustran en la Figura 12. Cada una de estas etapas se describe en detalle en esta sección.

Figura 12

Descripción de la metodología a implementar en este trabajo.

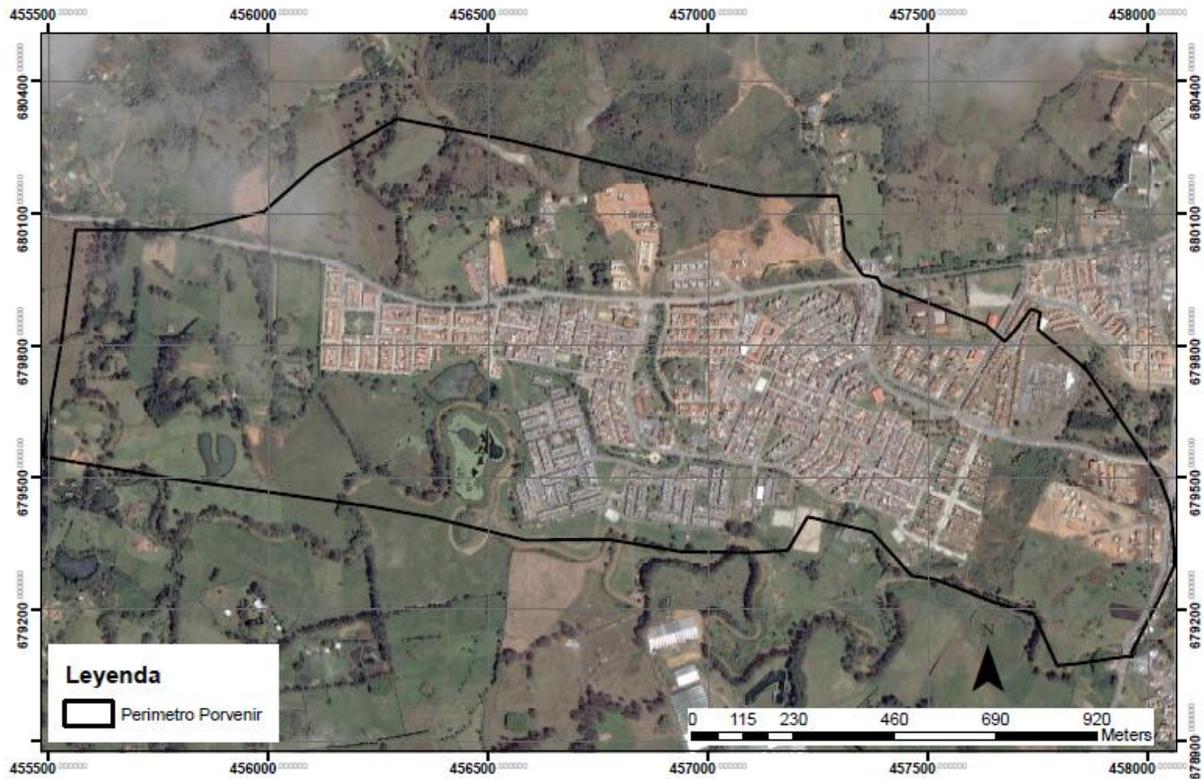


4.1 Recopilación de la información

Para la realización del trabajo de grado, se emplearon diversas fuentes de información. En primer lugar, se utilizó Google Earth pro, mediante la cual se accedió a imágenes satelitales disponibles. Estas imágenes corresponden a diferentes años clave para el estudio: 2002, 2009, 2010, 2013, 2014, 2017, 2018, 2020, 2022 y 2024. Este enfoque permitió obtener una serie temporal que facilitó el análisis y la evaluación de cambios relevantes para la investigación. En los anexos de la investigación se encuentra las imágenes satelitales de los años 2009, 2010, 2013, 2014, 2017, 2018, 2020, 2022 y 2024

Figura 13

Imágenes descargadas de Google Earth pro de los años 2002



Nota. Fuente elaboración propia

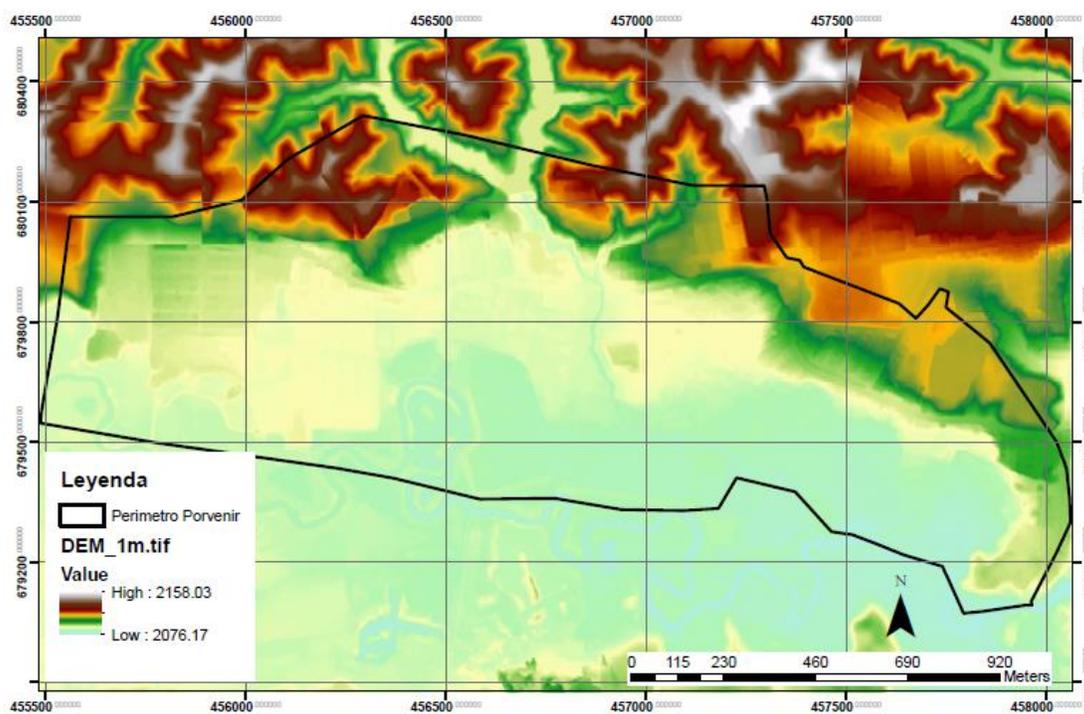
Es fundamental mencionar que este trabajo de grado es parte de un componente del proyecto de investigación de Lizeth Urán Duque, estudiante de maestría en la Universidad de Antioquia y empleada de Empresas Públicas de Medellín (EPM). Por esta razón, la recopilación de datos se realiza de manera directa y conjunta a partir de la tesis de maestría y la información proporcionada por EPM y su geoportal. De este portal se obtuvo toda la información relacionada con la geodatabase de la red de alcantarillado de agua lluvia, residual y combinada. Asimismo, se accedió a información topográfica y datos hidrológicos de la zona de estudio.

4.1.1 Información topográfica y modelo digital de terreno (DEM)

Los DEM se utilizan para analizar la topografía de un área, lo que es esencial para la expansión urbana y el desarrollo de infraestructuras. Esto ayuda a identificar áreas adecuadas para el desarrollo urbano y a evitar zonas propensas a desastres naturales como inundaciones y deslizamientos de tierra (Population Division, 2018).

Figura 14

Información topográfica del sector porvenir



Nota. Fuente elaboración propia

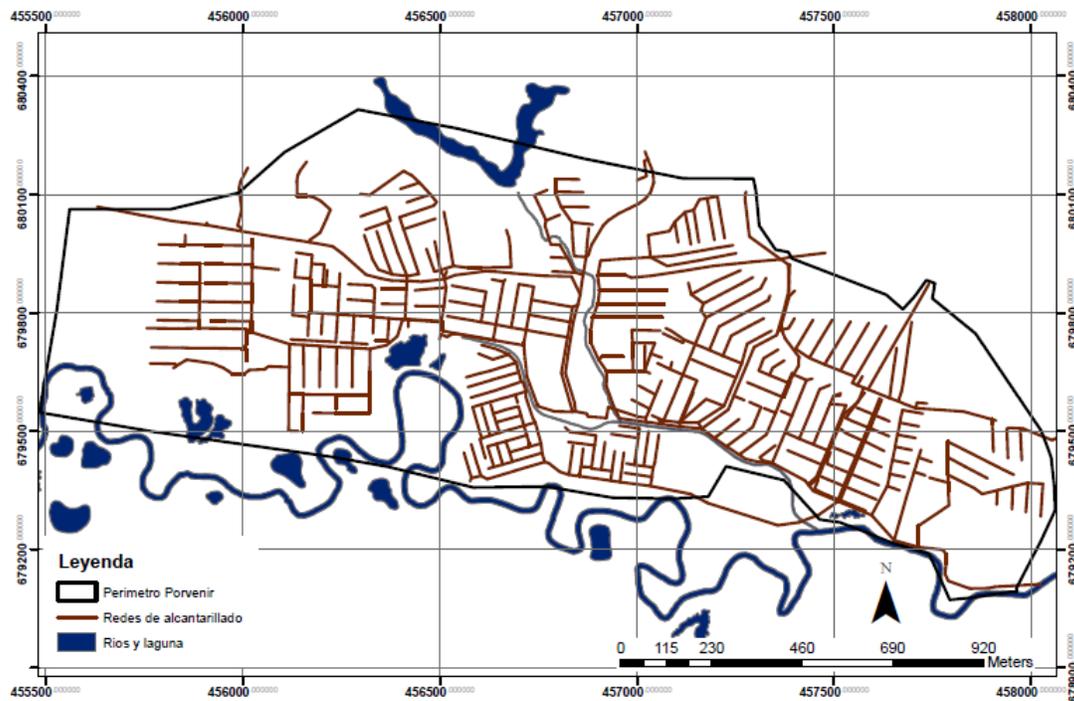
4.1.2 Redes Alcantarillado y Drenaje

Un sistema de alcantarillado eficiente es crucial para la salud pública y el bienestar de la comunidad. La adecuada gestión de aguas residuales previene enfermedades, mejora la calidad de vida y hace que un área sea más atractiva para vivir. Además, la existencia de una infraestructura de saneamiento es un indicador clave de desarrollo urbano, incentivando el crecimiento demográfico (Gutiérrez & Ramírez, 2020).

Finalmente, la proximidad a ríos ofrece diversas ventajas, como el suministro de agua y oportunidades para la agricultura, pesca y recreación. No obstante, también pueden presentar riesgos, como inundaciones, si no se gestionan adecuadamente. La cercanía a ríos puede atraer asentamientos humanos debido a los recursos disponibles, pero también requiere una infraestructura adecuada para mitigar posibles desastres naturales y garantizar un crecimiento poblacional sostenible (López et al., (2019).

Figura 15

Redes de Alcantarillado y cuerpos de agua sector porvenir



Nota. Fuente elaboración propia

4.1.3 Vías

La presencia de infraestructuras de transporte, como carreteras y caminos, facilita el acceso a diversas áreas, impulsando la expansión urbana y la movilidad de la población. Las buenas vías de comunicación mejoran el acceso a servicios esenciales, como educación y salud, y fomentan el comercio y la industria, atrayendo a más residentes a la zona (Rodríguez & Martínez, 2018).

Figura 16*Vías del sector porvenir*

Nota. Fuente elaboración propia

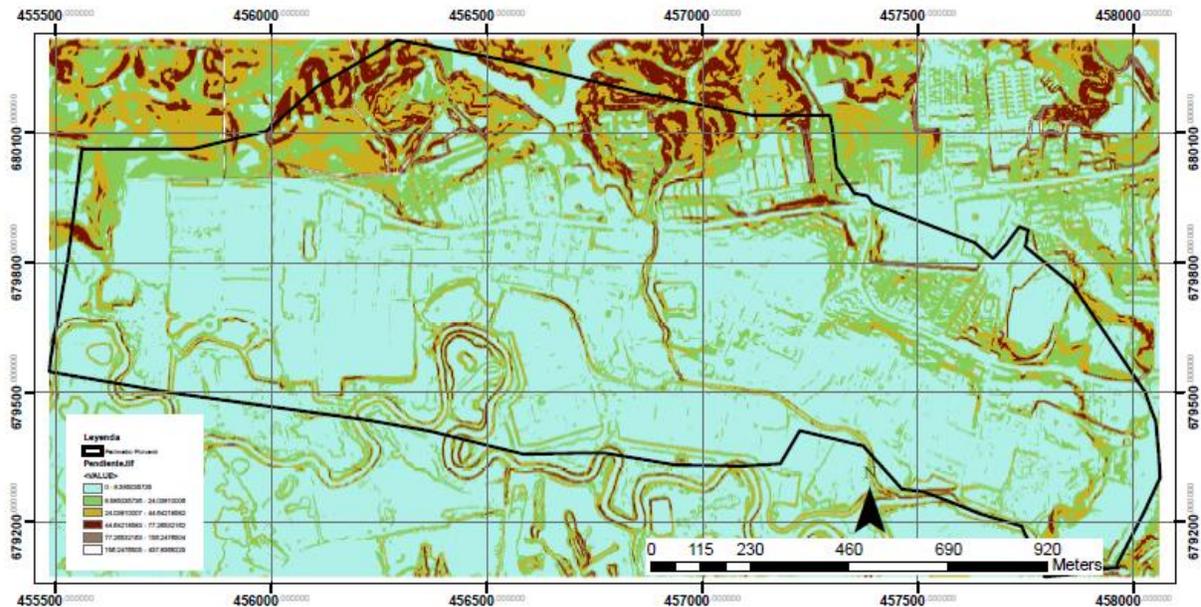
4.2 Procesamiento en Arc GIS

4.2.1 Pendiente

Utilizando la herramienta ArcGIS y aplicando el Modelo Digital de Elevación (DEM) con una resolución de 1x1, se generó un mapa de pendientes. Posteriormente, se realizó una reclasificación de los datos obtenidos empleando ArcGIS, con el objetivo de integrar este mapa en un cubo ráster. Este proceso permite una visualización y análisis detallado de la topografía y las características del terreno, esenciales para diversas aplicaciones en la gestión de recursos naturales y planificación urbana.

Figura 17

Mapa de pendiente sector porvenir



Nota. Fuente elaboración propia

4.2.2 Distancia a variables estáticas

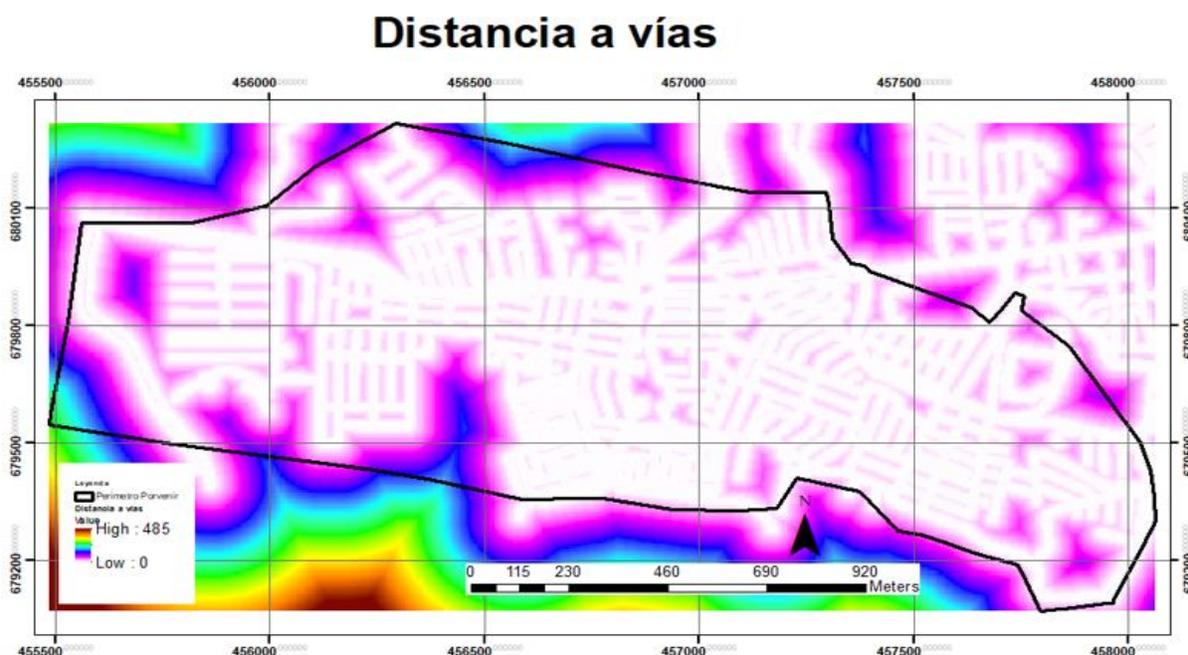
Mediante el uso de la herramienta ArcGIS y con la información proporcionada en las figuras 15 y 16, se procedió a calcular la distancia a las variables estáticas utilizando la herramienta de distancia euclidiana en ArcGIS. Este proceso permitió generar datos precisos, los cuales se presentan en la Figura 18, 19 y 20. Posteriormente, estos datos se reclasificaron para ser integrados en un cubo ráster, facilitando así un análisis espacial más detallado y exhaustivo.

El uso de la herramienta de distancia euclidiana en ArcGIS es esencial para este tipo de análisis, ya que permite calcular la distancia mínima desde cada celda del ráster hasta la ubicación más cercana de las variables estáticas consideradas. Esta metodología es especialmente útil en estudios de accesibilidad y planificación urbana, donde la proximidad a ciertos puntos de interés, como hospitales, escuelas y áreas verdes, puede influir significativamente en la toma de decisiones (ESRI, 2020; Longley, Goodchild, Maguire, & Rhind, 2020).

Además, la integración de estos datos en un cubo ráster permite realizar análisis multidimensionales y temporales, proporcionando una visión más completa y dinámica del área de estudio. Esta metodología es ampliamente utilizada en investigaciones geoespaciales y en la gestión de recursos naturales, ofreciendo una herramienta poderosa para el análisis y la visualización de datos geográficos (Harris & White, 2018; Heywood, Cornelius, & Carver, 2021).

Figura 18

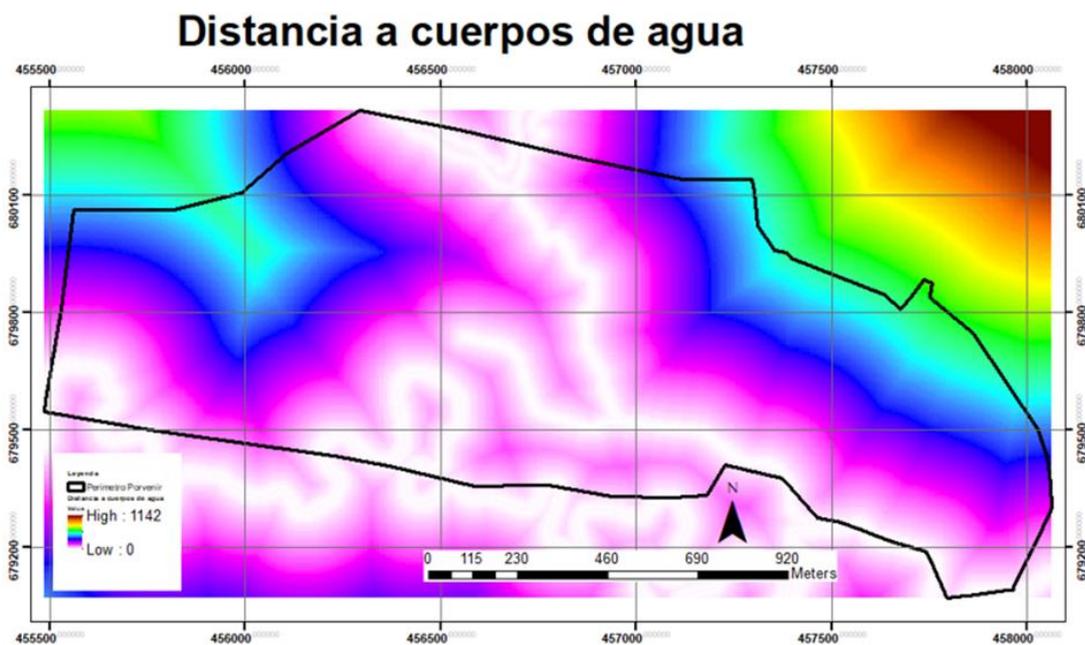
Mapa de distancia a las vías sector porvenir



Nota. Fuente elaboración propia

Figura 19

Mapa de distancia a cuerpos de agua sector porvenir



Nota. Fuente elaboración propia

Figura 20

Mapa de distancia a las redes de alcantarillado sector porvenir



Nota. Fuente elaboración propia

4.2.3 Uso de suelo perímetro porvenir

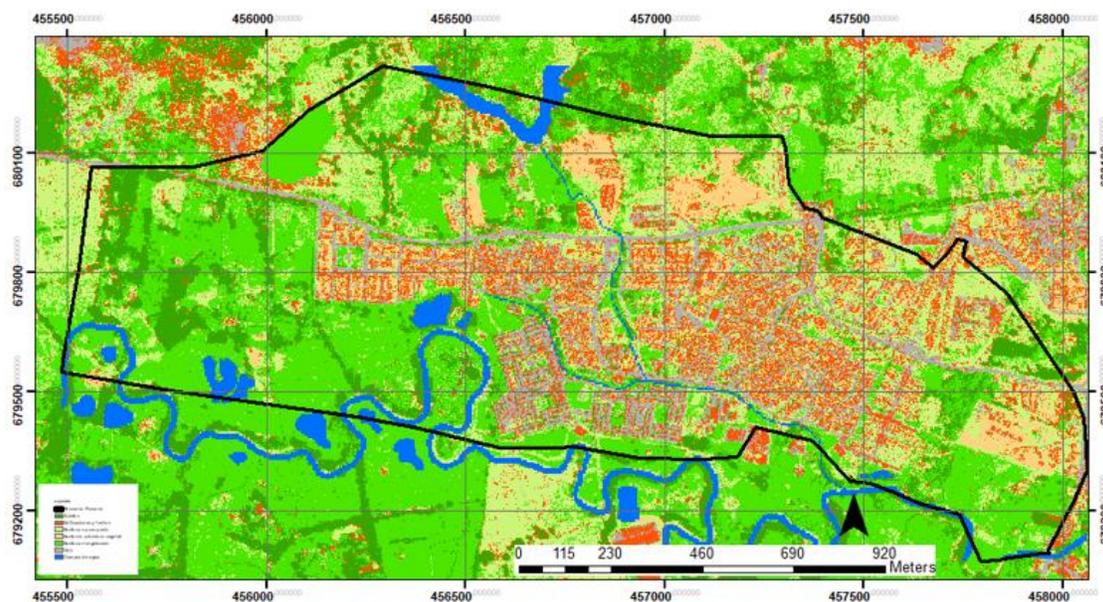
Utilizando la herramienta ArcGIS y la información proporcionada en la figura 13, se llevó a cabo la clasificación del uso del suelo para todos los mapas observados en las imágenes georreferenciadas. Se realizaron dos clasificaciones de suelo distintas: una empleando 7 clasificaciones de uso de suelo que son Árboles, edificaciones y techos, suelo con poco pasto, suelo sin cobertura vegetal, suelo con vegetación, vías y agua, para realizar una comparación del ruido que se puede generar con la clasificación de uso de suelo se realiza una utilizando 5 clasificaciones de uso de suelo que son Árboles, edificaciones-techos y vías, suelo con poco pasto y suelo con vegetación, suelo sin cobertura vegetal, y agua. Este enfoque permitió una evaluación detallada y comparativa del uso del suelo, proporcionando una base sólida para el análisis ambiental y la planificación territorial en nuestro estudio.

- **Superficies impermeables:** Compuestas por las vías y de las edificaciones con sus respectivos techos
- **Superficies permeables:** Compuesta por los árboles, suelo sin cobertura vegetal, suelo con vegetación y suelo con poco pasto
- **Superficies de retención:** Compuesta de cuerpos de agua como lo son los lagos, las quebradas y el río Negro.

Una vez definidas las clases, se prepararon archivos semilla para entrenar el algoritmo de clasificación del uso del suelo lo cual dio como resultado la clasificación que se observa en la figura 21 y 22. En los anexos de la investigación se encuentra los mapas con clasificación 7 y 5 de uso de suelo para los años 2009, 2010, 2013, 2014, 2017, 2018, 2020, 2022 y 2024

Figura 21

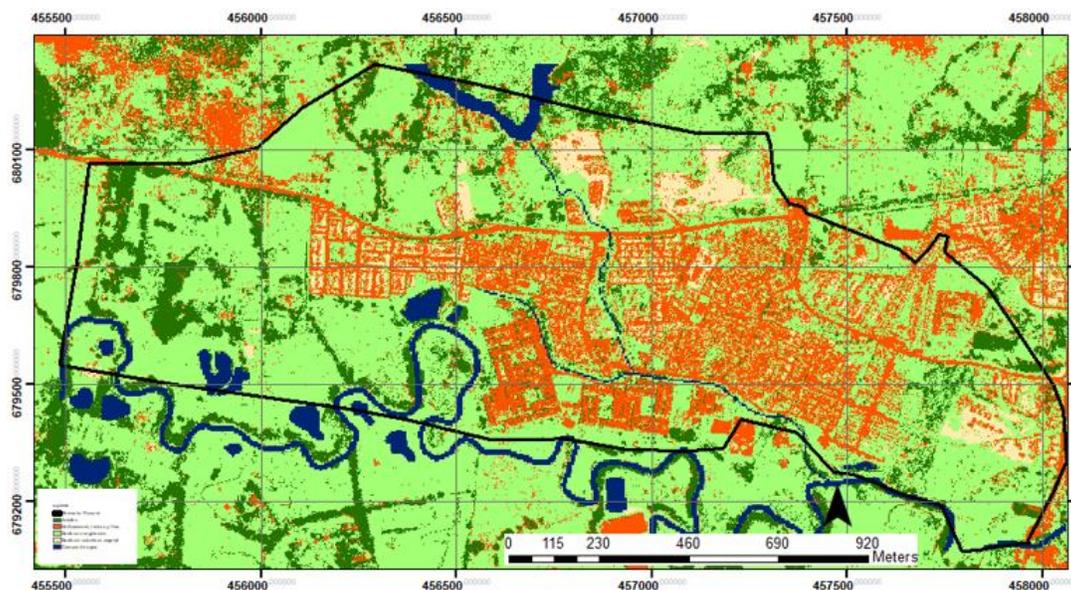
Cobertura del Uso del Suelo en el Sector Porvenir en el Año 2002 con Siete Categorías de Clasificación



Nota. Fuente elaboración propia

Figura 22

Cobertura del Uso del Suelo en el Sector Porvenir en el Año 2002 con cinco Categorías de Clasificación



Nota. Fuente elaboración propia

4.3 Dinámica EGO

4.3.1 Determinación de escenarios

Con el fin de identificar patrones y comparar escenarios, se decidió crear múltiples escenarios que permitan analizar el comportamiento de la zona de interés. En la tabla 1 y 2, se especifican los mapas iniciales, los mapas finales y los mapas de validación. Además, todos los escenarios se proyectaron hasta el año 2049, en conformidad con el tiempo de diseño regulado por las normativas del RAS. Esta metodología asegura un análisis exhaustivo y prospectivo, facilitando una comprensión integral de las dinámicas futuras de la zona estudiada.

Tabla 1

Escenarios llevados a DINAMICA EGO con clasificación de uso de suelo 7

Escenarios	Mapa inicial	Mapa final	Mapa observado	Mapa simulado
M1	2002	2014	2024	2049
M2	2002	2018	2024	2049
M3	2009	2017	2024	2049
M4	2010	2018	2024	2049
M5	2014	2018	2022	2049
M6	2018	2020	2022	2049

Tabla 2

Escenarios llevados a DINAMICA EGO con clasificación de uso de suelo 5

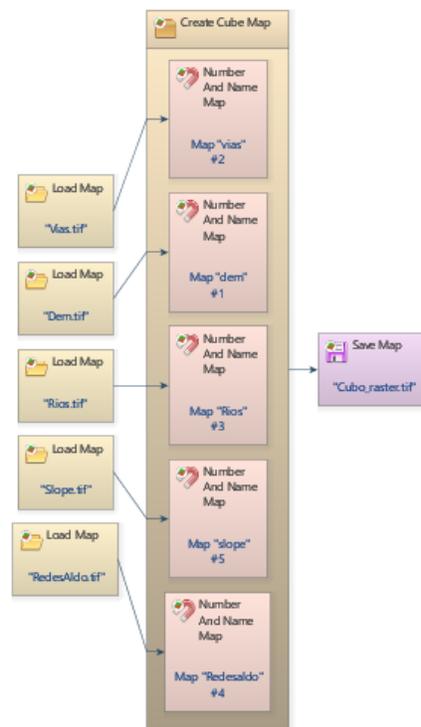
Escenarios	Mapa inicial	Mapa final	Mapa observado	Mapa simulado
N1	2002	2014	2024	2049
N2	2002	2018	2024	2049
N3	2009	2017	2024	2049
N4	2010	2018	2024	2049
N5	2014	2018	2022	2049
N6	2018	2020	2022	2049

4.3.2 *Cubo ráster*

Con el fin de simplificar y mejorar la visibilidad del modelo, se creó un ráster que almacena todas las variables estáticas y dinámicas, tales como el DEM, la pendiente, la distancia a vías, la distancia a redes de alcantarillado y la distancia a ríos. Este enfoque permite una integración más eficiente y coherente de los datos.

Figura 23

Cubo ráster

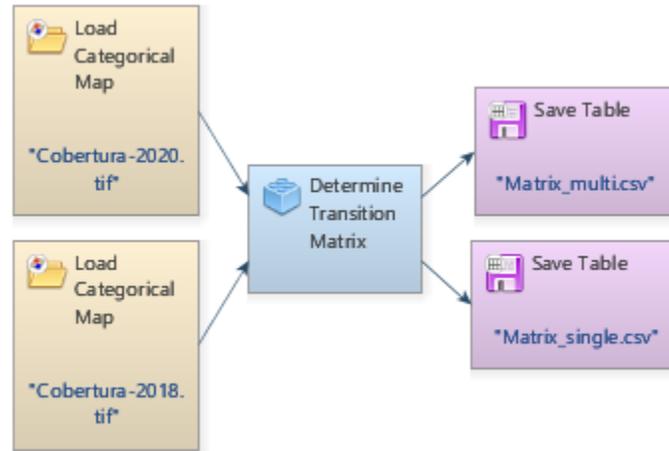


4.3.3 *Matriz de transición*

A partir de las evidencias de cambios entre un paisaje inicial y uno final, se calculó una matriz de transición histórica. Esta matriz describe el porcentaje en el que un sistema cambia en incrementos de tiempo discretos. Las tasas de transición establecen la cantidad neta de cambios, es decir, el porcentaje de tierra que cambiará a otro estado en términos de uso y cobertura del suelo, por lo que se las conoce como tasas netas. Para esta investigación, se crearon 24 matrices de transición diferentes, cada una correspondiente a uno de los modelos estudiados. En la figura 24 se observa el modelo diseñado para realizar el cálculo de esta matriz

Figura 24

Matriz de transición



4.3.4 Determinación del peso de evidencia

Los pesos de evidencia constituyen un método bayesiano en el que el efecto de una variable espacial sobre una transición se calcula de manera independiente de una solución combinada, resultando en un mapa de probabilidad de transición. Este método representa la influencia de cada variable en la probabilidad espacial de una transición de un uso de la tierra a otro (ij). Los pesos de evidencia se calculan según la metodología descrita por (Bonham-Carter,1994).

$$O\{D|B\} = \frac{P\{D|B\}}{P\{D^c|B\}} \quad \text{Ecuación 1}$$

$$\log\{D|B\} = \log\{D\} + W^+ \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde w^+ es el Peso de la Evidencia de que ocurra el evento D, dado un patrón espacial B. La post-probabilidad espacial de una transición de i a j, dado un conjunto de datos espaciales (B, C, D,... N), se expresa de la siguiente manera

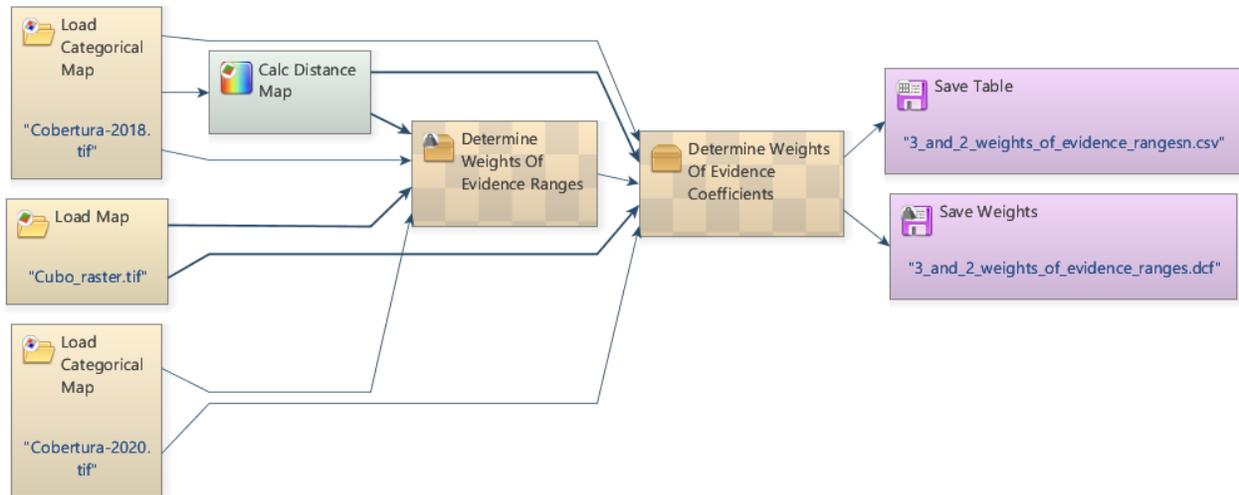
$$P\{i \Rightarrow j|B \cap C \cap D \dots \cap N\} = \frac{e^{w^+ N}}{1 + e^{\sum w^+ N}} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde B, C, D y N son los valores de k variables espaciales que se miden en la ubicación x e y están representados por sus pesos $W^+ N$

En la figura 25 se observa el modelo para realizar el cálculo de los rangos y pesos de evidencias

Figura 25

Rangos y pesos de evidencias

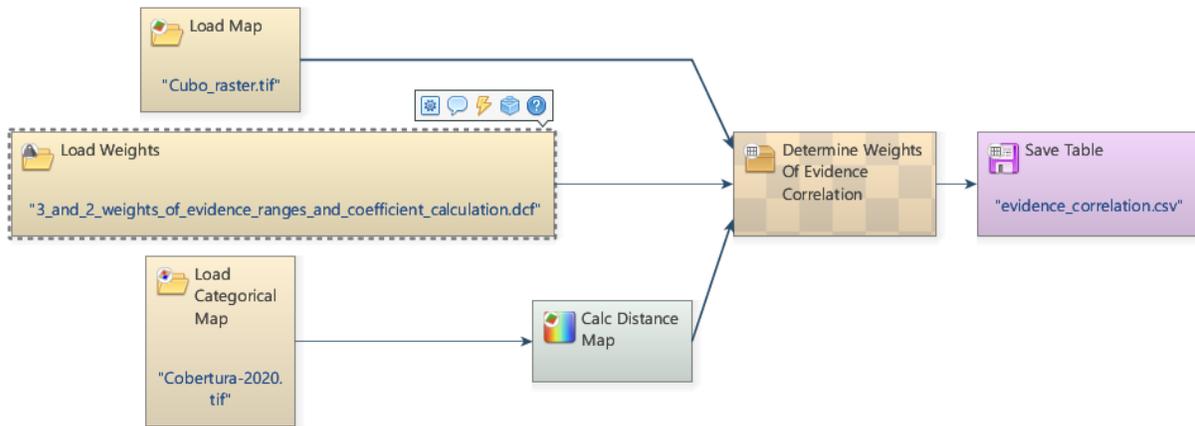


4.3.5 Correlación evidencia

El principal supuesto del método de Pesos de Evidencia es que los mapas de entrada deben ser espacialmente independientes. Se pueden aplicar un conjunto de medidas para evaluar este supuesto. En esta investigación, se utilizó la prueba de Cramer y la Incertidumbre de Información Conjunta para analizar si las variables son espacialmente independientes o no. Si de estas pruebas surgen variables correlacionadas, estas deben ser descartadas, ya que esto indica que uno de los mapas es redundante y, por lo tanto, no es necesario en la simulación. En la figura 26 se observa con se realizó el cálculo de la correlación entre las evidencias

Figura 26

Correlación de evidencia



4.3.6 Simulación del modelo

- **Modelo:** Consiste en un conjunto de funtores que realizan la simulación del cambio en el uso del suelo. Estos funtores se describen brevemente a continuación:
- **Mux Categorical Map:** Este funtor permite la actualización dinámica del mapa del paisaje de entrada.
- **Calc Distance Map:** Calcula un mapa que representa la distancia frontal (en metros) entre una celda y la celda más cercana de una categoría específica indicada en el "Categorical Map".
- **Calc Change Matrix:** Recibe la matriz de transición, compuesta por tasas netas, y la utiliza para calcular tasas brutas en términos de cantidad de celdas a cambiar, multiplicando las tasas de transición por el número de celdas disponibles para un cambio específico.
- **Modulate Change Matrix:** Este funtor se utiliza para dividir la cantidad de cambios entre diferentes tipos de funciones de transición, en este modelo entre el Expander y el Patcher.
- **Calc W. of E. Probability Map:** Calcula un mapa de probabilidad de transición para cada transición especificada sumando los Pesos de la Evidencia, utilizando la ecuación 3.
- **Expander:** Dedicado exclusivamente a la expansión o contracción de parches previos de una clase determinada.

- **Patcher:** Diseñado para generar o formar nuevos parches a través de un mecanismo de siembra.
- **Parámetros de Salida:**
- **Mapa:** Corresponde al mapa de uso del suelo simulado.
- **Mapa Probabilidades:** Mapa ráster de salida que representa la probabilidad de cambio.

Para configurar los funtores Expandir y Patcher, fue necesario definir tres parámetros: Tamaño medio del parche, Varianza del tamaño del parche e Isometría. Al variar estos parámetros de entrada, estos funtores permiten la formación de parches de cambio de diferentes tamaños y formas. Los dos primeros parámetros están relacionados con el tamaño de los parches y se establecen de acuerdo con una distribución de probabilidad log-normal. Por lo tanto, es necesario especificar los parámetros de esta distribución representados por la media y la varianza de los tamaños de los parches a formar, mientras que la Isometría está relacionada con la forma de los parches a formar.

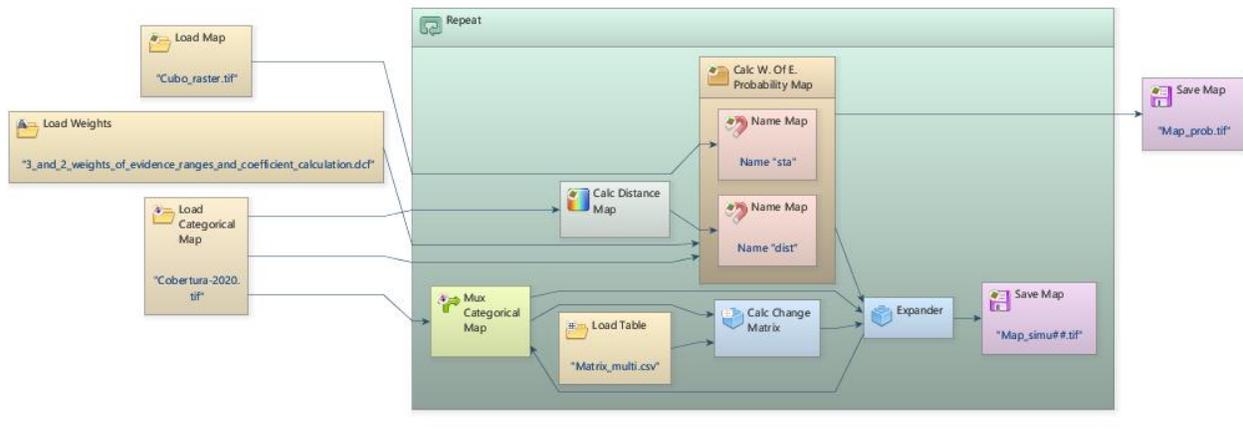
No hay un valor específico que se pueda asignar a estos tres parámetros de transición, así como a la Modulate Change Matrix. Los valores basados en la literatura (Britaldo S & Rodrigues H, 2009) se utilizaron como valores iniciales (o predeterminados) para iniciar las simulaciones:

- Modulate Change Matrix: 0.2
- Tamaño medio del parche: El valor en hectáreas de 4 celdas.
- Varianza del tamaño del parche: El valor en hectáreas de 8 celdas.
- Isometría: Varía de 0 a 2. Los parches asumen una forma más isométrica a medida que este número aumenta, asumiéndose un valor de 1 como predeterminado.

En la figura 27 se presenta el modelo de simulación que se aplicará en cada uno de los escenarios detallados en las tablas 1 y 2, proyectándose hasta el año 2049.

Figura 27

Simulación

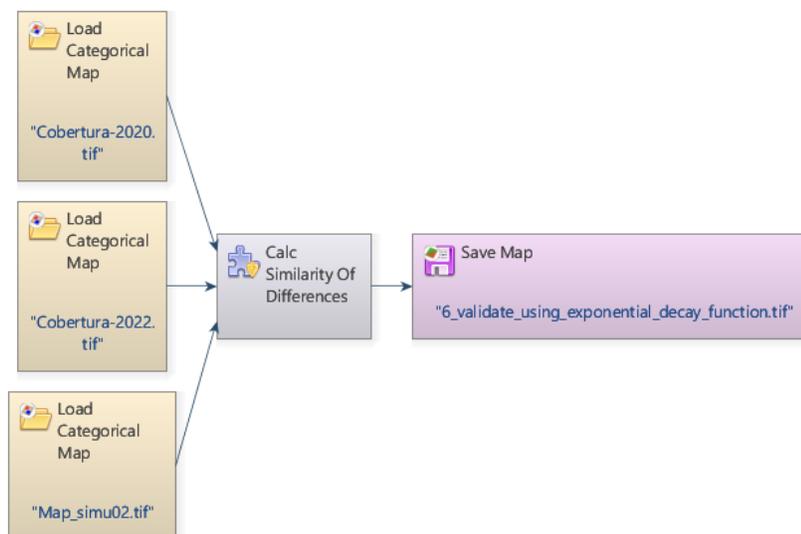


4.3.7 Validación de un modelo de cambio de uso de suelo

Con el propósito de verificar si el modelo ha realizado una proyección precisa del uso del suelo, se lleva a cabo una validación que nos permite comparar las predicciones del modelo con la realidad observada. Se utiliza un mapa independiente para evaluar qué tan similar es el modelo simulado al observado, proporcionando así una medida objetiva de la habilidad del modelo para capturar los patrones reales de cambio en el uso del suelo. En la figura 28 se observa el método para realizar la validación del modelo.

Figura 28

Validación de los escenarios generados por Dinamica EGO



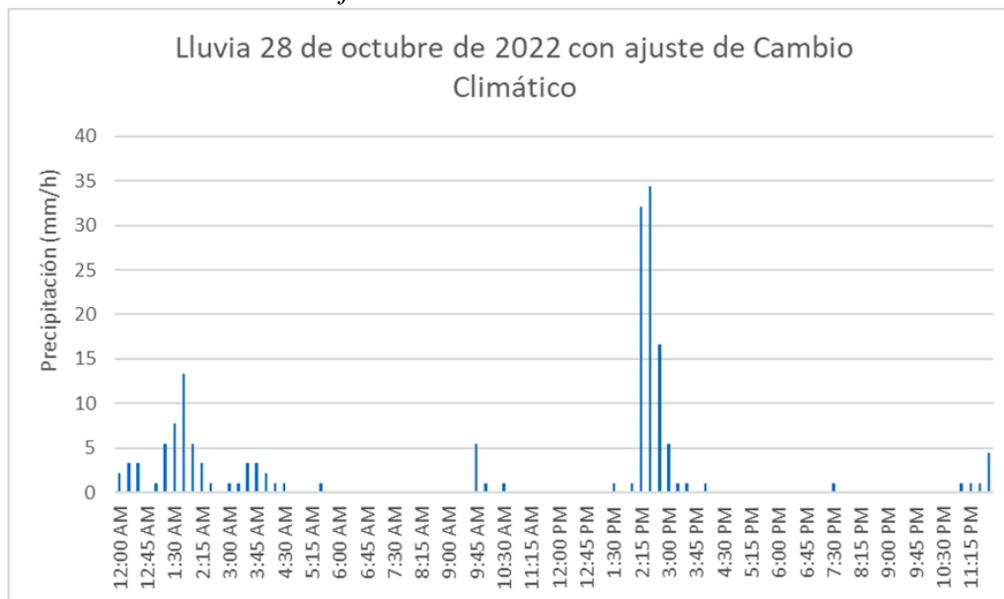
4.4 Modelación EPA SWMM

4.4.1 Lluvia del 28 octubre con ajuste de cambio climático

Con el propósito de observar las diferencias en el caudal y el tiempo de llegada del agua, se decide utilizar los datos de la lluvia del 28 de octubre de 2022. Mediante el análisis de esta precipitación específica, se pretende visualizar y comparar la variación de estas dos variables tanto en el escenario actual como en los escenarios futuros de la cuenca Porvenir. En la gráfica 29 se observa el comportamiento que tuvo la dicha lluvia el día 28 de octubre de 2022

Figura 29

Luvia del 28 de octubre 2022 con ajuste de cambio climático



Nota. Fuente elaboración propia

4.4.2 Curva numero

Para asignar los valores de número de curva (CN) a las subcuencas generadas en el área de interés, se utilizaron como insumos los datos de uso del suelo, el tipo de suelo y una imagen satelital. Estos elementos permitieron asociar las características físicas del suelo con su capacidad de infiltración. Lo primero es determinar el porcentaje de impermeabilización de cada subcuenca en los escenarios actuales y futuros, tanto en los modelos con 7 como con 5 variables de clasificación de uso del suelo. Esto se realiza con el objetivo de asignar un valor adecuado a cada una de las nomenclaturas que se observa en la tabla 3.

Tabla 3

Clasificación uso de suelo.

Uso del Suelo	Nomenclatur a	Valor asignado para Tipo de Suelo B
Pavimentos, tejados	P	98
Zona residencial (% Impermeabilidad)	R	85 (< 65 %), 75 (65-38 %), 70 (> 38%)
Terreno boscoso – poco denso	B	66
Calles sucias, suelo desnudo	G	82

Una vez determinados los valores de la nomenclatura, se procede a calcular el valor de la CN. Esto se realiza en función del porcentaje de impermeabilización de cada subcuenca, como se muestra en la tabla 4, esto se determina para los escenarios actuales y futuro de 7 y 5 variables.

Tabla 4

Ecuaciones para determina el valor de curva número.

Porcentaje de Impermeabilización de la Subcuenca	Relación empleada de acuerdo con el uso de suelo por Subcuenca
[100 – 90 %)	$0.9*P + 0.1*R$
[90 – 80 %)	$0.8*P + 0.2*R$
[80 – 65 %)	$0.7*P + 0.3*R$
[65 – 38 %)	$0.3*P + 0.2*R + 0.5(B \text{ o } G)$
[38 – 25%)	$0.2*P + 0.1*R + 0.7(B \text{ o } G)$
[25 – 0%]	$0.1*P + 0.1*R + 0.8(B \text{ o } G) / 1*(B \text{ o } G) /$ $0.5*B + 0.5*G$

Nota. Fuente: Te Chow, V., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). *Applied hydrology*.

4.4.3 *N-Manning zona impermeable y permeable*

Es importante recordar que en la sección anterior se realizó una clasificación de suelos para la totalidad de las subcuencas del área de estudio, definiendo diferentes tipos de suelos y coberturas. Con base en esta clasificación, en esta sección del modelo se configuraron diferentes valores de N para cada tipo de superficie. Los valores asignados para el coeficiente de rugosidad de Manning (N) para cada tipo de suelo se tomaron de (McCuen et al. 2002) y se presentan en la Tabla 5. Para determinar el valor de N de cada subcuenca, se calculó el porcentaje de área correspondiente a cada tipo de suelo en cada subcuenca y se obtuvo un valor de N ponderado en función de la proporción significativa de cada tipo de suelo. En el caso de los escenarios con 5 variables, se realizó un promedio entre la categoría de "unión de vías" y "edificaciones" para definir el valor de N-Manning correspondiente. De manera similar, se aplicó el mismo procedimiento para las categorías de "suelo con vegetación" y "suelo con poco pasto".

Tabla 5

N de Manning asignado a cada tipo de suelo.

Tipo de suelo		N de Manning
Componente Impermeable	Vías	0.012
	Edificaciones y techos	0.013
Componente Permeable	Arboles	0.4
	Suelo con vegetación	0.24
	Suelo con poco pasto	0.15
	Suelo sin cobertura vegetal	0.05

Nota. Fuente: McCuen et al., 2002

4.4.4 *Geodatabase de la red de alcantarillado de agua lluvia, residual y combinada*

El barrio El Porvenir cuenta con tres tipos de sistemas de alcantarillado: un sistema de agua lluvia, un sistema de aguas residuales y un sistema combinado. Estos datos provienen del trabajo de maestría de Lizeth Urán Duque. En la figura 30 se muestra la distribución espacial de todos los componentes del sistema de alcantarillado en la zona de estudio. Esta información es crucial para comprender la infraestructura y planificación urbana del área, así como para la gestión eficiente de los recursos hídricos y el manejo de aguas pluviales y residuales.

Figura 30

Elementos que compone todo el sistema alcantarillado del sector porvenir



Nota. Fuente elaboración propia

5. Resultados y Análisis

5.1 Modificación de la matriz transición para escenarios con 7 clasificaciones de uso de suelos

Para optimizar el modelo y analizando los resultados de la matriz de transición presentada en la Tabla 6, junto con las observaciones realizadas durante las visitas de campo, se decidió implementar ciertas restricciones al modelo. Estas modificaciones tienen como objetivo mejorar la precisión y la relevancia del modelo en el contexto específico del área de estudio. Las modificaciones son las siguientes:

- **Nada se convertirá en agua:** Para evitar que cualquier variable se transforme en agua, se dejan vacías las casillas de las transiciones 1 a 7, 2 a 7, 3 a 7, 4 a 7, 5 a 7 y 6 a 7. Esta restricción se basa en la lógica de que, en el contexto del modelo, no se observa la creación de nuevos cuerpos de agua en las zonas estudiadas.
- **Los cuerpos de agua no se transforman en otras clasificaciones de uso de suelo:** Para reflejar la estabilidad de los cuerpos de agua a lo largo del tiempo, se dejan vacías las casillas de las transiciones 7 a 1, 7 a 2, 7 a 3, 7 a 4, 7 a 5 y 7 a 6. Esto es coherente con la observación de que los cuerpos de agua tienden a mantener su estado en escalas temporales geológicas, sin cambios significativos hacia otras categorías.
- **Los edificios y techos no cambian:** Para garantizar la permanencia de las estructuras construidas y los techos, se dejan vacías las casillas de las transiciones 2 a 1, 2 a 3, 2 a 4, 2 a 5 y 2 a 6. Esta restricción se fundamenta en la estabilidad y durabilidad inherentes a las edificaciones y a las intervenciones urbanas sostenibles.
- **Las vías no cambian a edificaciones y techos:** Se implementa esta restricción dejando vacía la casilla de la transición 6 a 2, asegurando que las vías permanecen como tales y no se convierten en otros tipos de uso del suelo, como edificaciones o techos. Esto se basa en la importancia de mantener la infraestructura vial para la conectividad y movilidad urbana.

Estas restricciones, reflejadas en la Tabla 7, se aplican a todos los escenarios que contenga 7 clasificaciones de uso de suelo. Este enfoque permite una representación más precisa y realista de las dinámicas espaciales y temporales, facilitando la toma de decisiones basada en datos sólidos y observaciones de campo.

Tabla 6

Matriz de transición con 7 clasificación de uso de suelo.

	1	2	3	4	5	6	7
1		0.09842044	0.08615718	0.04742412	0.19959987	0.03508726	0.00234863
2	0.24383954		0.08762411	0.031662	0.09748578	0.09627201	0.00086673
3	0.27268813	0.1948257		0.05693717	0.20564547	0.07404132	0.00132293
4	0.06170358	0.5997027	0.19226275		0.03049653	0.09090994	8.41E-05
5	0.26916751	0.09857895	0.12634296	0.06242983		0.0277364	0.00101545
6	0.17444826	0.3947096	0.06476407	0.01280928	0.05975016		0.00015544
7	0.02224708	0.00104347	0.00413296	0.00010912	0.01136906	0.0003751	

Tabla 7

Matriz de transición modificada 7 clasificaciones de uso de suelo.

	1	2	3	4	5	6	7
1		0.05924193	0.16996428	0.0579183	0.28484491	0.07119492	-----
2	-----		-----	-----	-----	-----	-----
3	-----	0.13957309		0.07427738	0.2655718	0.12931839	-----
4	0.04450095	0.42229286	0.11626192		0.10392032	0.17791057	-----
5	-----	0.07050593	0.20511913	0.07121651		0.07203817	-----
6	-----	-----	0.11165599	0.05015252	0.12682741		-----
7	-----	-----	-----	-----	-----	-----	

5.2 Modificación de la matriz transición para escenarios con 5 clasificaciones de uso de suelos

Para optimizar el modelo y analizando los resultados de la matriz de transición presentada en la Tabla 8, junto con las observaciones realizadas durante las visitas de campo, se decidió implementar ciertas restricciones al modelo. Estas modificaciones tienen como objetivo mejorar la precisión y la relevancia del modelo en el contexto específico del área de estudio. Las modificaciones son las siguientes:

- **Nada se convertirá en agua:** Para asegurar que ninguna de las otras variables se transforme en cuerpos de agua, se dejan vacías las casillas correspondientes a las transiciones 1 a 5, 2 a 5, 3 a 5 y 4 a 5. Esta restricción se basa en la lógica de que, en el contexto del modelo, no se observa la creación de nuevos cuerpos de agua en las zonas estudiadas.
- **Los cuerpos de agua no se transforman en otras variables:** Esta restricción se implementa dejando vacías las casillas de las transiciones 5 a 1, 5 a 2, 5 a 3 y 5 a 4. Esto es coherente con la observación de que los cuerpos de agua tienden a mantener su estado en escalas temporales geológicas, sin cambios significativos hacia otras categorías.
- **Los edificios, techos y vías no cambian:** Para mantener la estabilidad de las estructuras urbanas y las intervenciones sostenibles, se dejan vacías las casillas de las transiciones 2 a 1, 2 a 3 y 2 a 4. Esta restricción se fundamenta en la estabilidad y durabilidad inherentes a las edificaciones y a las intervenciones urbanas sostenibles.
- **Suelos con vegetación no se convierten en árboles:** Debido al elevado valor observado y las salidas de campo, se decide implementar una restricción para que los suelos con vegetación no se conviertan en árboles. El modelo indica un cambio del 27.05% de suelos con vegetación a árboles, algo que no se observa en la realidad, por lo que esta restricción se hace necesaria para reflejar fielmente las dinámicas del área de estudio.

Estas modificaciones se reflejan en la Tabla 9 y se aplican a todos los escenarios de las cinco variables. Implementar estas restricciones permite un modelo más realista y ajustado a las condiciones observadas en el terreno, mejorando así la utilidad y precisión de las simulaciones y análisis geoespaciales.

Tabla 8

Matriz de transición 5 clasificaciones de uso de suelo.

	1	2	3	4	5
1		0.1335077	0.28575705	0.04742412	0.00234863
2	0.21972366		0.1640508	0.02511003	0.00061953
3	0.27046282	0.17876294		0.06040897	0.00112858
4	0.06170358	0.69061264	0.22275927		8.41E-05
5	0.02224708	0.00141858	0.01550203	0.00010912	

Tabla 9

Matriz de transición modificada 5 clasificaciones de uso de suelo.

	1	2	3	4	5
1		0.1335077	0.28575705	0.04742412	-----
2	-----		-----	-----	-----
3	-----	0.17876294		0.06040897	-----
4	0.06170358	0.69061264	0.22275927		-----
5	-----	-----	-----	-----	

5.3 Correlación

No existe un acuerdo sobre cuál debería ser el umbral para excluir una variable, pero si todas las pruebas muestran una alta correlación, una de las variables deberá ser eliminada. Una práctica común es escoger un umbral de 0.5 en el coeficiente de Cramer (que mide la relación entre variables categóricas). Por encima de este valor, las variables se consideran correlacionadas, esto se hace tanto para los modelos de 7 y 5 clasificaciones de uso de suelo

Figura 31

Correlación entre variables

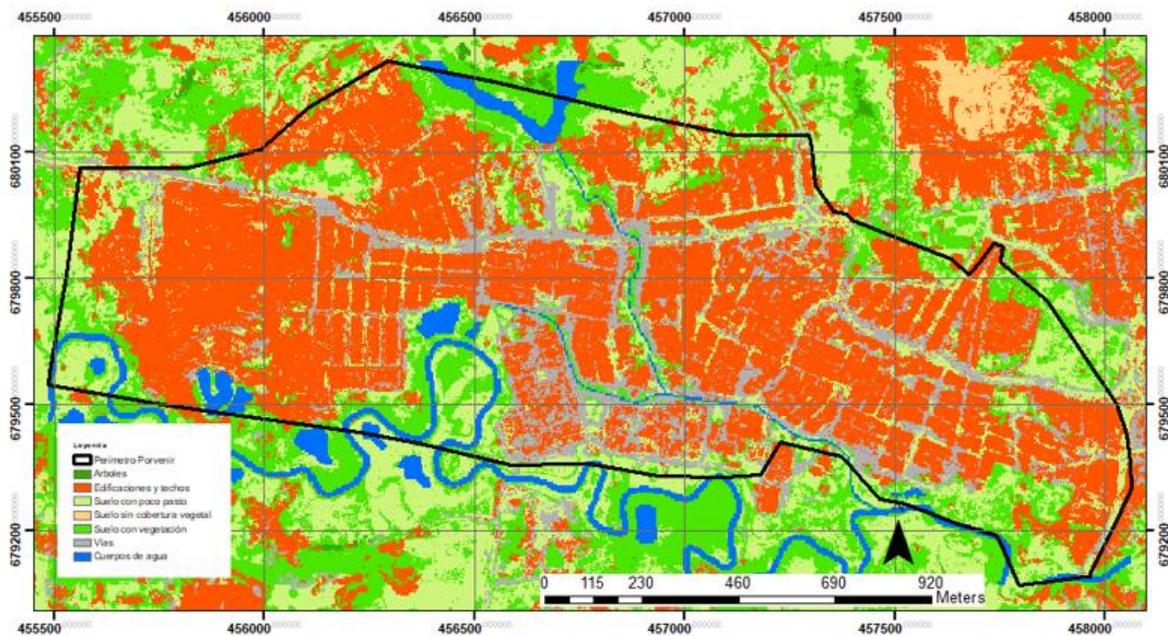
Transition_From (Real) *	Transition_To (Real) *	First_Variable (String) *	Second_Variable (String) *	CN_2 (Real)	Cramer (Real) *	Contingency (Real)	Joint_Entry (Real)	Joint_Uncertainty (Real)
1	2	distance_3i_5	staRies	7822531.25348328	0.59041056048186	0.64220551794281	0.01759999200938	0.210396448524
3	1	distance_3i_5	staRies	41804498.8948442	0.585795025539947	0.963729005812104	0.05191304138228	0.41381090935
4	5	distance_3i_5	staRies	4371883.15577647	0.58387657401942	0.75955827440357	1.98076846418728	0.45305566244
2	1	distance_3i_5	staRies	14855918.9800562	0.571033069548117	0.905879785714166	0.2806444062612	0.31433312599
2	3	distance_3i_5	staRies	10548413.6633339	0.567095507228878	0.9526633057939	0.41302731556847	0.37873038461
3	5	distance_3i_5	staRies	11488781.92116	0.560971205735798	0.91499789749532	0.18559511148138	0.37284750178
3	2	distance_3i_5	staRies	50977113.1615043	0.552084113248152	0.96699517658471	0.53376553726478	0.43740536405
2	0	distance_3i_5	staRies	3919873.42148265	0.552882358719605	0.74168719134824	0.58767045703306	0.16004890193
3	4	distance_3i_5	staRies	36561358.3363071	0.529606096494956	0.957790157481132	0.41919888082661	0.41367580881
1	4	distance_3i_5	staRies	26844574.3870872	0.524557574424005	0.845341588183008	0.3134491880418	0.41897108311
1	5	distance_3i_5	staRies	8490644.8062683	0.493234902985136	0.86433680000532	5.40809178687097	0.25846515035
2	4	distance_3i_5	staRies	8480084.2071897	0.448044252622997	0.976182456236445	0.7244340748165	0.49510464865
4	1	distance_3i_1	distance_3i_4	1782793.11688889	0.418418882381726	0.50026204087872	1.67329786808724	0.10126524588
4	0	distance_3i_1	distance_3i_4	1726746.98002109	0.41529844881728	0.506434107290437	1.43704810553805	0.11465891385
4	1	distance_3i_5	staRies	2612667.45617671	0.403807095738592	0.670169474750788	5.03106229628768	0.1614940679
4	1	staRies	staRies	2873519.83308011	0.400848211985126	0.667450938810178	5.08821578973232	0.1553244751
4	3	distance_3i_5	staRies	8206505.18000017	0.383248451033048	0.981621741422448	0.34320571167158	0.662951942046
4	2	distance_3i_1	distance_3i_4	1279040.18554283	0.387427571882505	0.451121103880021	1.548974889723748	0.09689851005
5	1	distance_3i_5	staRies	808343.85753287	0.35475891556741	0.448432253136119	3.30006094887363	0.03000024005

5.4 Simulación de cobertura de suelos a 2049

Como se muestra en las figuras 32 y 33, los escenarios M y N son diferentes entre sí debido a que el proceso es estocástico. Las probabilidades más altas tienen más posibilidades de ocurrir, pero DINAMICA EGO selecciona al azar el valor de probabilidad de una transición y lo compara con un valor aleatorio. Si la probabilidad es mayor que el valor aleatorio, entonces se realiza la transición a la nueva clase; de lo contrario, el proceso continúa sin cambios. Por esta razón, dos simulaciones, incluso si están calibradas de la misma manera, nunca serán iguales. En los anexos 3 se incluyen los escenarios faltantes correspondientes a las tablas 1 y 2, proporcionando una simulación detallada para cada uno.

Figura 32

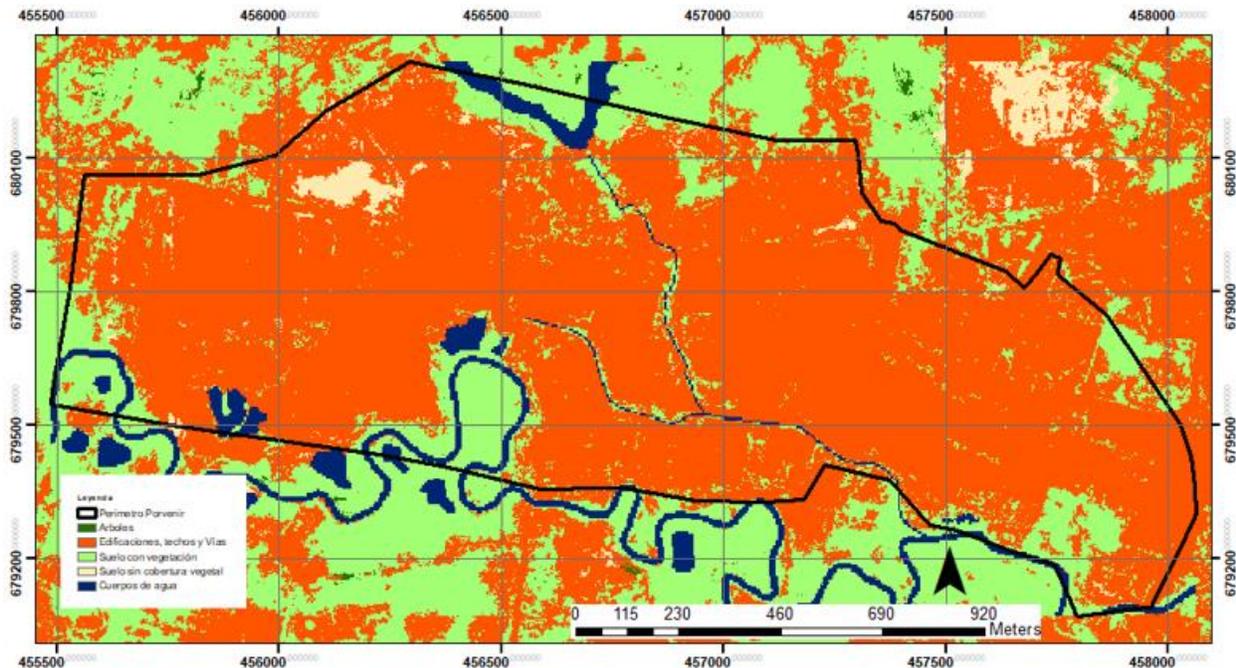
Cobertura de uso del suelo para el perímetro de Porvenir en el escenario M1 para el año 2049



Nota. Fuente elaboración propia

Figura 33

Cobertura de uso del suelo para el perímetro de Porvenir en el escenario N1 para el año 2049



Nota. Fuente elaboración propia

5.5 Validación en la Predicción del cambio de Uso del Suelo

Para optimizar el análisis en el modelo EPA SWMM, se seleccionarán dos mapas de cada escenario. Esto permitirá tener en cuenta tanto los valores del primer mapa de similitud, que tienden a ser menores, como los del segundo mapa de similitud.

En el caso de la tabla 10, los valores de similitud son 35.51 (M5) y 40.93 (M6), mientras que en el caso de la tabla 11, los valores de similitud son 45.28 (N5) y 54.73 (N6). Al considerar ambos mapas de similitud para cada escenario, se puede lograr una evaluación más equilibrada y precisa de la similitud entre los mapas observados y simulados.

Al seguir esta estrategia, se asegura que la optimización del modelo EPA SWMM no se base únicamente en los valores de similitud más altos, que podrían sobrestimar la coincidencia entre los mapas. En cambio, al incluir también los valores de similitud más bajos, se obtiene una visión más conservadora y completa de la precisión del modelo.

Esta metodología permite una mejor comprensión de cómo los cambios en el modelo afectan la similitud entre los mapas observados y simulados, proporcionando una base más sólida para realizar ajustes y mejoras en la simulación. En última instancia, el objetivo es obtener una simulación más precisa y fiable, que refleje de manera más fiel la realidad observada.

Por tanto, al considerar tanto los valores de similitud más bajos como los más altos, se garantiza que el proceso de optimización del modelo EPA SWMM tome en cuenta una gama más amplia de posibles discrepancias y coincidencias, contribuyendo así a un resultado final más robusto y fiable.

Tabla 10

Porcentaje de similitud para escenario con 7 clasificaciones de uso de suelo.

Escenario	primer mapa de similitud	Segundo mapa de similitud
M1	28.31	33.24
M2	32.86	33.66
M3	25.53	30.39
M4	30.89	37.61
M5	35.51	38.77
M6	30.50	40.93

Tabla 11

Porcentaje de similitud para escenario con clasificaciones de uso de suelo

Escenario	primer mapa de similitud	Segundo mapa de similitud
N1	42.867	51.21
N2	42.32	49.58
N3	37.78	51.89
N4	41.44	52.49
N5	45.28	52.06
N6	39.44	54.73

5.6 Inundaciones escenarios con 7 clasificaciones de uso de suelo

La Figura 31 ilustra un aumento significativo en los MH inundados en los escenarios M5 y M6 en comparación con la situación actual. Este incremento, con aumentos del 133.33% y 33.33% respectivamente, se debe a una mayor impermeabilización del suelo. Este fenómeno no solo confirma la previsibilidad de los resultados, sino que también pone de manifiesto cómo el

desarrollo urbano y otros factores están contribuyendo a la reducción de la capacidad de absorción del suelo, intensificando el riesgo de inundaciones.

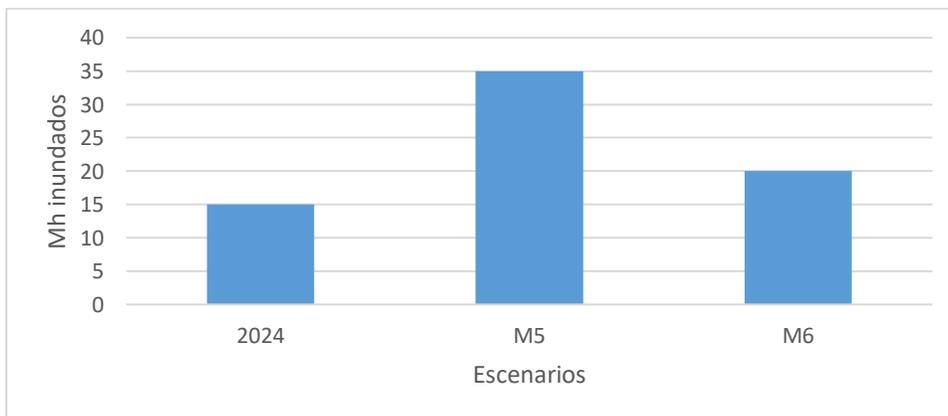
El aumento del 133.33% en el escenario M5 y del 33.33% en el escenario M6 destaca la magnitud del impacto que la urbanización puede tener sobre la hidrología local. La impermeabilización del suelo, provocada por la construcción de infraestructuras como edificios, carreteras y estacionamientos, impide que el agua de lluvia se infiltre adecuadamente en el suelo. En consecuencia, una mayor cantidad de agua de lluvia se convierte en escorrentía superficial, lo que aumenta significativamente el riesgo de inundaciones.

Estos resultados subrayan la necesidad urgente de adoptar prácticas de desarrollo urbano más sostenibles. Implementar soluciones como pavimentos permeables, techos verdes y la creación de espacios verdes urbanos puede ayudar a mitigar los efectos de la impermeabilización del suelo. Estas medidas no solo mejoran la capacidad de absorción del suelo, sino que también contribuyen a la gestión sostenible del agua de lluvia, reduciendo así el riesgo de inundaciones.

Además, es fundamental que las políticas urbanísticas consideren estos impactos y promuevan estrategias que integren la gestión de aguas pluviales en el proceso de planificación urbana. Al hacerlo, se puede minimizar el riesgo de inundaciones y proteger tanto a las comunidades como al medio ambiente de los efectos adversos asociados con la expansión urbana.

Figura 34

Numero de MH inundadas con 7 clasificaciones de uso de suelo

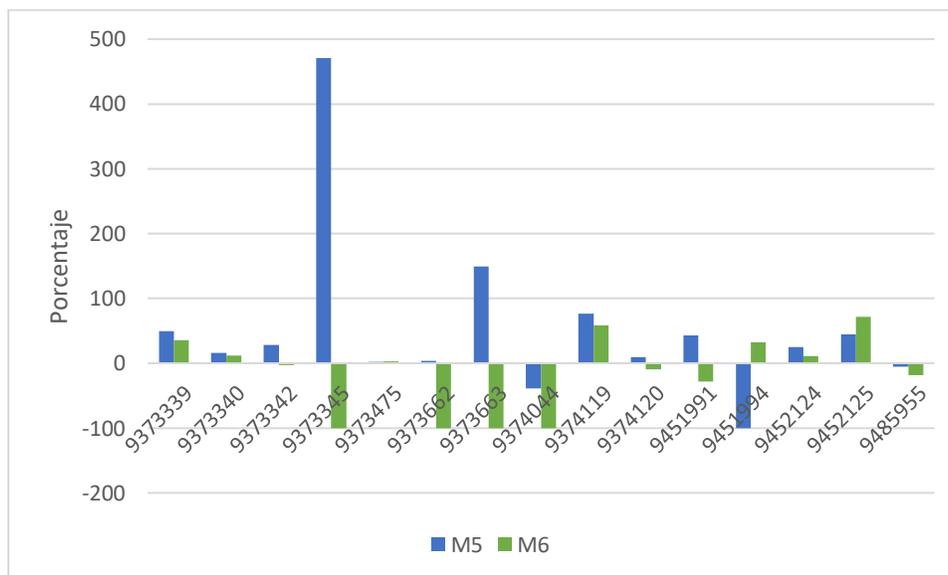


La Figura 32 destaca aspectos importantes relacionados con el cambio de cobertura del suelo. En primer lugar, se observa que algunas cámaras no se inundan o experimentan una disminución en el caudal de llegada, lo cual se refleja con un valor negativo. Este fenómeno sugiere una mejora significativa en esas áreas específicas, posiblemente debido a cambios en la infraestructura que desvían el flujo de agua.

Sin embargo, el segundo y más preocupante aspecto es el aumento del caudal en ciertas cámaras, que es el caso más común observado en la figura. Estos incrementos varían desde un 2.06% hasta un alarmante 470.63%, lo que indica una intensificación considerable en la cantidad de agua que llega a los MH. Este aumento masivo del caudal puede atribuirse a la creciente impermeabilización del suelo y al desarrollo urbano descontrolado, lo que reduce la capacidad del terreno para absorber el agua de lluvia.

Figura 35

Porcentaje de caudal recibido en los escenarios M5 y M6 en comparación con el actual



5.7 Inundaciones escenarios con 5 clasificaciones de uso de suelo

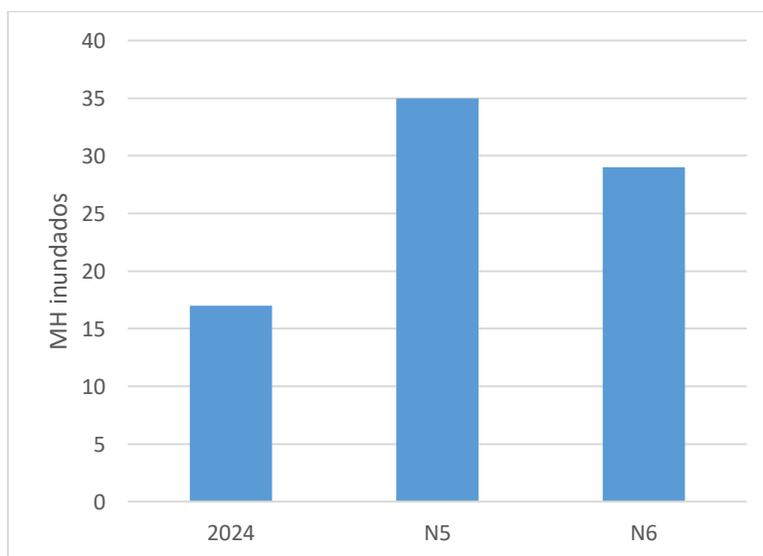
La Figura 33 ilustra un aumento significativo en los metros cuadrados (MH) afectados por inundaciones en los escenarios N5 y N6 en comparación con la situación actual. Estos incrementos, con un 105.88% y un 70.59% respectivamente, son atribuibles a una mayor impermeabilización del suelo. Este fenómeno no solo confirma la previsibilidad de los resultados, sino que también

destaca cómo el desarrollo urbano y otros factores están reduciendo la capacidad del suelo para absorber agua, intensificando así el riesgo de inundaciones.

Comparando con los escenarios con 7 clasificaciones de suelo, se observa un patrón similar donde el aumento de la impermeabilización conduce a un incremento en las áreas afectadas por inundaciones. En los escenarios de mayor urbanización, la construcción de infraestructuras como edificios, carreteras y estacionamientos impide la adecuada infiltración del agua de lluvia en el suelo. Esto resulta en una mayor escorrentía superficial y, por lo tanto, un aumento considerable en el riesgo de inundaciones.

Figura 36

Numero de MH inundadas con 7 clasificaciones de uso de suelo



La Figura 34 destaca aspectos importantes relacionados con el cambio de cobertura del suelo. En primer lugar, se observa que algunas cámaras no se inundan o experimentan una disminución en el caudal de llegada, reflejándose esto con un valor negativo. Esto podría deberse a cambios en la infraestructura que desvían el flujo de agua.

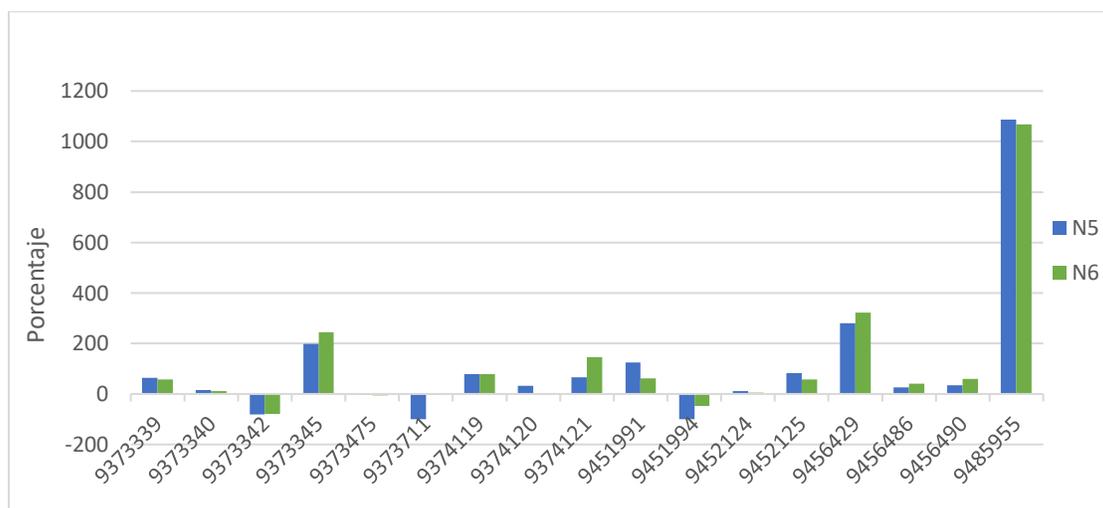
Sin embargo, el segundo y más preocupante aspecto es el aumento del caudal en ciertas cámaras, el cual es el caso más común observado en la figura. Estos incrementos varían desde un 0.87% hasta un alarmante 1086.56%, lo que indica una intensificación considerable en la cantidad de agua que llega a los MH. Este aumento masivo del caudal puede atribuirse a la creciente

impermeabilización del suelo y al cambio de infraestructura que desvían el flujo de agua, reduciendo así la capacidad del terreno para absorber el agua de lluvia.

Comparando con las clasificaciones de uso de suelo de siete categorías, se observa una tendencia similar. En áreas con alta clasificación de uso urbano, la construcción de infraestructuras como edificios, carreteras y estacionamientos aumenta la impermeabilización del suelo. Esto provoca que una mayor cantidad de agua de lluvia se convierta en escorrentía superficial, incrementando significativamente el caudal en ciertas MH.

Figura 37

Caudal recibido por los MH 5 variables



6. Conclusiones

La diversidad de clasificaciones de uso del suelo proporciona una visión detallada del paisaje urbano y sus transformaciones. No obstante, esta gran cantidad de categorías puede añadir complejidad al modelo, dificultando su interpretación, precisión y/o su validación. Por lo tanto, simplificar y agrupar estas clasificaciones puede ser una estrategia eficaz para mejorar la funcionalidad y aplicabilidad del modelo, facilitando una toma de decisiones más precisa y efectiva en la planificación urbana y gestión del territorio.

El desplazamiento que se observó en la vista en planta en las imágenes satelitales usadas en esta tesis, que provienen de fuentes libres como lo fue Google Earth, representa un desafío crítico que debe ser gestionado cuidadosamente para asegurar la precisión y fiabilidad del análisis de cambios en la cobertura del suelo. La implementación de técnicas adecuadas para minimizar este desplazamiento es esencial para mejorar la calidad de los datos y la confianza en los resultados, lo que facilita una gestión más informada y efectiva del territorio.

Conocer detalladamente la zona de estudio es crucial para obtener una visión objetiva de los cambios y tendencias que ocurren en esa región. Este conocimiento facilita el reconocimiento de patrones y permite un control más efectivo de la matriz de transición utilizada en los modelos de simulación, mejorando así la precisión de las predicciones sobre la expansión urbana.

Disponer de información detallada sobre infraestructuras como redes de alcantarillado, carreteras y modelos digitales de elevación (DEM) de alta resolución es fundamental para mejorar la precisión de los modelos generados con DINAMICA EGO. Estos datos enriquecen las simulaciones, permitiendo un análisis más exhaustivo y preciso de los procesos urbanos y ambientales, y apoyan el diseño de estrategias de gestión territorial más efectivas y sostenibles.

Los modelos indican que el cambio climático puede intensificar la frecuencia y severidad de las inundaciones debido al aumento en las precipitaciones y la escorrentía superficial. Este fenómeno debe ser considerado en la planificación urbana y en el diseño de sistemas de drenaje, para asegurar la resiliencia de las infraestructuras urbanas ante futuros eventos climáticos extremos.

La integración de modelos de expansión urbana basados en autómatas celulares con la planificación territorial ofrece un enfoque robusto para anticipar y gestionar el crecimiento urbano. Este método

permite evaluar distintos escenarios de desarrollo y su impacto en el sistema de drenaje, facilitando una planificación más proactiva y adaptativa.

Es esencial la capacitación continua en el uso de herramientas avanzadas de modelación, como DINAMICA EGO, para los profesionales encargados de la planificación urbana y gestión del territorio. Un mayor conocimiento de estas herramientas puede mejorar la precisión de los modelos y la eficacia en la toma de decisiones.

La actualización continua de datos geoespaciales y la monitorización de cambios en el uso del suelo son fundamentales para mantener la relevancia y precisión de los modelos de simulación. Esto asegura que las políticas y estrategias de gestión territorial se basen en información actualizada, permitiendo una respuesta rápida a cambios emergentes en el entorno urbano.

la urbanización acelerada y la consecuente impermeabilización del suelo aumentan significativamente el riesgo de inundaciones debido a la mayor escorrentía superficial. Implementar soluciones basadas en la naturaleza es crucial para mitigar estos riesgos y promover un desarrollo urbano más resiliente y sostenible.

7. Recomendaciones

Se recomienda la implementación de una modelación hidráulica en dos dimensiones (2D) para obtener una comprensión detallada del comportamiento del agua en el paisaje urbano. Este enfoque permite visualizar cómo los cambios en la cobertura del suelo afectan la distribución y el movimiento del agua, identificando así puntos críticos de inundación. La modelación en 2D es fundamental para diseñar medidas de mitigación adecuadas y eficientes, que puedan reducir el riesgo de inundaciones en áreas vulnerables.

Es crucial llevar a cabo una calibración exhaustiva de los modelos generados con DINAMICA EGO. Este proceso permite ajustar los parámetros del modelo para asegurar una alta correspondencia entre los mapas simulados y los observados. La calibración incrementa la precisión y confiabilidad de las predicciones, proporcionando una representación más fiel de las condiciones reales del terreno. Esto es esencial para una evaluación rigurosa de los impactos del desarrollo urbano y otros factores en el flujo de agua, y para la toma de decisiones informadas en la gestión de riesgos de inundación.

Se sugiere la implementación de sistemas de monitoreo continuo de los cambios en la cobertura del suelo y el uso del suelo, utilizando tecnologías avanzadas como imágenes satelitales y sensores remotos. Estos sistemas permiten la actualización constante de los datos de entrada para los modelos de simulación, mejorando la precisión de las predicciones y facilitando una respuesta rápida ante cambios emergentes en el entorno urbano. Entre estos elementos de monitoreo podrían incluirse imágenes satelitales de alta resolución.

Es recomendable fomentar la colaboración interdisciplinaria entre ingenieros sanitarios, urbanistas, geógrafos y climatólogos. Esta colaboración es clave para desarrollar modelos integrales que consideren no solo los aspectos físicos del paisaje, sino también los factores socioeconómicos y ambientales. Una perspectiva interdisciplinaria permite abordar de manera más completa y efectiva los desafíos relacionados con la expansión urbana y la gestión del drenaje urbano.

Se sugiere implementación de soluciones basadas en la naturaleza en Rionegro podría ser una estrategia efectiva para mitigar las inundaciones. Estas soluciones no solo ayudarían a gestionar

las aguas pluviales de manera más eficiente, sino que también proporcionarían múltiples beneficios ambientales y sociales.

8. Bibliografía

Alemaw, B., Chaoka, T., & Tafesse, N. (2020). Modelling of nature-based solutions (nbs) for urban water management—investment and outscaling implications at basin and regional levels. *Journal of Water Resource and Protection*, 12(10), 853-883. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2020.1210050>

Álvarez, C. (2022, September 20). El aguacero arrasó en Rionegro y dejó serias inundaciones. *El Colombiano*. <https://www.elcolombiano.com/antioquia/lluvias-de-esta-tarde-inundaron-parte-de-rionegro-NJ18668072>

Amaya, W. E. (2021). *Crecimiento demográfico, cambios residenciales y nuevas formas de expansión urbana en Rionegro: Patrones recientes y escenarios futuros* [Universidad Nacional]. <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/80510/80028589.2021.pdf>

Bonham-Carter, G. (1994). *Geographic information systems for geoscientists: Modeling with GIS*. Pergamon.

Chen, J., Liu, X., & Gao, Z. (2019). Urban flood risk assessment based on a high-resolution rainstorm model and the SWMM model. *Water*, 11(1), 123.

Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). *Applied hydrology*. McGraw-Hill.

Coelho, L., Ohnuma, A., & Fonseca, P. (2022). Taxes simulation for maintance of a drainage network. *Revista De Gestão Social E Ambiental*, 16(3), e03093. <https://doi.org/10.24857/rgsa.v16n3-008>

Cortés, L. (2022, October 28). Inundaciones en Rionegro dejan más de 100 viviendas afectadas. *Agencia de Periodismo Investigativo*. <https://agenciapi.co/noticia/regiones/inundaciones-en-rionegro-dejan-mas-de-100-viviendas-afectadas>

Environmental Systems Research Institute (ESRI). (2020). *ArcGIS Pro: Analysis and geoprocessing*. ESRI Press.

García, L., Taboada, T., & Rodríguez, D. (2020). Land use change modeling: Current practice and future research priorities. *Geography and Sustainability*, 1(2), 91-99.

Green, D., O'Donnell, E., Johnson, M., Slater, L., Thorne, C., Shan, Z., ... & Boothroyd, R. (2021). Green infrastructure: the future of urban flood risk management?. *Wiley Interdisciplinary Reviews Water*, 8(6). <https://doi.org/10.1002/wat2.1560>

Gutiérrez, L., & Ramírez, F. (2020). Redes de alcantarillado y su influencia en la salud pública. *Salud y Desarrollo*, 15(2), 123-136.

Harris, R., & White, D. (2018). *Geospatial Analysis: A Comprehensive Guide to Principles, Techniques and Software Tools* (6th ed.). Troubador Publishing Ltd.

Heywood, I., Cornelius, S., & Carver, S. (2021). *An Introduction to Geographical Information Systems* (5th ed.). Pearson Education.

IDOM. (2018). *Estudio de crecimiento urbano en Rionegro, Antioquia-Colombia*. <https://rionegro.gov.co/wp-content/uploads/2021/03/Estudio-de-Crecimiento-Urbano.pdf>

Lang, Q. (2024). Resilience assessment and enhancement strategies for urban transportation infrastructure to cope with extreme rainfalls. *Sustainability*, 16(11), 4780. <https://doi.org/10.3390/su16114780>

Li, X., Li, W., & Li, M. (2019). Impacts of urbanization on hydrological processes in the Yangtze River basin, China. *Environmental Research Letters*, 14(12), 123005. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab52d2>

Li, X., Zhou, Y., & Chen, Y. (2018). Impact of urbanization on hydrological processes in a watershed: Case study in China. *Journal of Hydrology*, 558, 23-35.

Longley, P. A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J., & Rhind, D. W. (2020). *Geographic Information Systems and Science* (4th ed.). John Wiley & Sons.

López, M., Pérez, A., & Torres, R. (2019). Proximidad a ríos y su efecto en el crecimiento poblacional. *Geografía y Medio Ambiente*, 8(4), 77-89.

Lu, D., Mausel, P., & Batistella, M. (2018). Land-cover classification using time series Landsat imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 39(5), 1321-1335.

McCuen, R. H., Johnson, P. A., & Ragan, R. M. (2002). *Highway hydrology: Hydraulic design series No. 2*. National Highway Institute. <https://www.fhwa.dot.gov/engineering/hydraulics/pubs/hif02001.pdf>

Meerow, S. (2017). Double exposure, infrastructure planning, and urban climate resilience in coastal megacities: a case study of Manila. *Environment and Planning a Economy and Space*, 49(11), 2649-2672. <https://doi.org/10.1177/0308518x17723630>

Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2017). *Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS)*. Bogotá, Colombia: Imprenta Nacional.

Municipio de Rionegro, & UCO. (2018). *Revisión y ajuste al acuerdo 056 de 2011 POT Rionegro*.

Mujahid, K. (2023). Climate resilience in urban infrastructure. <https://doi.org/10.31219/osf.io/ud73k>

Oliveira, L., Silva, M., & Soares-Filho, B. (2019). Modeling the impacts of urban growth on habitat availability for species: A case study of Dinamica EGO. *Landscape and Urban Planning*, 190, 103614.

Palacio, D. (2019). El Porvenir, epicentro de la transformación de Rionegro. *Vivir en el Poblado*. <https://vivirenel poblado.com/el-porvenir-epicentro-de-la-transformacion-de-rionegro/>

Population Division. (2018). *World urbanization prospects: The 2018 revision*. United Nations. <https://population.un.org/wup/Publications/Files/WUP2018-Highlights.pdf>

Pusalkar, V., Swamy, V., & Shivapur, A. (2022). Development of blue-green infrastructure framework to restore nallahs (dirty drains) to nadis (streams), in India. *E3S Web of Conferences*, 353, 01005. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202235301005>

Pyke, C., Warren, M., Johnson, T., LaGro, J., Scharfenberg, J., Groth, P., ... & Main, E. (2011). Assessment of low impact development for managing stormwater with changing precipitation due to climate change. *Landscape and Urban Planning*, 103(2), 166-173. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.07.006>

Ramírez, D., & Gómez, J. (2020). *Análisis de variables territoriales para la delimitación de nuevos suelos suburbanos en los municipios de la subregión de Valles de San Nicolás*. https://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/15814/5/RamirezDiana_AnalisisVariablesTerritoriales.pdf

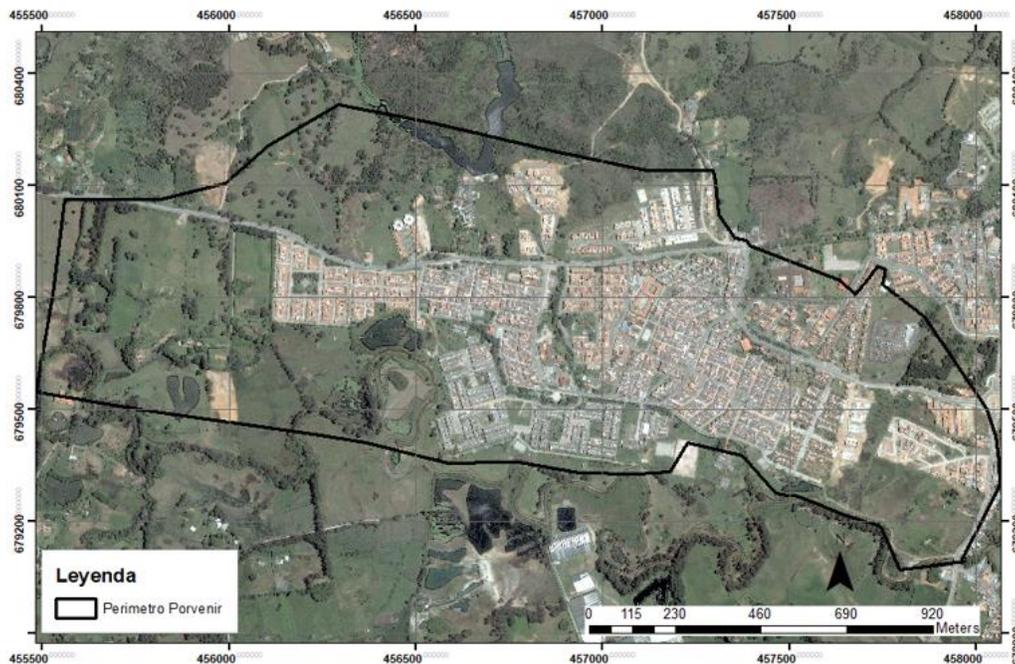
Ramírez, J. (2021, May 17). Invierno Colombia: Fuerte aguacero inundó casas y negocios en Rionegro. *RCN Radio*. <https://www.rcnradio.com/colombia/antioquia/fuerte-aguacero-inundo-casas-y-negocios-en-rionegro>

Rossmann, L. A. (2018). *Storm Water Management Model User's Manual, Version 5.0*. US Environmental Protection Agency.

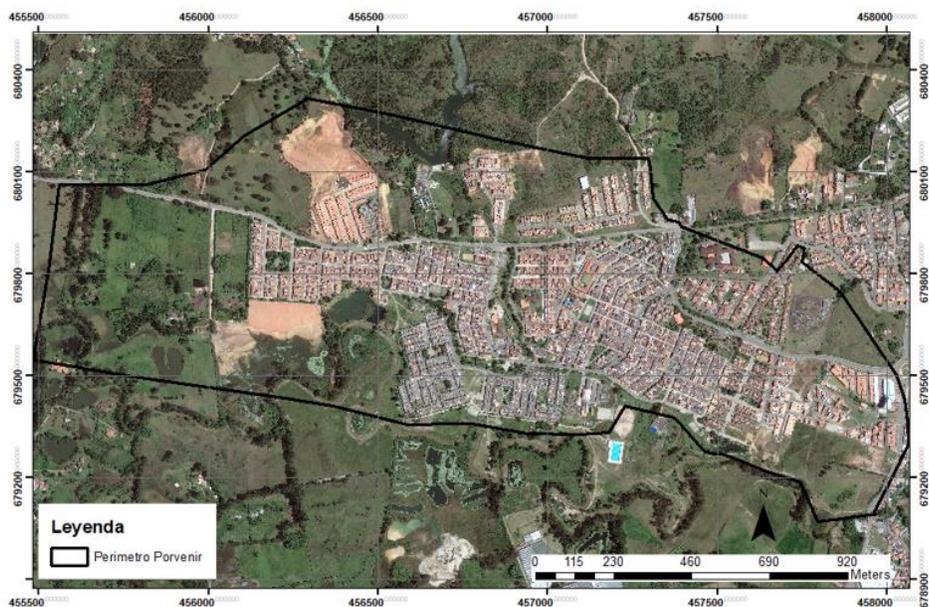
Soares-Filho, B., Rodrigues, H., & Costa, W. (2018). *Modelagem de dinâmicas ambientais com Dinamica EGO*. Universidade Federal de Minas Gerais.

Soares-Filho, B. S., Cerqueira, G. C., & Pennachin, C. L. (2018). Dinamica: A stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in an Amazonian frontier. *Ecological Modelling*, 154(3), 217-235.

Tran, H., Molavi, S., & Muttill, N. (2011). Assessment framework for the impacts of climate change and urbanization

Anexo 1 imágenes satelitales descargadas en Google Earth pro*Imágenes descargadas de Google Earth pro de los años 2009*

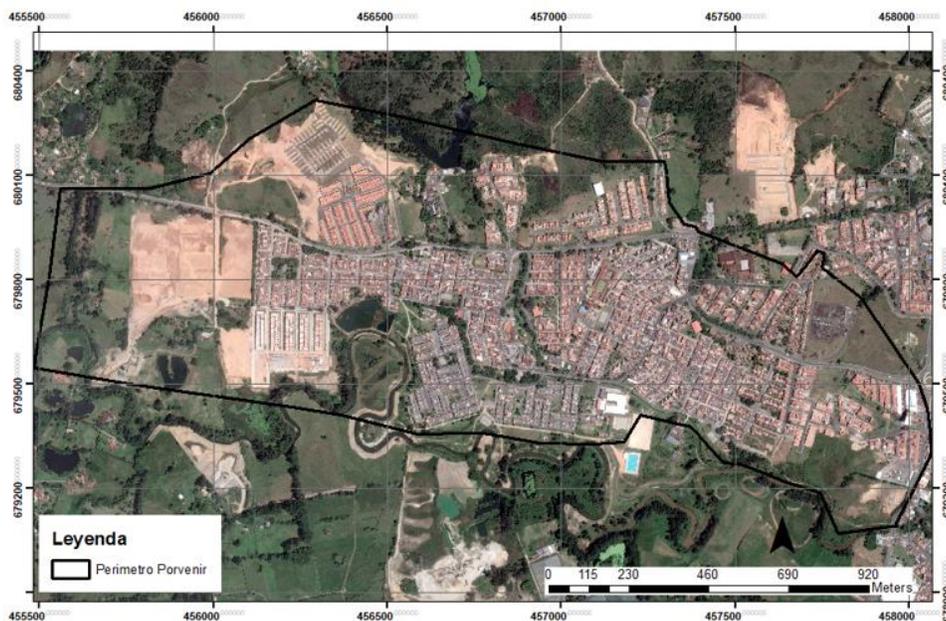
Nota. Fuente elaboración propia

Imágenes descargadas de Google Earth pro de los años 2010

Nota. Fuente elaboración propia

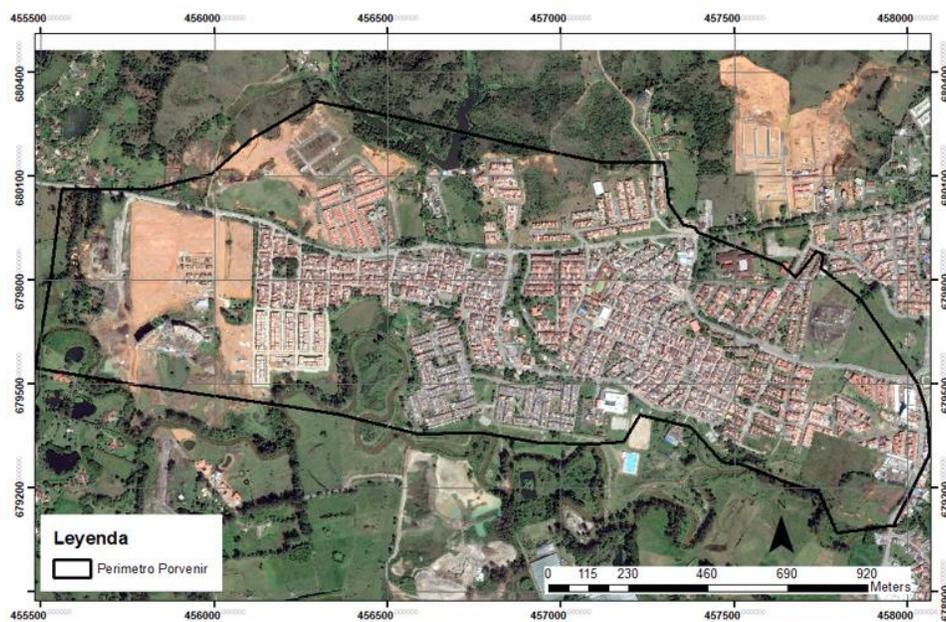
MODELACIÓN DEL CAMBIO DE COBERTURAS Y USO DEL SUELO PARA PREDECIR LA EXPANSIÓN URBANA Y EVALUAR SU IMPACTO EN EL SISTEMA DE DRENAJE ...

Imágenes descargadas de Google Earth pro de los años 2013



Nota. Fuente elaboración propia

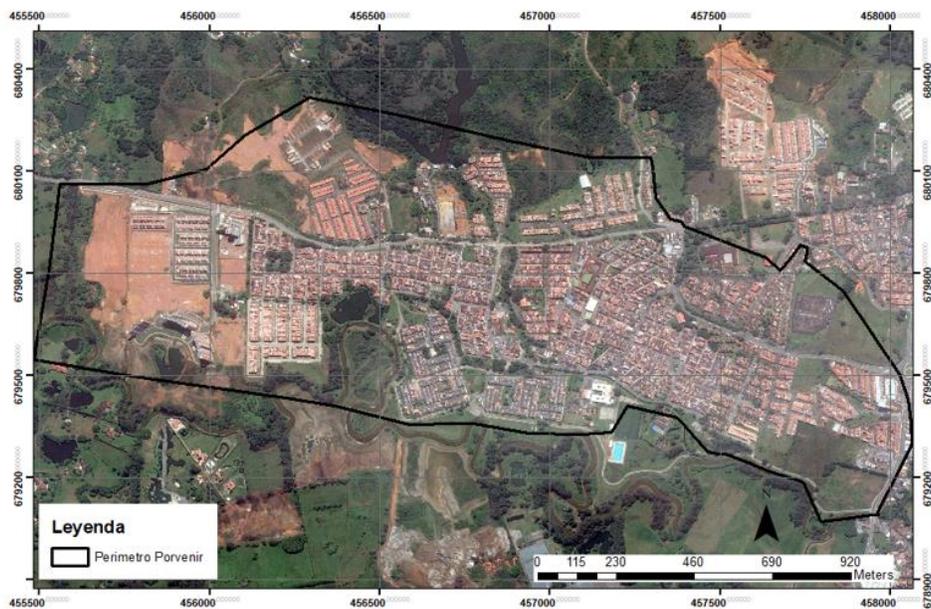
Imágenes descargadas de Google Earth pro de los años 2014



Nota. Fuente elaboración propia

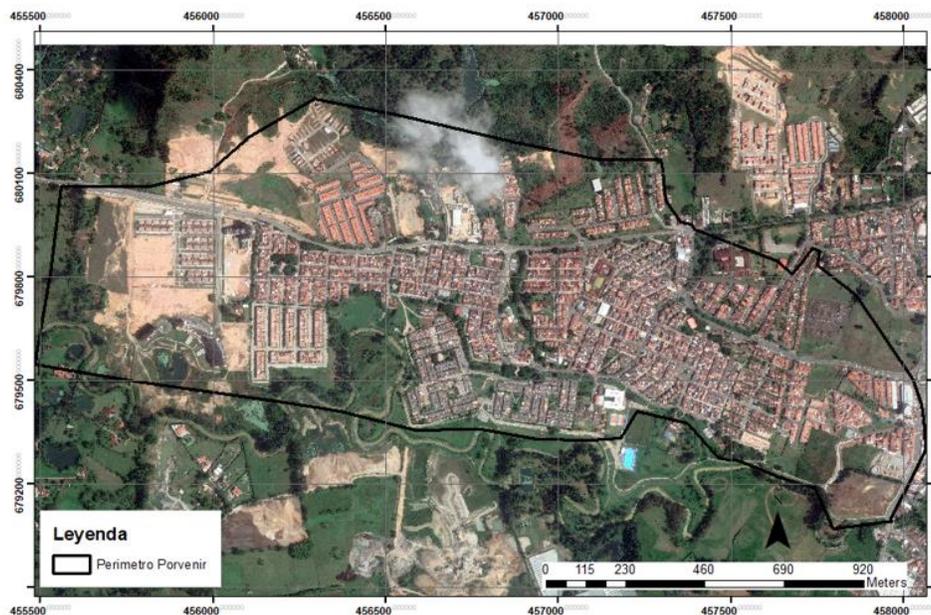
MODELACIÓN DEL CAMBIO DE COBERTURAS Y USO DEL SUELO PARA PREDECIR LA EXPANSIÓN URBANA Y EVALUAR SU IMPACTO EN EL SISTEMA DE DRENAJE ...

Imágenes descargadas de Google Earth pro de los años 2017



Nota. Fuente elaboración propia

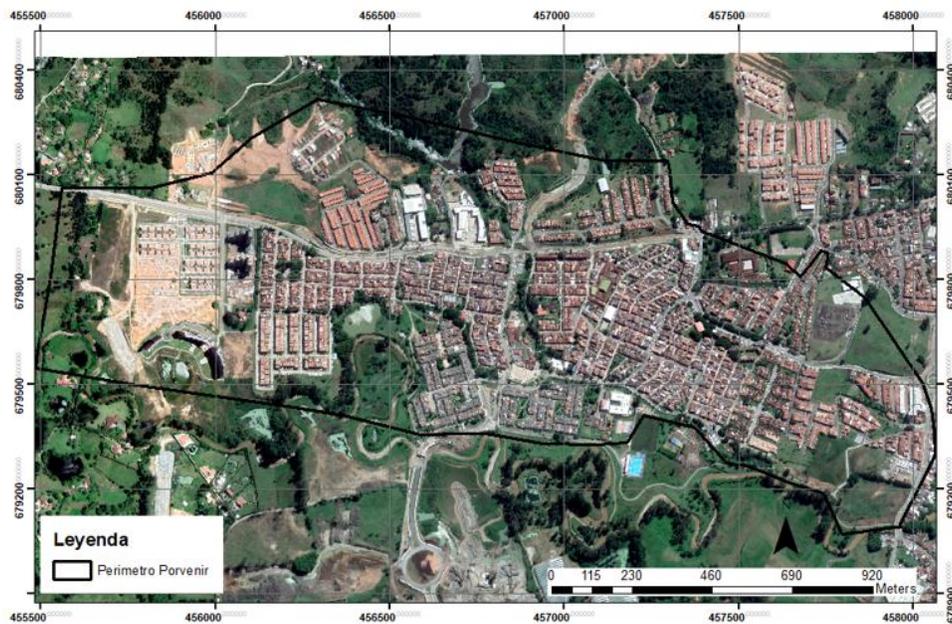
Imágenes descargadas de Google Earth pro de los años 2018



Nota. Fuente elaboración propia

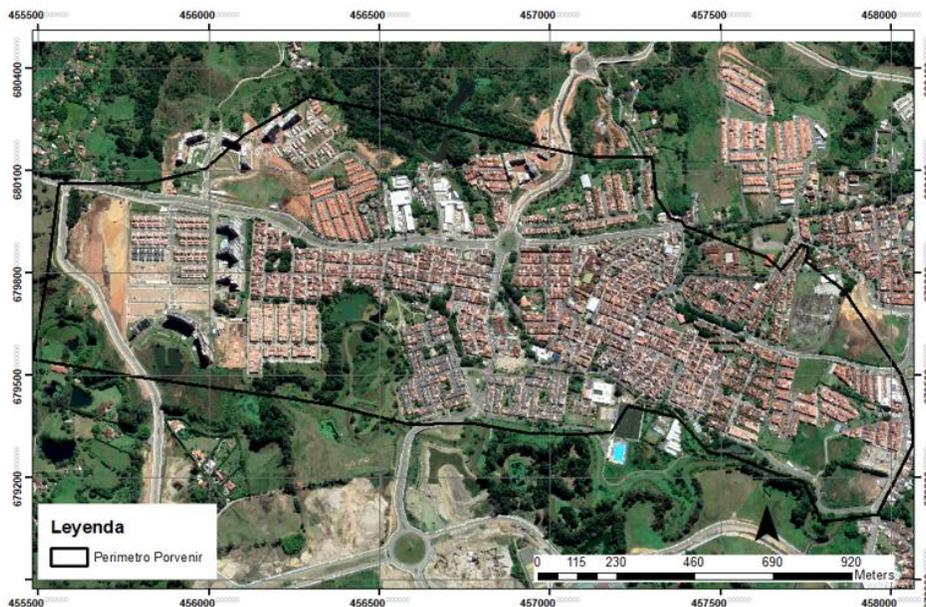
MODELACIÓN DEL CAMBIO DE COBERTURAS Y USO DEL SUELO PARA PREDECIR LA EXPANSIÓN URBANA Y EVALUAR SU IMPACTO EN EL SISTEMA DE DRENAJE ...

Imágenes descargadas de Google Earth pro de los años 2020



Nota. Fuente elaboración propia

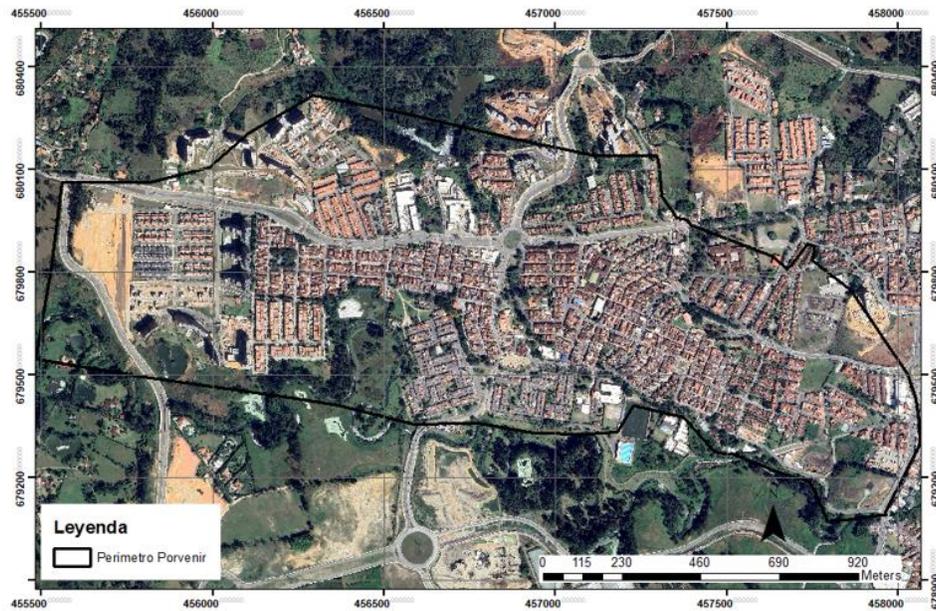
Imágenes descargadas de Google Earth pro de los años 2022



Nota. Fuente elaboración propia

MODELACIÓN DEL CAMBIO DE COBERTURAS Y USO DEL SUELO PARA PREDECIR LA EXPANSIÓN URBANA Y EVALUAR SU IMPACTO EN EL SISTEMA DE DRENAJE ...

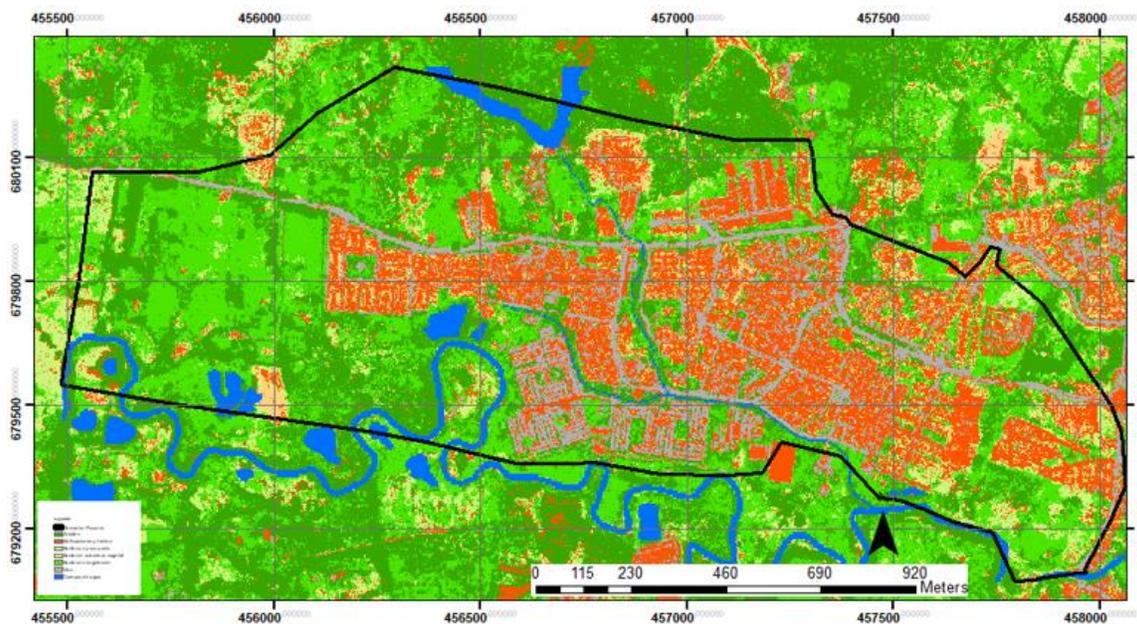
Imágenes descargadas de Google Earth pro de los años 2024



Nota. Fuente elaboración propia

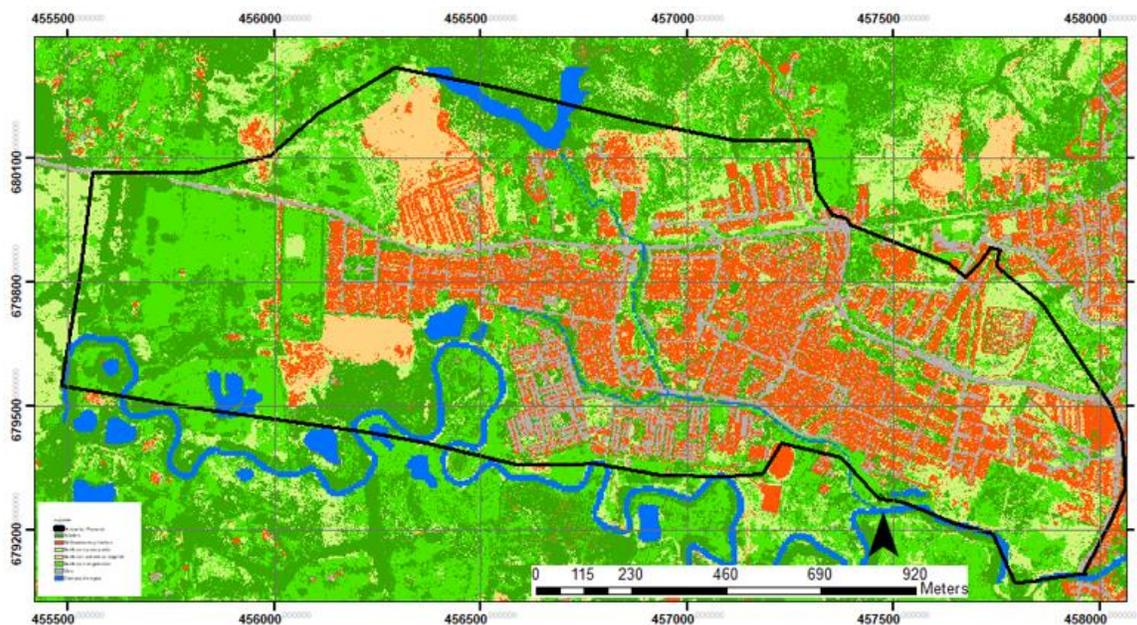
Anexo 2 Cobertura de uso de suelo con clasificación de uso de suelo 7 y 5

Cobertura del Uso del Suelo en el Sector Porvenir en el Año 2009 con Siete Categorías de Clasificación



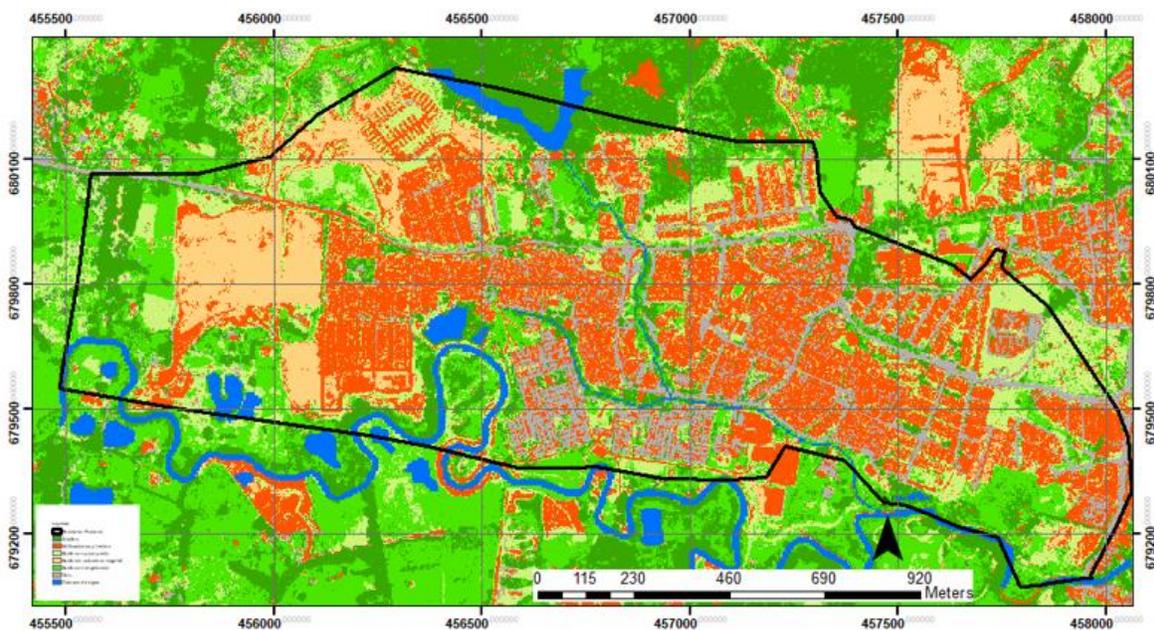
Nota. Fuente elaboración propia

Cobertura del Uso del Suelo en el Sector Porvenir en el Año 2010 con Siete Categorías de Clasificación



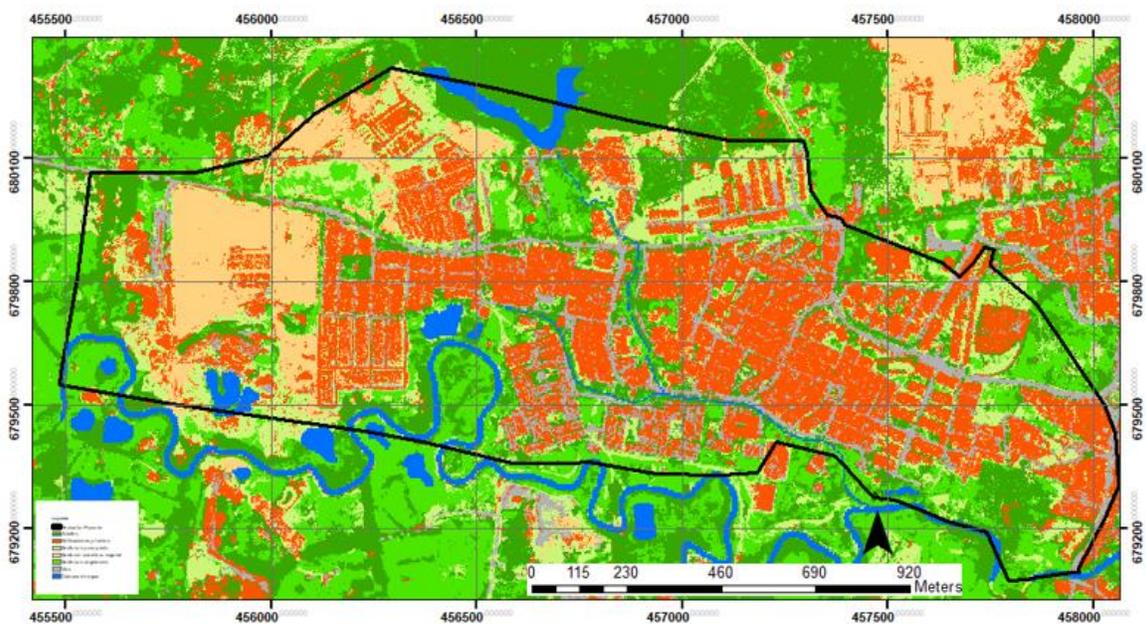
Nota. Fuente elaboración propia

Cobertura del Uso del Suelo en el Sector Porvenir en el Año 2013 con Siete Categorías de Clasificación



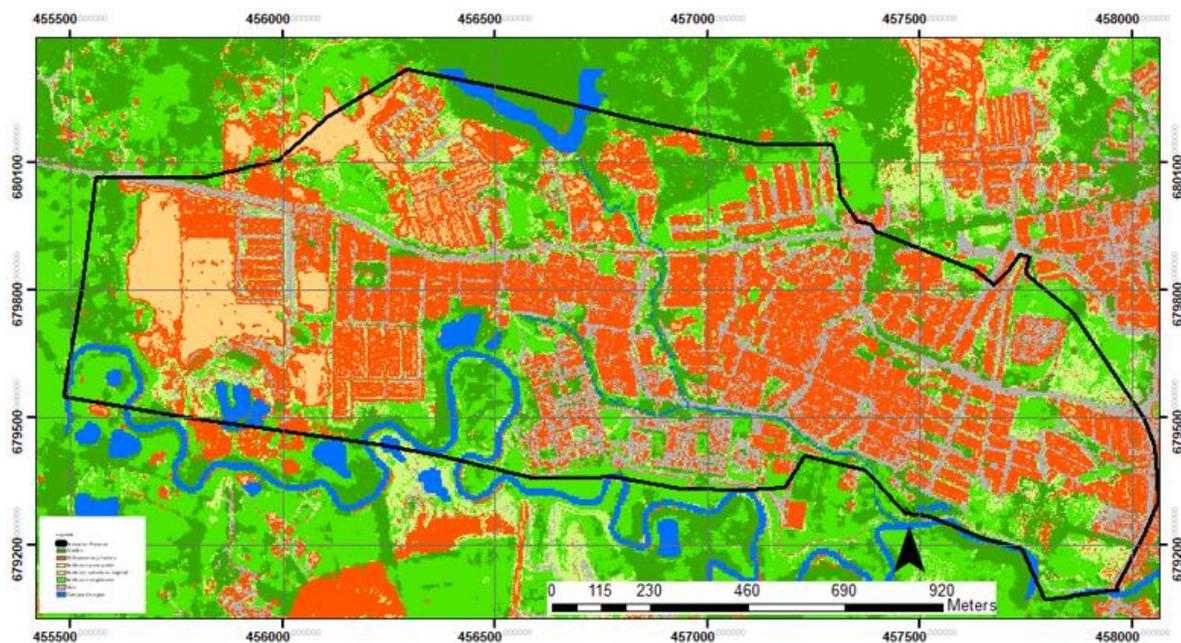
Nota. Fuente elaboración propia

Cobertura del Uso del Suelo en el Sector Porvenir en el Año 2014 con Siete Categorías de Clasificación



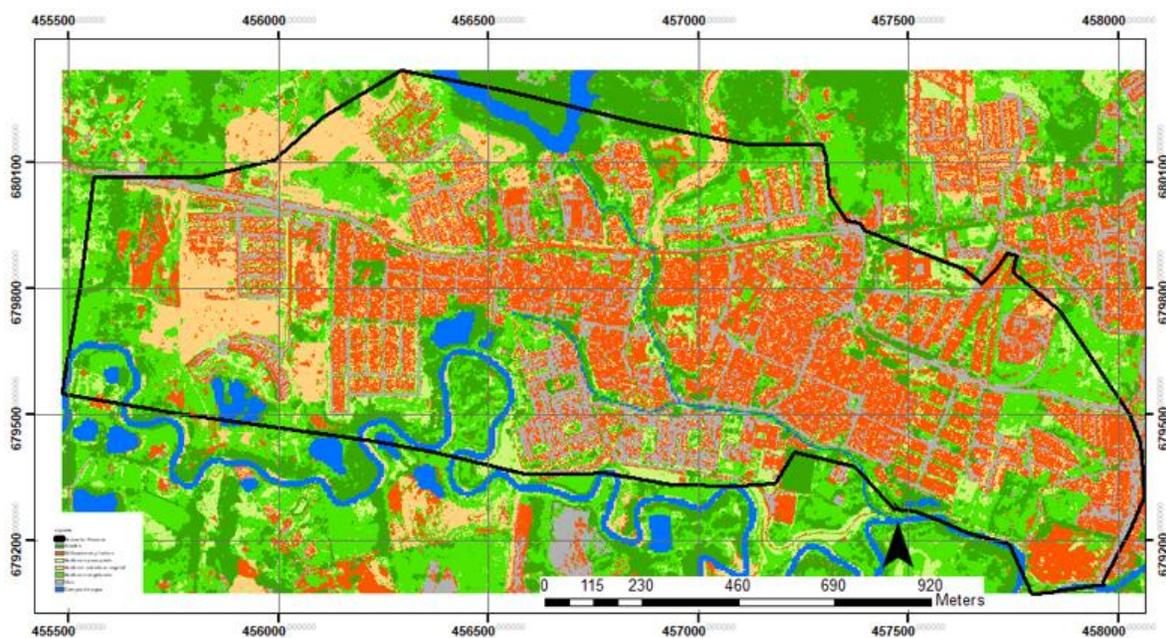
Nota. Fuente elaboración propia

Cobertura del Uso del Suelo en el Sector Porvenir en el Año 2017 con Siete Categorías de Clasificación



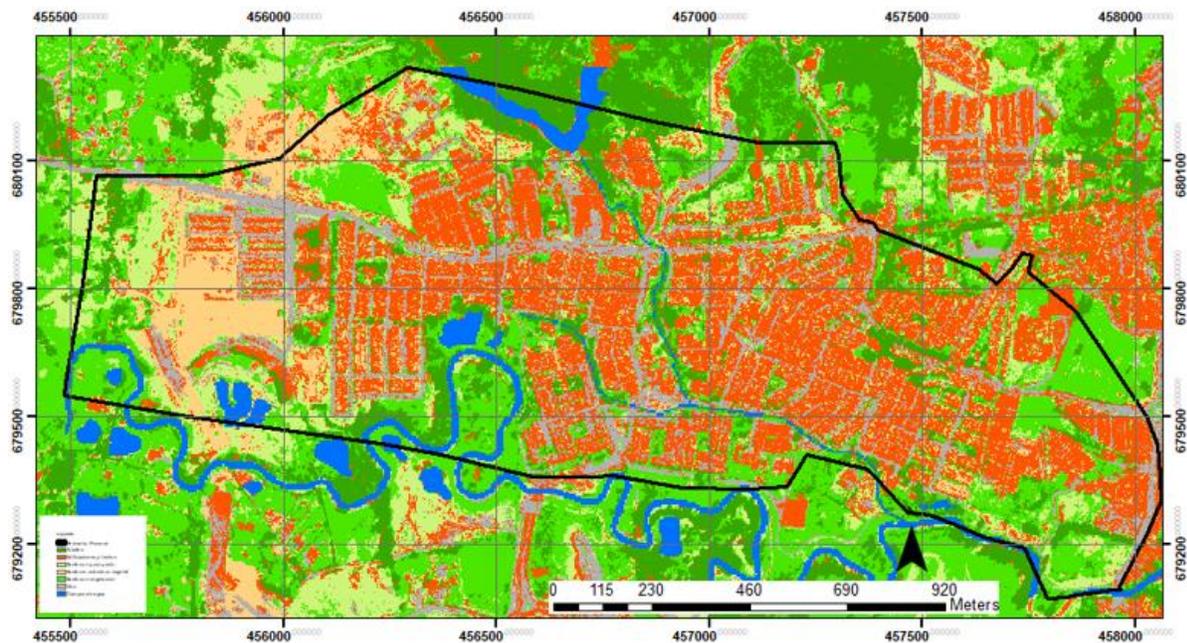
Nota. Fuente elaboración propia

Cobertura del Uso del Suelo en el Sector Porvenir en el Año 2018 con Siete Categorías de Clasificación



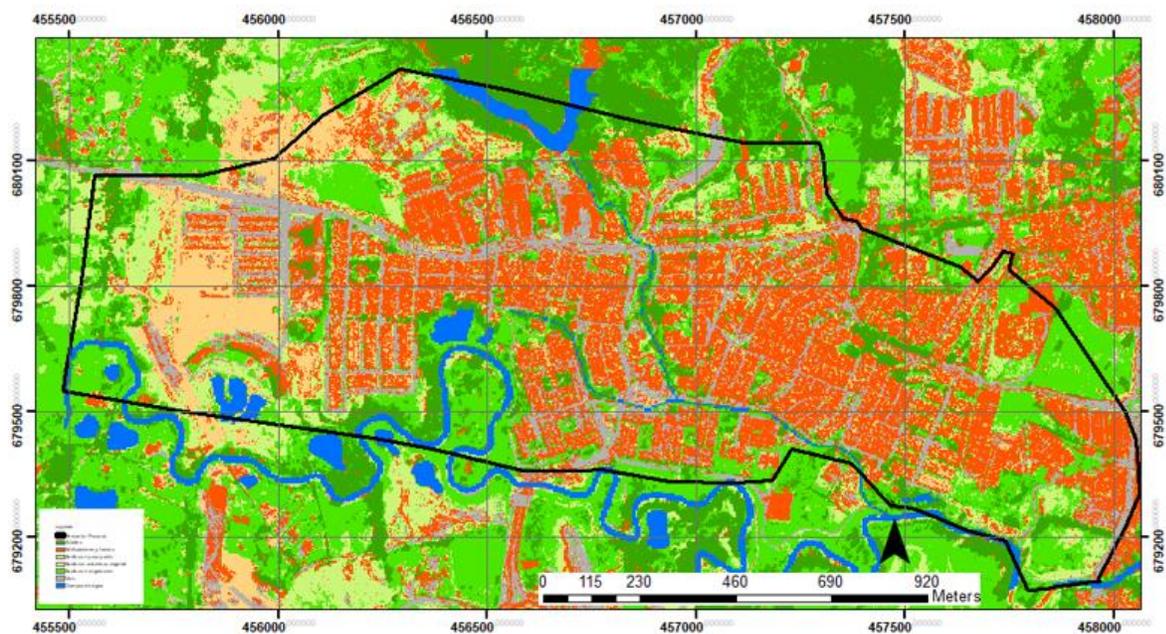
Nota. Fuente elaboración propia

Cobertura del Uso del Suelo en el Sector Porvenir en el Año 2020 con Siete Categorías de Clasificación



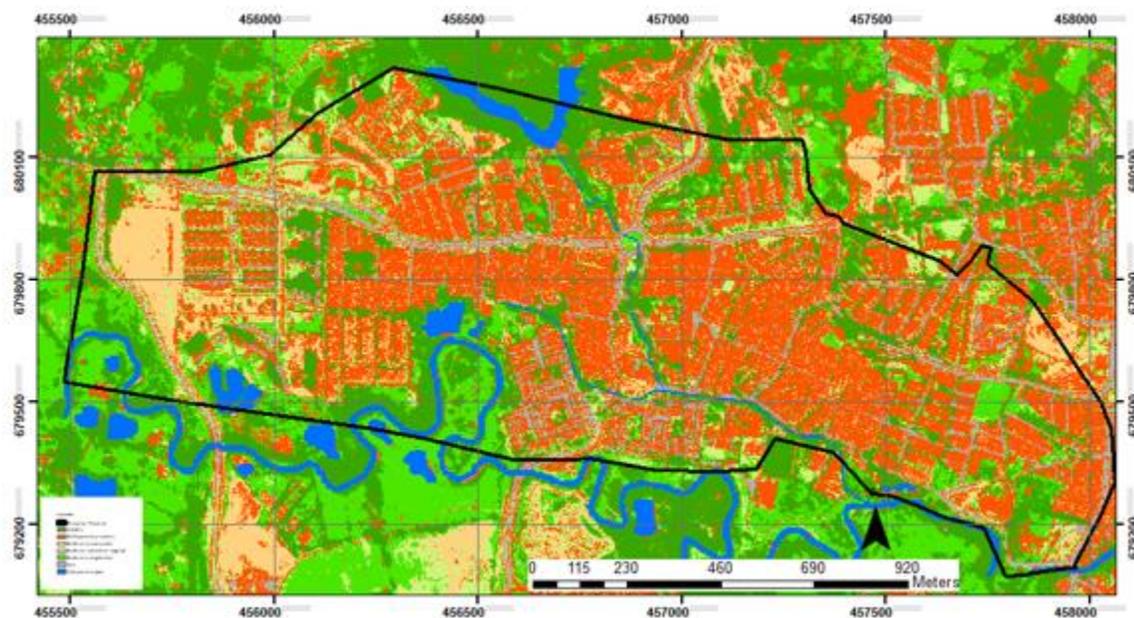
Nota. Fuente elaboración propia

Cobertura del Uso del Suelo en el Sector Porvenir en el Año 2022 con Siete Categorías de Clasificación



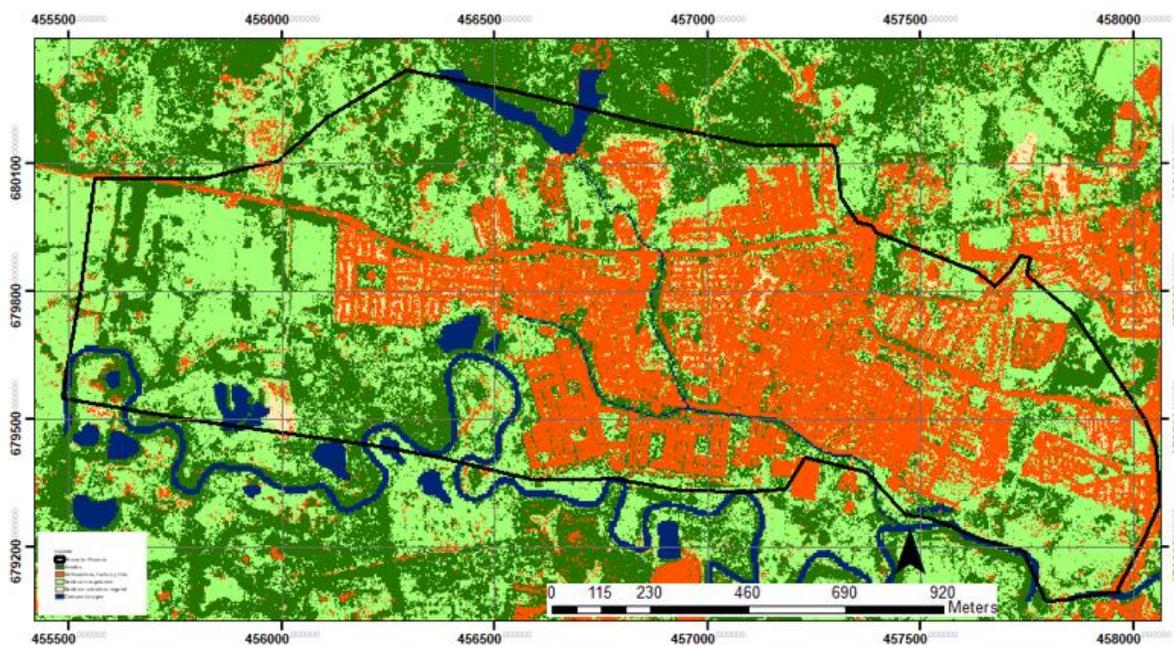
Nota. Fuente elaboración propia

Cobertura del Uso del Suelo en el Sector Porvenir en el Año 2024 con Siete Categorías de Clasificación



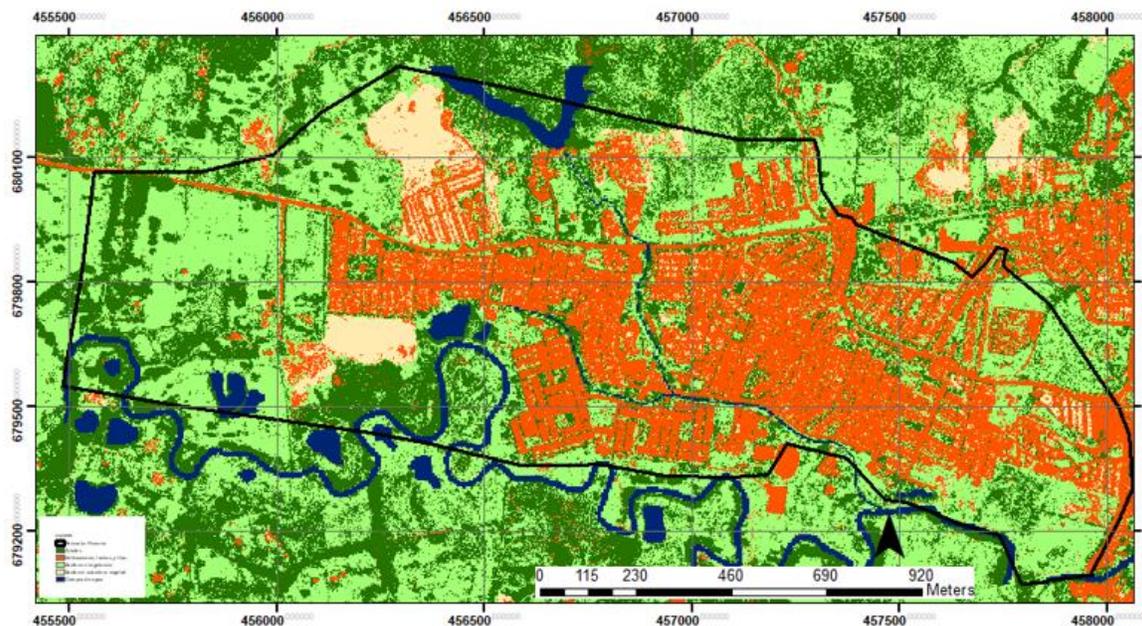
Nota. Fuente elaboración propia

Cobertura del Uso del Suelo en el Sector Porvenir en el Año 2009 con cinco Categorías de Clasificación



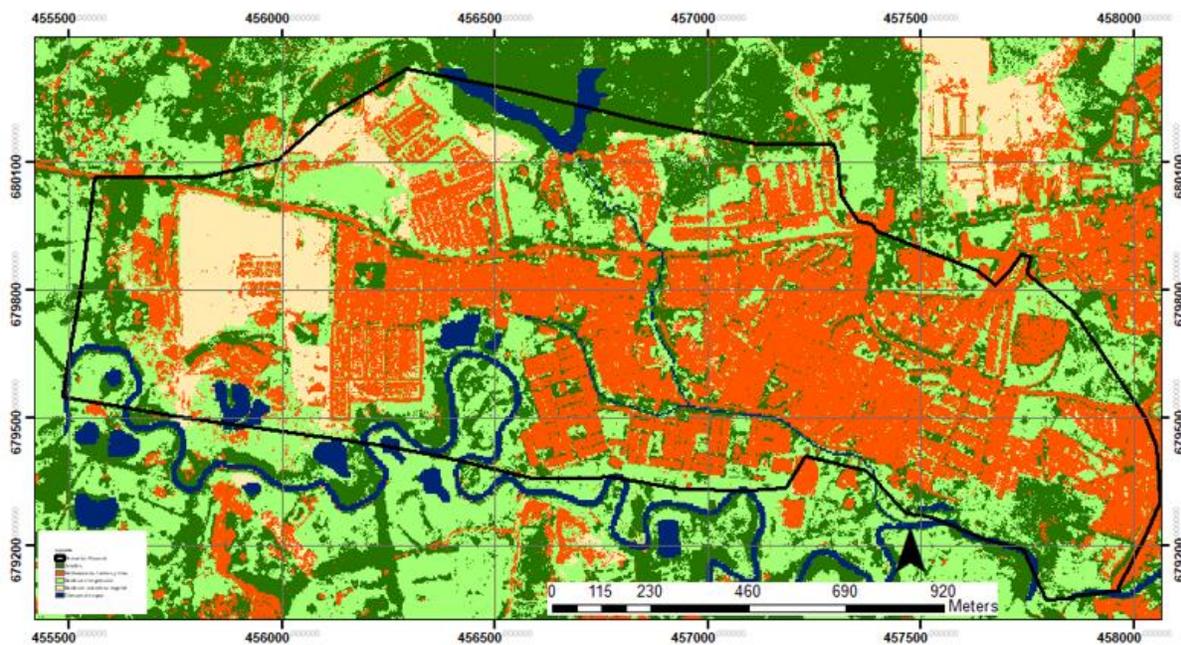
Nota. Fuente elaboración propia

Cobertura del Uso del Suelo en el Sector Porvenir en el Año 2010 con cinco Categorías de Clasificación



Nota. Fuente elaboración propia

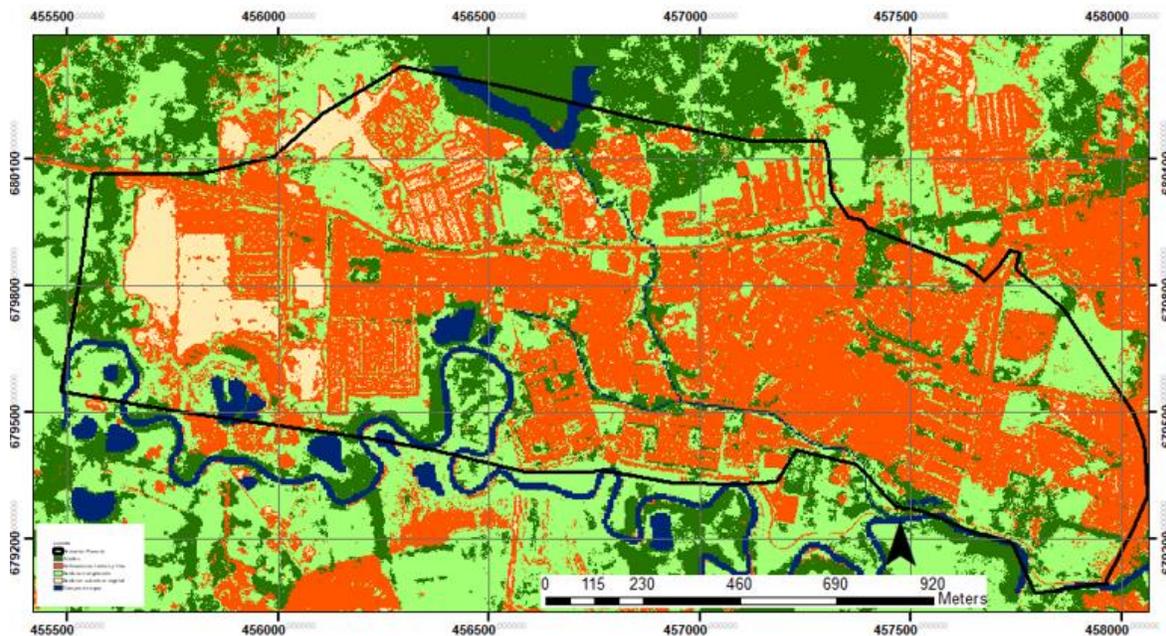
Cobertura del Uso del Suelo en el Sector Porvenir en el Año 2014 con cinco Categorías de Clasificación



Nota. Fuente elaboración propia

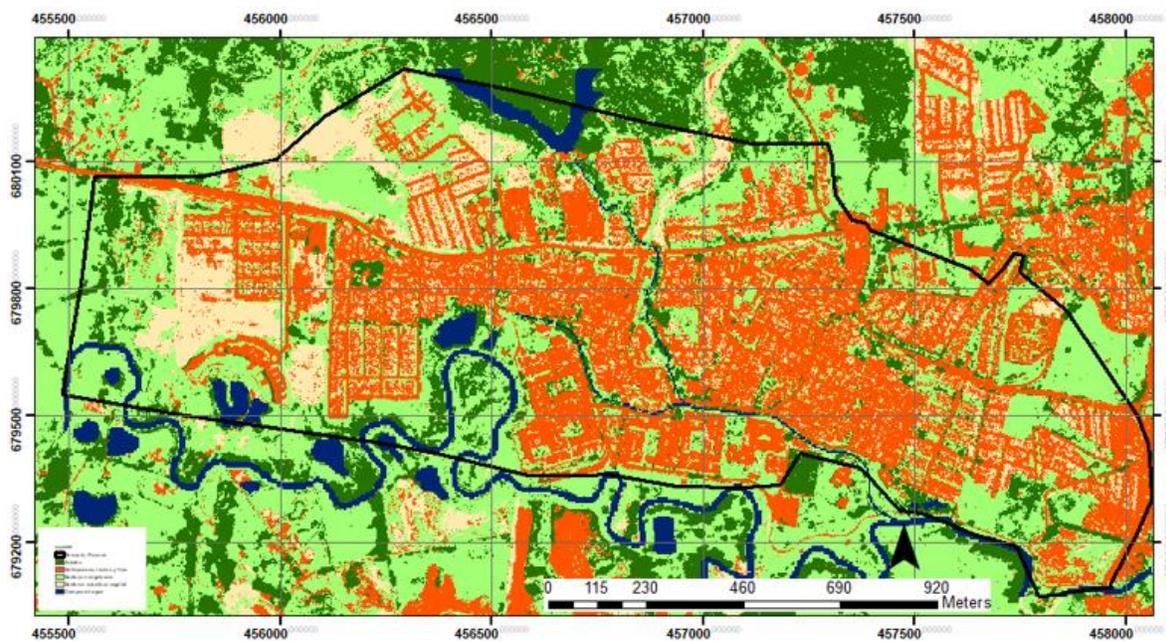
MODELACIÓN DEL CAMBIO DE COBERTURAS Y USO DEL SUELO PARA PREDECIR LA EXPANSIÓN URBANA Y EVALUAR SU IMPACTO EN EL SISTEMA DE DRENAJE ...

Cobertura del Uso del Suelo en el Sector Porvenir en el Año 2017 con cinco Categorías de Clasificación



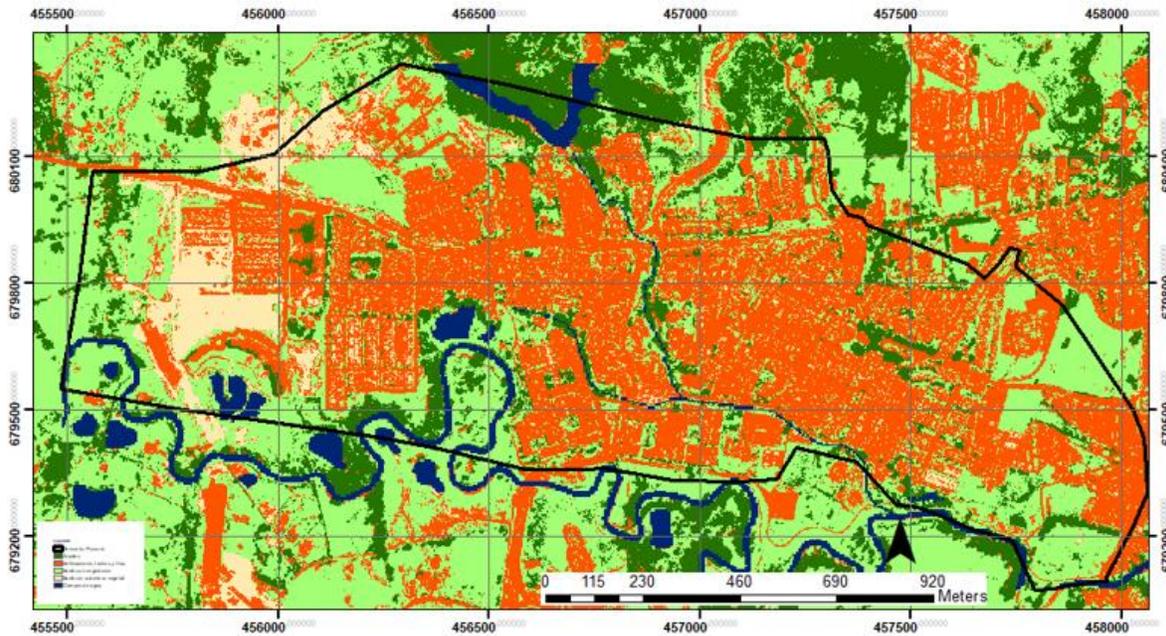
Nota. Fuente elaboración propia

Cobertura del Uso del Suelo en el Sector Porvenir en el Año 2018 con cinco Categorías de Clasificación



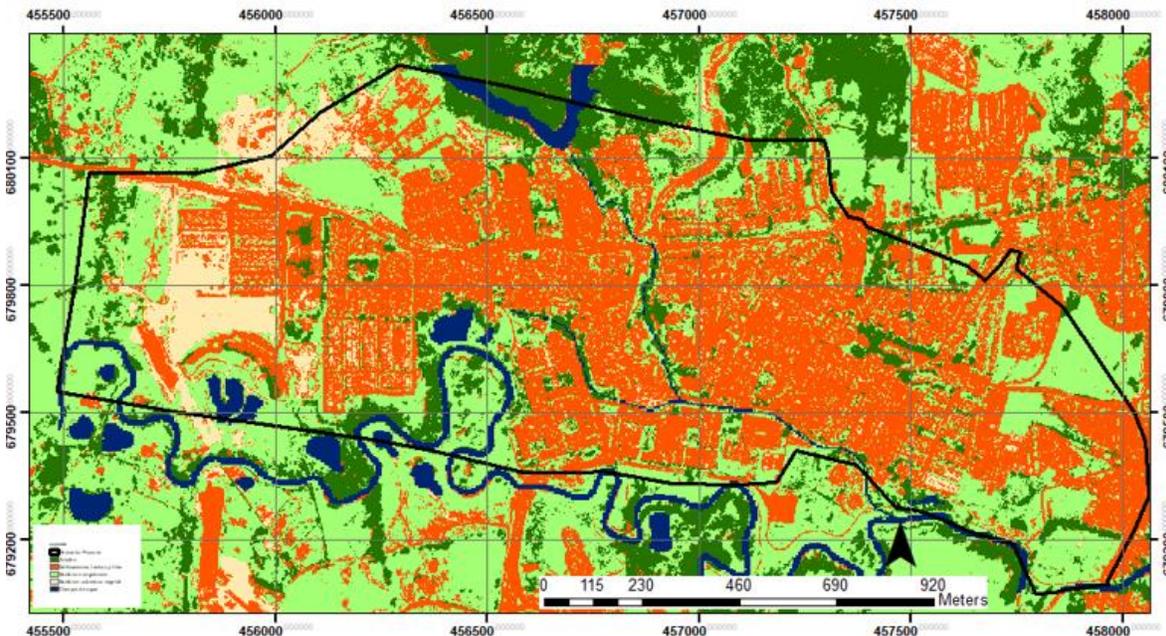
Nota. Fuente elaboración propia

Cobertura del Uso del Suelo en el Sector Porvenir en el Año 2020 con cinco Categorías de Clasificación



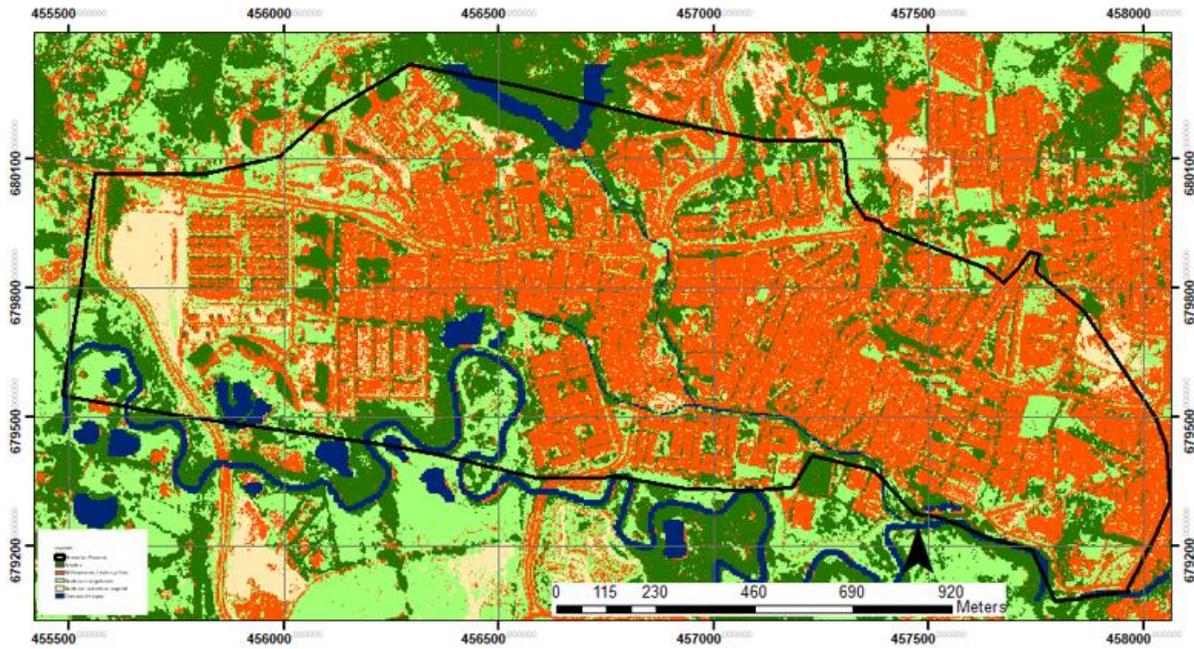
Nota. Fuente elaboración propia

Cobertura del Uso del Suelo en el Sector Porvenir en el Año 2022 con cinco Categorías de Clasificación



Nota. Fuente elaboración propia

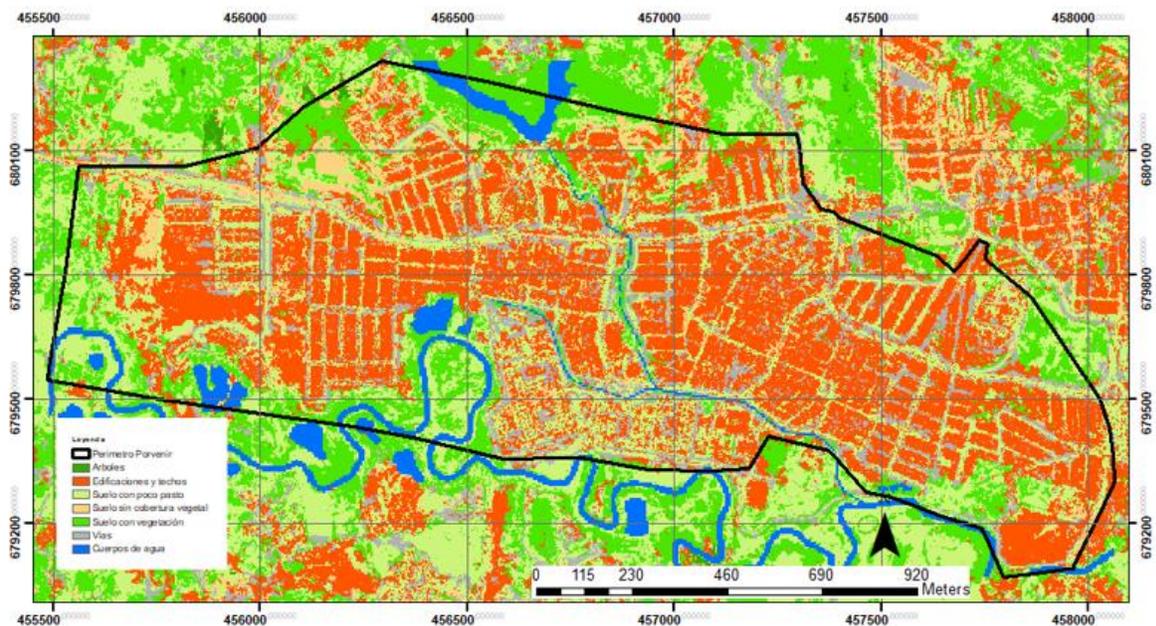
Cobertura del Uso del Suelo en el Sector Porvenir en el Año 2024 con cinco Categorías de Clasificación



Nota. Fuente elaboración propia

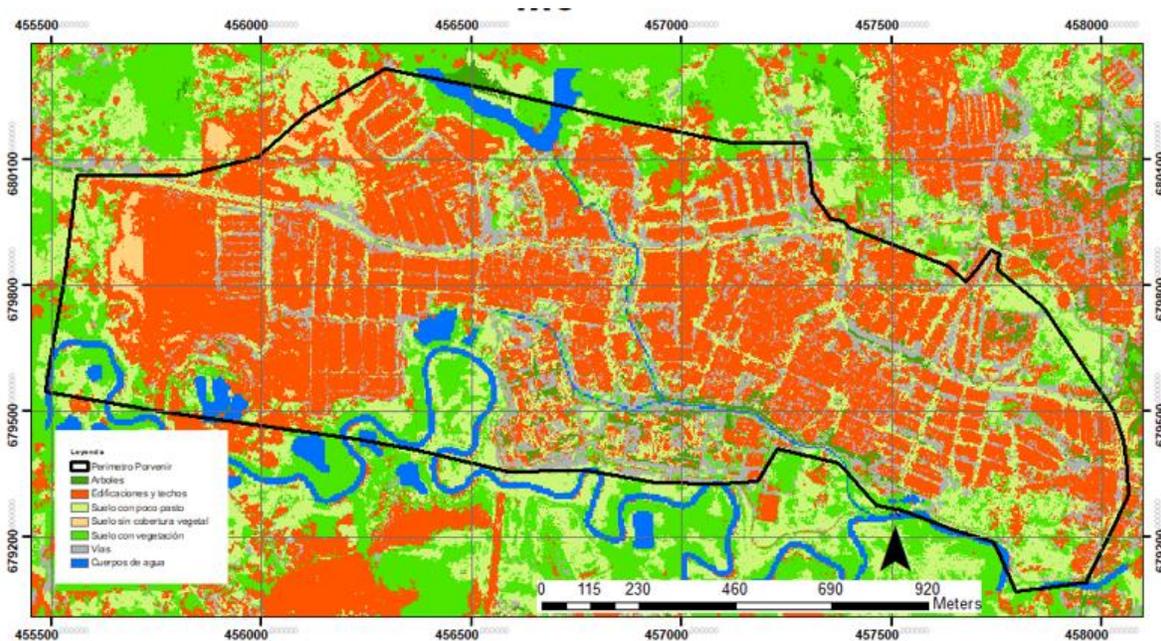
Anexo 3 Cobertura de uso de suelo para el año 2049 con clasificación de uso de suelo 7 y 5

Cobertura de uso del suelo para el perímetro de Porvenir en el escenario M2 para el año 2049



Nota. Fuente elaboración propia

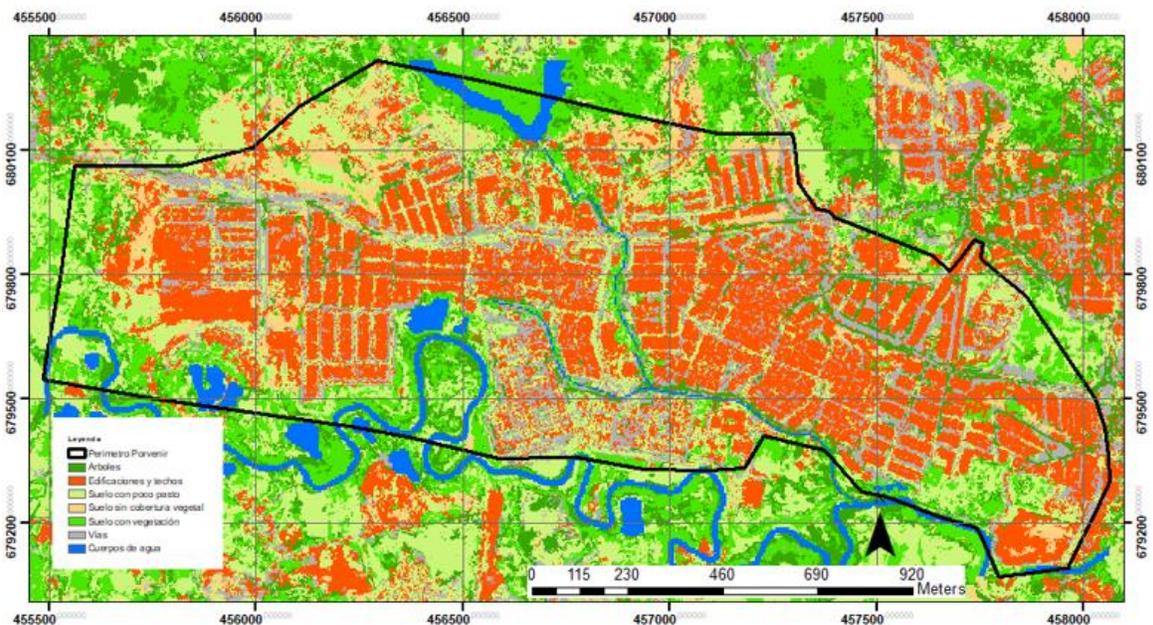
Cobertura de uso del suelo para el perímetro de Porvenir en el escenario M3 para el año 2049



Nota. Fuente elaboración propia

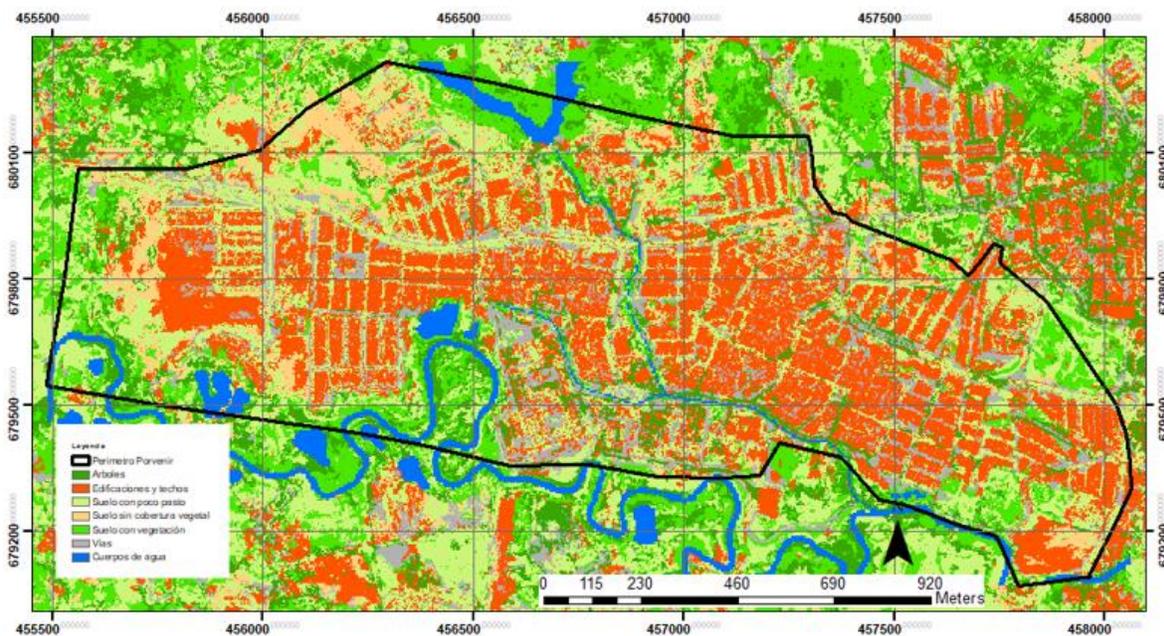
MODELACIÓN DEL CAMBIO DE COBERTURAS Y USO DEL SUELO PARA PREDECIR LA EXPANSIÓN URBANA Y EVALUAR SU IMPACTO EN EL SISTEMA DE DRENAJE ...

Cobertura de uso del suelo para el perímetro de Porvenir en el escenario M4 para el año 2049



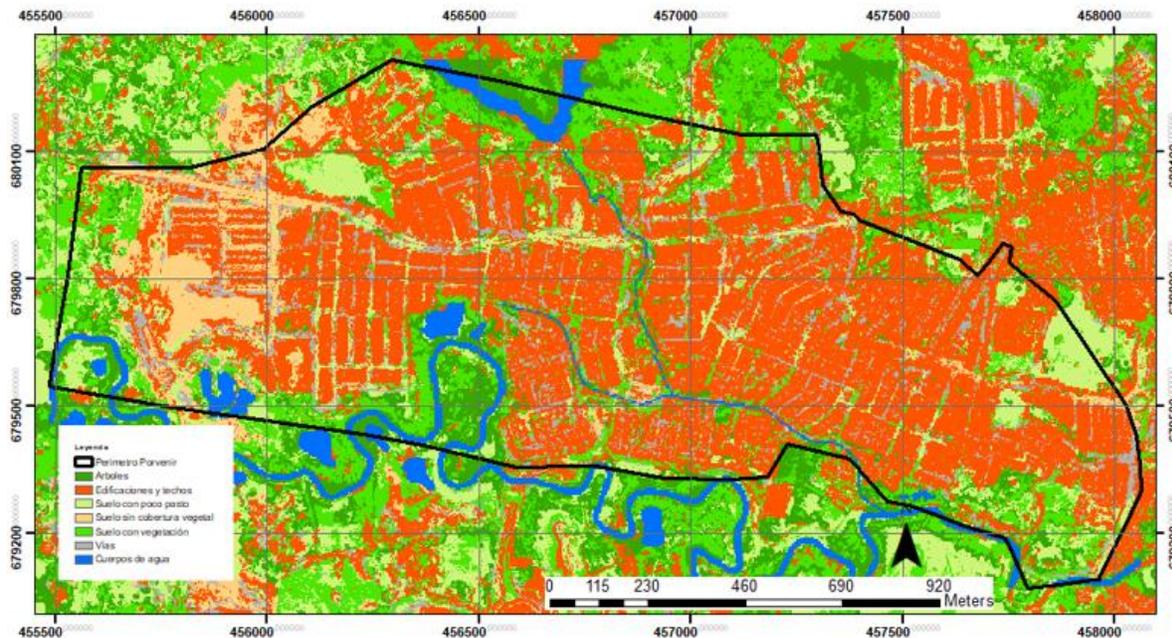
Nota. Fuente elaboración propia

Cobertura de uso del suelo para el perímetro de Porvenir en el escenario M5 para el año 2049



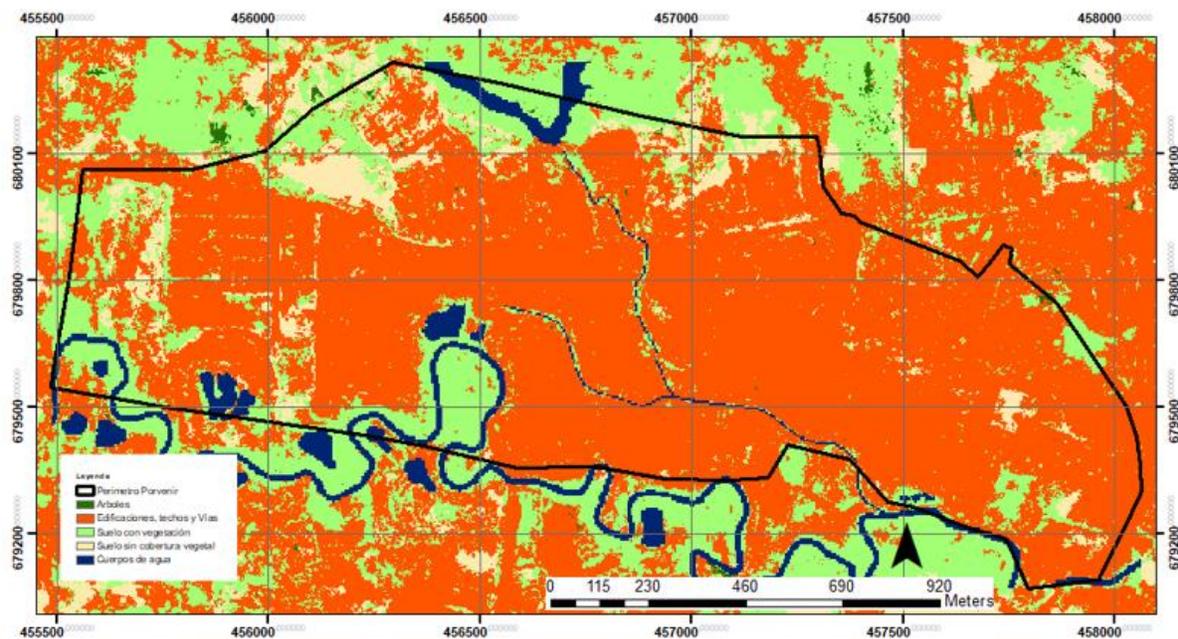
Nota. Fuente elaboración propia

Cobertura de uso del suelo para el perímetro de Porvenir en el escenario M6 para el año 2049

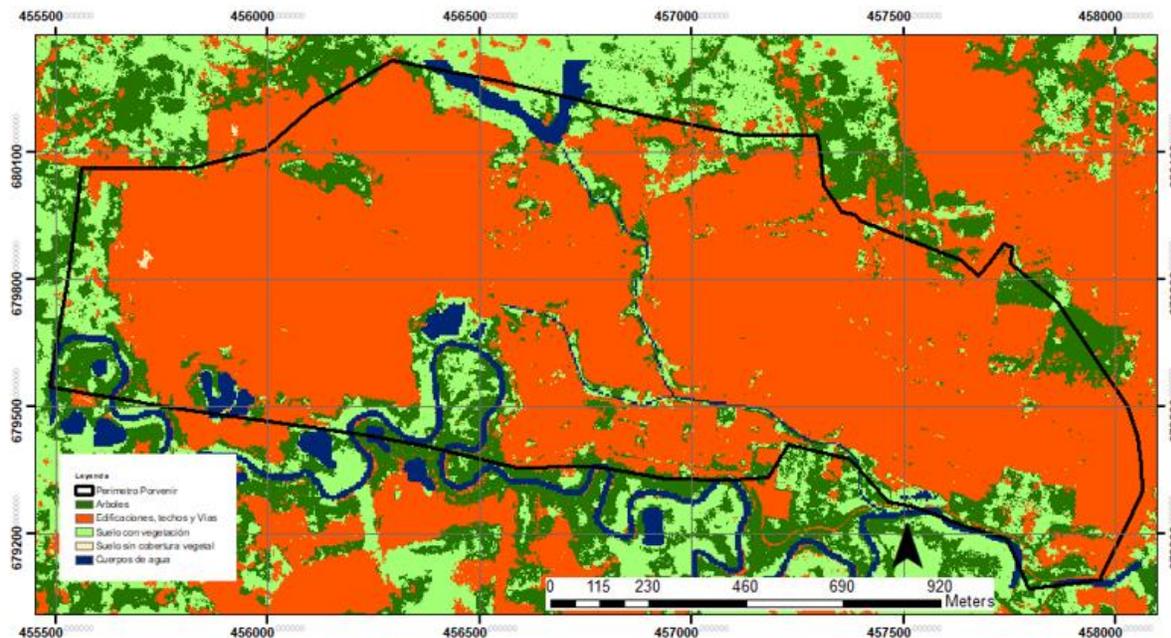


Nota. Fuente elaboración propia

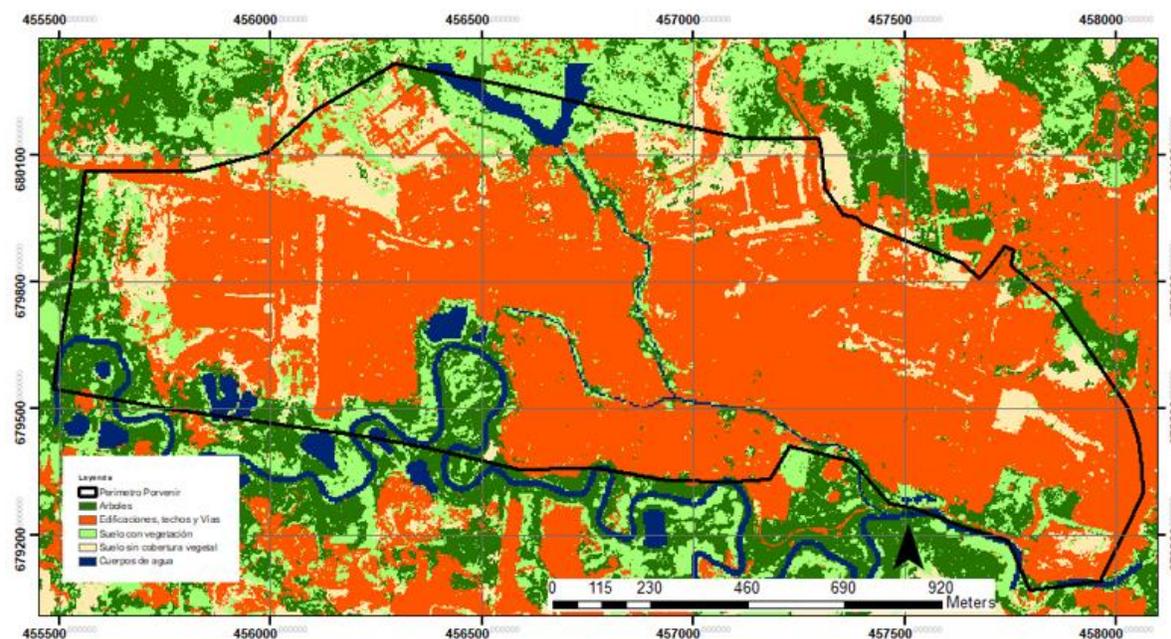
Cobertura de uso del suelo para el perímetro de Porvenir en el escenario N2 para el año 2049



Nota. Fuente elaboración propia

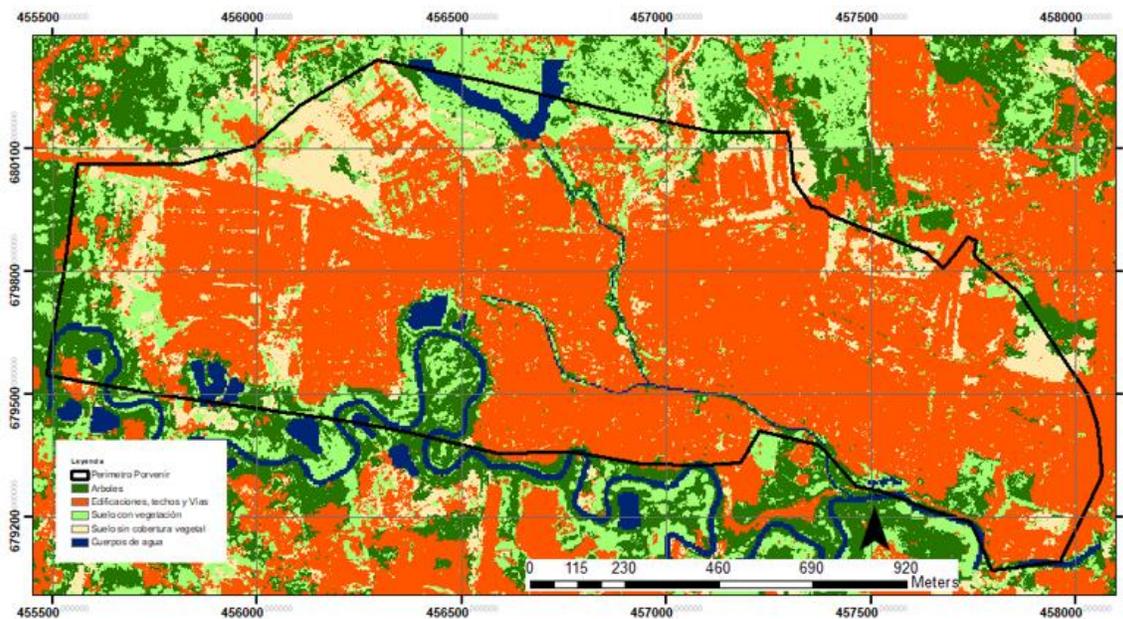
Cobertura de uso del suelo para el perímetro de Porvenir en el escenario N3 para el año 2049

Nota. Fuente elaboración propia

Cobertura de uso del suelo para el perímetro de Porvenir en el escenario N4 para el año 2049

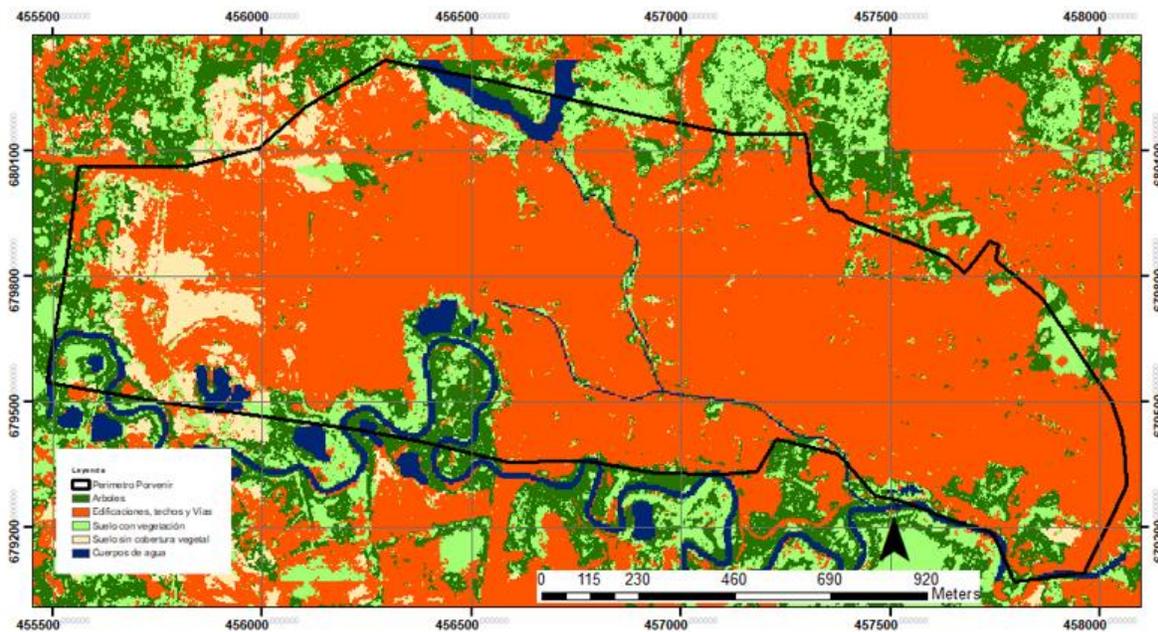
Nota. Fuente elaboración propia

Cobertura de uso del suelo para el perímetro de Porvenir en el escenario N5 para el año 2049



Nota. Fuente elaboración propia

Cobertura de uso del suelo para el perímetro de Porvenir en el escenario N6 para el año 2049



Nota. Fuente elaboración propia