INSTITUTO DE PLANEACIÓN INTEGRAL DEL MUNICIPIO DE CHIHUAHUA

INFORME FINAL

Proyecto

VALORACIÓN DE SERVICIOS AMBIENTALES DE LAS ÁREAS NATURALES DE VALOR AMBIENTAL (ANVA) y DE PRESERVACIÓN ECOLÓGICA PRIMARIA (PEP) DEL CENTRO DE POBLACIÓN DE LA CIUDAD DE CHIHUAHUA

Supervisor IMPLAN

I.E. Alisha Evangelina Catalano Castillo

Consultor

D. Ph. Jesús Alejandro Prieto Amparán

Octubre, 2020

Forma recomendada de citar

Prieto-Amparán, J. A. 2020. Valoración de servicios ambientales de las áreas naturales de valor ambiental (ANVA) y de preservación ecológica primaria (PEP) del centro de población de la ciudad de Chihuahua. Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua (IMPLAN), Chihuahua, Chih., México.

Fotografías

Fotografías dentro del Centro de Población de Chihuahua, tomadas con dispositivos móviles y con dron DJI Phantom 4 Pro. IMPLAN/Jesús Alejandro Prieto Amparán.

CONTENIDO

1. PALABRAS DEL PROYECTO 5
2. RESUMEN EJECUTIVO 5
3. INTRODUCCIÓN 6
3.1 Servicios ecosistémicos 7
3.2 Valoración de servicios ecosistémicos 9
3.3 Herramientas para la valoración de servicios ecosistémicos 10
4. OBJETIVOS 11
5. JUSTIFICACIÓN 12
5.1 Problemática de los servicios ecosistémicos 12
6. MARCO CONTEXTUAL 14
6.1 Contexto Internacional – Objetivos del Desarrollo Sostenible 2030 14
6.2 Plan Nacional de Desarrollo 2019-2024 14
6.3 Plan Estatal de Desarrollo 2017-2021 15
6.4 Plan Municipal de Desarrollo 2018-2021 16
7. PROBLEMÁTICA 18
8. ÁREA DE ESTUDIO 19
9. METODOLOGÍA 20
9.1 ¿Por qué mapear los servicios ecosistémicos? 20
9.2 Servicios ecosistémicos a evaluar 20
9.3 Herramientas para la cuantificación de los servicios ecosistémicos 20
9.4 Trabajo en campo 21
9.5 Coberturas de suelo/uso de suelo 26
9.6 Almacenamiento de Carbono 33
9.7 Calidad del hábitat 34
9.8 Producción de agua 39
9.9 Proporción de entrega de sedimentos 48
9.10 Calidad escénica 53
9.11 Modelización y simulación futura con Dinamica-EGO 57
10. RESULTADOS E IMPLICACIONES 59
10.1 Clasificación de coberturas de suelo usos de suelo 59
10.2 Distribución del carbono 60

10.3 Calidad del hábitat 72
10.5 Producción de sedimentos 78
10.6 Calidad escénica 82
11. CONCLUSIONES 85
12. LECCIONES APRENDIDAS 87
13. CONTINUIDAD 87
14. AGRADECIMIENTOS 87
15. REFERENCIAS 88
16. GLOSARIO 93
ANEXO FOTOGRÁFICO 94

1. PALABRAS DEL PROYECTO

Servicios ecosistémicos, InVEST, paisaje, centro de población.

2. RESUMEN EJECUTIVO

La ciudad de Chihuahua esta se localiza a una altura promedio de 1440 msnm entre una zona de valles, rodeada por lomeríos, los cuales recorren el municipio de Chihuahua con dirección norte-sur, considerándose zonas no aptas para la urbanización, ya que cuentan con pendientes superiores al 20%. Dentro del centro de población, se encuentran tres importantes zonas de lomeríos; Nombre de Dios, situado al este, Sierra Azul y parte de Sierra del Mogote, situado al oeste y noroeste respectivamente, y las zonas cerriles que rodena al Cerro Grande, ubicado al sur. Otro rasgo característico que distingue al centro de población es el cruce de los ríos Chuvíscar y Sacramento que atraviesan la ciudad de Chihuahua; el primero la atraviesa en forma diagonal, con dirección suroeste-noreste y el segundo circunda la periferia norte. Además, al suroeste se encuentran tres presas; Chihuahua, Chuvíscar y Rejón, las cuales son importantes centros de recreación y/o distracción para la población de la ciudad.

Por otro lado, el desarrollo de la ciudad de Chihuahua, dentro del centro de población ha dado origen a un conjunto de problemas en los ámbitos, social, económico y ambiental, provocando marginación en determinados puntos de la ciudad, principalmente en las zonas periféricas, lo que también ha mermado los recursos naturales, lo que ha ocasionado la degradación y disminución de su calidad, propiciando condiciones de insustentabilidad. Para atender esto, el PDU con visión 2040, propone una serie de soluciones para la integración del área urbana y las zonas naturales de su centro de población.

Uno de los objetivos del Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua (IMPLAN) es valorar los servicios ecosistémicos del centro de población de la ciudad de Chihuahua, lo que será de utilidad para conocer su distribución y cantidad. Por ello, el presente proyecto se llevó a cabo el levantamiento de información, caracterización e implementación de modelos para mapear la distribución espacial de los servicios ecosistémicos, como base de sustentación para la toma de decisiones en materia ambiental.

3. INTRODUCCIÓN

Todos los seres vivos en el mundo dependen de los ecosistemas de la Tierra y de los servicios que éstos proveen. Estos servicios del ecosistema pueden ser el agua, la regulación del clima, el disfrute estético, entre otros. En los últimos 50 años, las actividades antropogénicas han cambiado estos ecosistemas en una forma acelerada y en superficies que van extendiéndose cada vez más, esto, comparado con cualquier otro período de tiempo de la historia humana. La demanda de estos servicios de los ecosistemas, se debe en gran medida para satisfacer la necesidad de alimentos, relacionado directamente con la seguridad alimentaria, así como también el acceso a agua dulce, madera, fibra y combustibles. La transformación del planeta, a causa de esta demanda, ha contribuido a sustanciales ganancias netas en el desarrollo humano y el crecimiento económico. La satisfacción de estas demandas, mediante los servicios ecosistémicos, se concentra principalmente en las zonas urbanas. Sin embargo, la creciente demanda de servicios de los ecosistemas, se ve amenazada por la degradación cada vez más por el aumento de la tasa de explotación, comparado con la tasa de recuperación los ecosistemas (MEA, 2005).

El crecimiento de las zonas urbanas pone de hincapié la importancia de cuantificar y diseñar estrategias de conservación sobre los servicios ecosistémicos en la planificación del desarrollo urbano. Las decisiones sobre la asignación del uso de suelo adoptadas durante el proceso de planificación pueden tener consecuencias positivas en los desarrollos urbanos, y en su capacidad para proteger y conservar la prestación de servicios ecosistémicos. Esta integración de los servicios ecosistémicos en los procesos de planificación urbana, proporcionan una comprensión completa de la distribución los recursos, sus relaciones y posteriormente, el surgimiento de compensaciones que pueden surgir de las decisiones sobre el uso del suelo (urbano y natural) (Wang et al., 2019).

En los entornos urbanos, la administración de los ecosistemas es necesaria desde un punto de vista multidisciplinario ya que, de esta forma, se promueve la apreciación de los entornos en los que se distribuyen las ciudades. Los entornos urbanos o paisajes en los que se distribuyen los servicios del ecosistema, dan el

soporte para que las ciudades cuenten con espacios naturales más duraderos, es decir, que sean resistentes, y que su población sea resiliente a las condiciones del cambio ambiental global futuro (Arnone et al., 2018). Con beneficios que van desde el suministro de agua, la producción de oxígeno, hábitat, eliminación de contaminantes, servicios y oportunidades de recreación, los paisajes del entorno urbano proporcionan un punto de conexión y ocio de los seres humanos con la naturaleza en zonas que, sin adecuada planeación, pronto podrán estar densamente pobladas (Larondelle y Hasse, 2013).

El paisaje, el cual alberga una gran cantidad de servicios ecosistémicos en el entorno de los espacios urbanos, requiere de su monitoreo y manejo, mediante su protección, conservación y preservación. Sin embargo, cada vez más, debido a los límites del espacio y a la necesidad de responder a nuevos impulsores (por ej. crecimiento urbano, aumento en la población), se han aplicado nuevos y novedosos enfoques para la gestión de los servicios ecosistémicos en el contexto del área urbana (Jian et al., 2017).

3.1 Servicios ecosistémicos

Los servicios de los ecosistemas son los bienes y los beneficios que los humanos pueden obtener del entorno natural. La comunidad científica se refiere a estos servicios del ecosistema, como la interacción entre el entorno natural (elementos bióticos y abióticos) y el hombre. Se depende de estos servicios de los ecosistemas para producir alimentos, regular los suministros de agua y el clima, así como descomponer los productos de desecho. También, se valoran estos servicios de formas indirectas, como son el contacto con la naturaleza, lo que proporciona recreación, y también un atractivo estético, lo que se sabe, tiene un impacto positivo en la salud y la felicidad. A continuación, se describen los tipos de los servicios ecosistémicos, acorde a lo mencionado por la iniciativa internacional Evaluación Mundial de los Ecosistemas del Milenio (MEA, 2005):

- Servicios de apoyo: Estos, son el sustento para la producción de todos los demás servicios de los ecosistemas. Algunos ejemplos incluyen la producción de biomasa, producción de oxígeno, formación del suelo y prevención de la erosión, el ciclo del agua y el disfrute de hábitat.

- Servicios de aprovisionamiento: Son los productos obtenidos de los ecosistemas, los cuales pueden ser recursos genéticos, alimentos, fibras y agua dulce.
- Servicios de regulación: Estos, se refieren a los beneficios obtenidos de la regulación de los procesos del ecosistema, incluyendo, la purificación del agua, así como el control de algunas enfermedades humanas.
- Servicios culturales: Referentes a los beneficios no materiales que las personas obtienen de los ecosistemas a través del enriquecimiento espiritual, desarrollo cognitivo, reflexividad, recreación, experiencia estética, incluyendo, por ejemplo, los sistemas de conocimiento, las relaciones sociales y los valores estéticos.

En la Ilustración 1, se muestra un esquema de los servicios ecosistémicos, sus determinantes y componentes del bienestar.

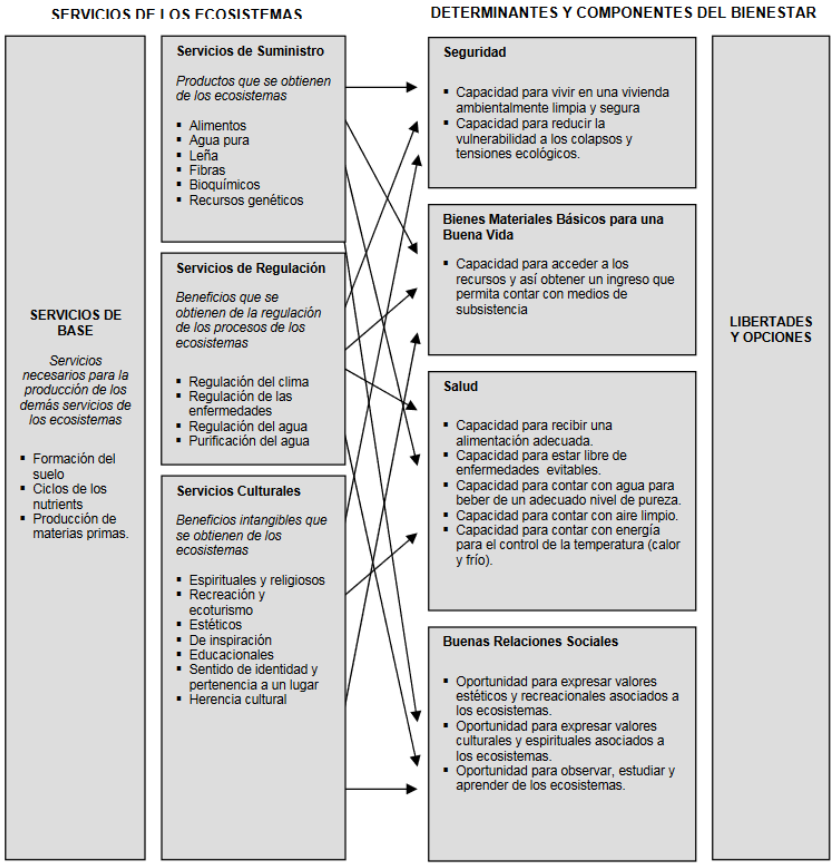


Ilustración 1. Esquema de los servicios ecosistémicos y sus determinantes y componentes del bienestar. Fuente: MEA (2005).

3.2 Valoración de servicios ecosistémicos

Algunos beneficios, como los mencionados anteriormente, así como los cultivos, peces, cosecha de madera, ceras, entre otros, son tangibles. Otros, como la polinización, control de la erosión, regulación del clima y disfrute estético y espiritual no son tangibles. Sin embargo, todos ellos sustentan directa o indirectamente las economías humanas y los medios de vida diario. La iniciativa internacional de la Evaluación Mundial de los Ecosistemas del Milenio (MEA, 2005) resalta las contribuciones de esos servicios para el bienestar humano.

A pesar de su importancia para la supervivencia humana, los ecosistemas que proporcionan estos innumerables servicios ecosistémicos se están degradando a un ritmo alarmante (Sutton et al., 2016). En 2005, la Evaluación Mundial de los Ecosistemas del Milenio, llevo a cabo un estudio sobre el estado de los ecosistemas del mundo. En esta evaluación, participaron más de 1300 expertos de 95 países, informando, que más del 60% de los servicios de los ecosistemas se encuentran en un estado de degradación. Esta tendencia de degradación, continuará y su tasa de degradación será mayor en el próximo medio siglo. Esta degradación mundial de los servicios de los ecosistemas, representa una amenaza importante para el logro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), empeorando la pobreza, comprometiendo la seguridad alimentaria y desencadenando conflictos sociales (Wood et al., 2018).

Mas adelante, en 2010, The Economics of Ecosystems and Biodiversity (TEEB), publicó sus conclusiones acerca de la valoración sobre los servicios ecosistémicos. El objetivo de la TEEB era hacer un llamado a las naciones sobre los beneficios económicos mundiales de la biodiversidad, resaltando, así como los elevados costos de la pérdida de la biodiversidad de los ecosistemas. El TEEB elaboró una serie de informes en los que se examinaban: los costos económicos mundiales de la pérdida de la diversidad biológica, así como los costos y beneficios de las medidas para reducir esas pérdidas. También, dentro de estos informes, propusieron directrices para los encargados de formular políticas a diferentes escalas; el acceso a los instrumentos para medir los efectos de las empresas en los ecosistemas y la diversidad biológica; y la concientización sobre la contribución de

los servicios de los ecosistemas y la diversidad biológica al bienestar humano y la forma en que las medidas individuales pueden tener un impacto (Ten Brink, 2011).

3.3 Herramientas para la valoración de servicios ecosistémicos

El proyecto Natural Capital desarrollo el programa computacional InVEST (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs). Este programa se compone de un conjunto de herramientas, con utilidad para la valoración de servicios ambientales. InVEST, es una de las herramientas que tiene por utilidad mapear o espacializar y valorar los bienes y servicios del medio ambiente, los cuales son esenciales para el sostenimiento de la vida humana. El programa InVEST, permite a los tomadores de decisiones, identificar áreas del territorio en las que se deben promover los esfuerzos en materia de inversión para la conservación, protección y en su caso, restauración de los servicios ecosistémicos. El programa, ha sido diseñado para dar soporte con énfasis en la gestión ambiental (Sharp et al., 2018). Algunas de las preguntas a las que InVEST puede dar respuesta son:

- ¿Dónde conseguiría la protección de los recursos naturales los mayores beneficios?
- ¿Qué partes de los ecosistemas proporcionan los mayores valores de secuestro de carbono, calidad del hábitat, calidad escénica, entre otros?

InVEST, como una herramienta de sistemas de información geográfica espacialmente explícita, se utiliza para cuantificar y valorar los servicios de los ecosistemas basándose en las funciones de los ecosistemas y métodos de valoración económica.

La presente propuesta muestra el enfoque para la valoración de los servicios ecosistémicos en las los paisajes, llamados aquí, Áreas Naturales de Valor Ambiental (ANVA) y de Preservación Ecológicas Primaria (PEP) del centro de población de la ciudad de Chihuahua, México.

4. OBJETIVOS

- Valorar los servicios ambientales de almacenamiento de carbono, calidad del hábitat, proporción de entrega de sedimentos, producción de agua y calidad escénica, así como su distribución espacial en las ANVA y PEP del centro de población de la ciudad de Chihuahua.
- Cuantificar la pérdida en superficie y económica de las ANVA y PEP para 2020.
- Determinar si los servicios ecosistémicos de las ANVA y PEP tienen influencia con la población, su ubicación y estrato social.

5. JUSTIFICACIÓN

5.1 Problemática de los servicios ecosistémicos

Los ecosistemas proveen un amplio rango de bienes y servicios, los cuales son necesarios para el bienestar humano, la salud, los medios de subsistencia y la supervivencia de los seres vivos. En 2005, el concepto de servicios ecosistémicos (SE) gano mayor atención cuando las Naciones Unidas, en especial con la publicación derivada del documento Evaluación de los Ecosistemas del Milenio (MEA, 2005). Estos SE varían en cantidad, calidad y extensión territorial a través del tiempo, dependiendo del tipo de ecosistema y su condición. Por ejemplo, en trabajos llevados a cabo, se muestra que los ecosistemas de pastizal son diferentes en términos de los servicios ecosistémicos que proveen, comparados con los bosques o matorrales. Sin embargo, cada uno de ellos provee un servicio ecosistémico especial y realiza una función específica, la cual no puede ser remplazada (Reed et al., 2015; Willemen et al., 2018).

Los SE están sujetos a una gran presión, por ej., las actividades antropogénicas, las cuales contribuyen a la reducción de los SE. Algunas de estas actividades son el cambio en la cobertura de suelo/uso de suelo (CCSUS) como son las actividades agrícolas para subsistencia, expansión de los asentamientos humanos, minería, deforestación, quemas no controladas, entre otros (Lawler et al., 2014). Estas circunstancias han puesto a reflexionar a los administradores del territorio en materia de valorar los SE. Lo anterior, promueve la adopción de la toma de decisiones en materia ambiental. Esto, ayudaría a conocer los costos de oportunidad para la restauración y soporte en el pago por los servicios de los ecosistemas (Costanza y Folke, 1997; Gómez-Baggethun y Barton, 2013).

El crecimiento de las áreas urbanas y el impacto de las actividades antropogénicas en los ecosistemas son los principales impulsores del cambio. Estos impulsores, como el crecimiento urbano, son originados por el acceso a mejores oportunidades como el empleo o residencia en zonas urbanas, servicios de salud, así como las alteraciones en los entornos naturales, como la fragmentación, aislamiento de superficies vegetales, entre otros. Con este tipo de desarrollo urbano,

los ecosistemas, han sufrido contaminación ambiental, deterioro ecológico y pérdidas económicas (Kroll et al., 2012; Chan et al., 2011).

6. MARCO CONTEXTUAL

6.1 Contexto Internacional – Objetivos del Desarrollo Sostenible 2030

Las zonas urbanas, han permitido a las personas progresar social y económicamente, a través del acceso a la educación, vivienda, trabajo, entre otros. La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible y los Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS) representan el plan de acción para la inclusión social, la sostenibilidad ambiental y el desarrollo económico de las naciones. Los problemas que enfrentan las ciudades se pueden aminorar de manera sostenible, asegurando la prosperidad y crecimiento de las actuales y futuras generaciones, y al mismo tiempo aprovechando los servicios ambientales.

En materia de alineación con los ODS (NU, 2018), algunos de los objetivos relacionados con las ciudades y la protección de los servicios ecosistémicos son:

- SDG11. Lograr que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles.
- SDG13. Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos.
- SDG15. Proteger, restablecer y promover el uso sostenible de los ecosistemas terrestres, gestionar sosteniblemente los bosques, luchar contra la desertificación, detener e invertir la degradación de las tierras y detener la pérdida de biodiversidad.

6.2 Plan Nacional de Desarrollo 2019-2024

El gobierno de México se encuentra en proceso del avance en el desarrollo sostenible. Definiendo el desarrollo sostenible como la satisfacción de las necesidades de las generaciones presentes para lograr su desarrollo sin comprometer a las generaciones futuras. Para esto, se el gobierno federal se plantea la meta de extender en la sociedad la conciencia ambiental y la convicción del cuidado del entorno. Para lograr esto, se resaltan algunos puntos en material de protección al medio ambiente contenidos en el Plan Nacional de Desarrollo 2019-2024, así como otros documentos oficinales.

- Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente. Se establece entre los criterios para contribuir al logro de los objetivos de la política

ambiental, la planeación del desarrollo urbano y la vivienda, ordenando la diversidad y eficiencia de los usos del suelo y, estableciendo el fomento de la mezcla de los usos habitacionales con los productivos que no representen riesgos o daños a la salud o que afecten áreas de valor ambiental (Congreso de la Unión, 2018).

- Se garantizará la protección, conservación y preservación de la flora y de la fauna. Se reforestará una buena parte del territorio nacional, ríos, arroyos y lagunas, comprometiéndose a su recuperación. La protección de la calidad del agua y su manejo adecuado serán acciones generalizadas en el territorio nacional. Por último, se promoverá la conciencia ambiental y la reflexión del cuidado del entorno natural (PND, 2019).
- En materia de la Agenda Ambiental, en su eje de transición 1, se menciona se contará con bienes y servicios ecosistémicos, y se logrará la autosuficiencia alimentaria. En su eje de transición 5 se menciona que la población que habita las ciudades, gozará de un medio ambiente sano, mediante la protección y conservación de los recursos hídricos, los hábitats naturales, la biodiversidad en los entornos urbanos y periurbanos. En su eje rector 7, sobre ciudadanía, justicia y gobernanza ambiental, se menciona que el gobierno asegura el acceso igualitario y la distribución equitativa de los beneficios del uso de los recursos naturales, mediante la participación (SEMARNAT, 2020).

6.3 Plan Estatal de Desarrollo 2017-2021

Algunos de los factores como el cambio en la cobertura de suelo/uso de suelo para la agricultura, la industrialización, sobreexplotación de los mantos acuíferos, prácticas de manejo no sustentable, entre otros, han sido los principales factores que han deteriorado los servicios ecosistémicos. El plan estatal de desarrollo del Gobierno del Estado de Chihuahua se enmarcan los siguientes datos y estrategias en relación con los servicios ecosistémicos:

- Se debe promover la sinergia entre, el desarrollo urbano y el agua, los cuales son factores estratégicos que deben ser prioridad en relación con el cuidado del medio ambiente y la sustentabilidad del estado.

- El Índice de Competitividad Estatal del IMCO (Índice Mexicano de Competitividad), dentro del subíndice de manejo sustentable del medio ambiente, reporta que, en materia de energía, en 2010 el estado ocupaba la posición 23 de los 32 estados, y para 2014 cayó hasta la posición 31 impactado especialmente en la tasa de mortalidad infantil, por enfermedades respiratorias, generación de residuos y limitada existencia de energías alternativas.
- Se deben promover decretos de áreas naturales protegidas estatales, las cuales soporten e impulsen, de forma sustentable el aprovechamiento del patrimonio ecológico e histórico de la entidad. Además, que estas áreas favorezcan la creación de espacios de convivencia, recreación e investigación y promuevan el desarrollo sustentable y la identidad estatal.
- Establecer mecanismos de vigilancia participativa para mejorar el aprovechamiento sustentable de la biodiversidad y disminuir la degradación de los ecosistemas.

6.4 Plan Municipal de Desarrollo 2018-2021

En materia municipal, la expansión de la zona urbana y el crecimiento demográfico se traduce en un rápido y desordenado proceso de urbanización, dando como resultado un patrón de localización disperso, lo que compromete la de los ecosistemas, sobre todo en las zonas periurbanas. Lo anterior es debido al crecimiento fragmentado, disperso y asilado, que progresivamente va extendiéndose sobre zonas de riesgo, como áreas inundables, cauces de arroyos, zonas de deslizamientos, entre otros. Se enmarcan algunos datos y estrategias en relación con los servicios ecosistémicos por parte del Plan Municipal de Desarrollo del municipio de Chihuahua:

- La ciudad de Chihuahua cuenta con elementos naturales de elevado valor ambiental, considerando su sistema de ríos y arroyos, así como sus zonas cerriles. Estos elementos, sustentan la flora y fauna, así como las condiciones paisajísticas (calidad escénica).
- Los mantos acuíferos que abastecen la ciudad de Chihuahua se encuentran en un estatus de sobrexplotación, lo que genera escasez, baja disponibilidad,

cortes en los horarios de distribución, incrementando los costos de energía e inversiones por la profundidad a la que se debe acceder por el agua. Además, se cuenta con sequías y eventos hidrometeorológicos extremos (lluvias torrenciales), que han provocado degradación de suelos, lo que ocasiona incrementos en el deterioro de la cobertura vegetal, así como inundaciones.

7. PROBLEMÁTICA

En el centro de población de la ciudad de Chihuahua, los cambios de cobertura de suelo/uso de suelo (CSUS) es un fenómeno generalizado y común en el que las actividades de urbanización dominan el paisaje en el que se encuentra inmerso la ciudad (zonas cerriles, sistema hídrico), lo que afecta a los servicios ecosistémicos.

La combinación de la información de CSUS y los datos de valoración de los servicios de los ecosistemas pueden ayudar a identificar las áreas más vulnerables a los cambios en los servicios de los ecosistemas a nivel de paisaje y proporcionar un punto de entrada para el control racional de la expansión de la mancha urbana.

8. ÁREA DE ESTUDIO

El alcance geográfico del proyecto es el centro de población de la ciudad de Chihuahua, el cual cuenta con una superficie de 78,330.52 ha (Ilustración 2). En especial, las Áreas Naturales de Valor Ambiental (ANVA) con superficie de 20,157.47 ha, y las Preservación Ecológica Primaria (PEP), con una superficie de 20374.73, son las unidades de estudio, sumando una superficie de 40,532.21 ha (Ilustración 3). La información cartográfica de las ANVA y PEP se encuentran disponibles en el sitio oficial del Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua (IMPLAN, 2016).

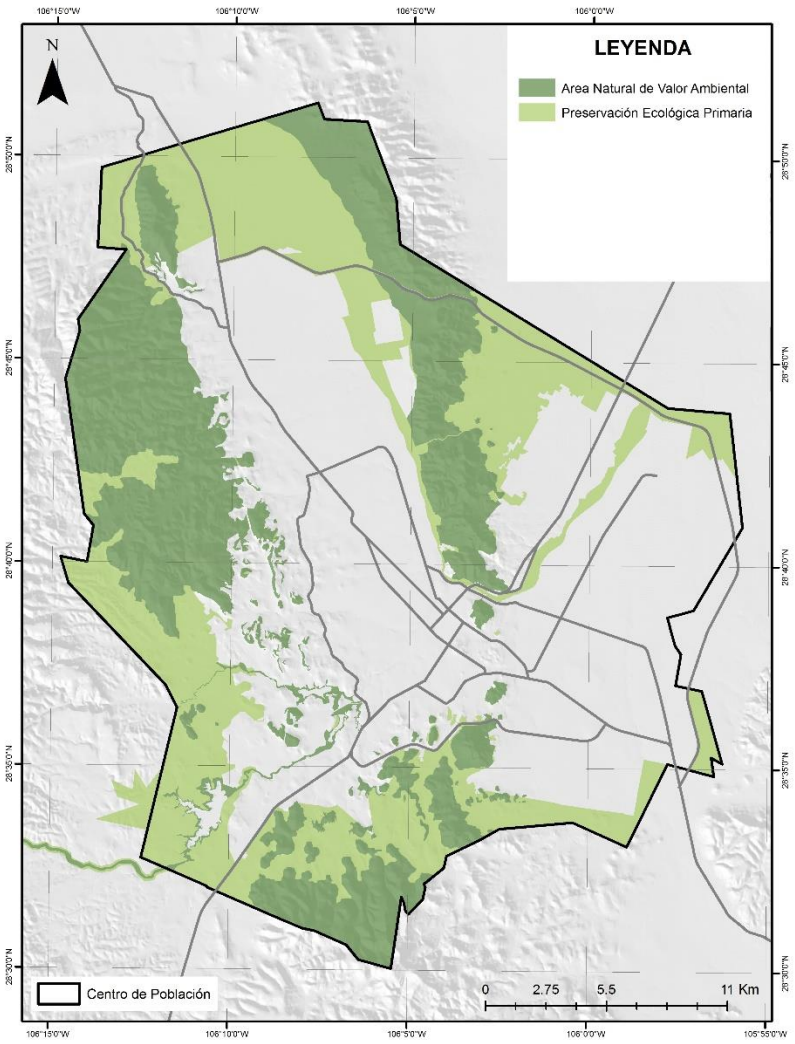


Ilustración 2. Áreas naturales de valor ambiental (ANVA) y Preservación Ecológica Primaria (PEP) del centro de población de la ciudad de Chihuahua. Fuente: Elaboración propia con datos del IMPLAN (2016).

9. METODOLOGÍA

9.1 ¿Por qué mapear los servicios ecosistémicos?

A pesar de la importancia de los servicios ecosistémicos, este capital natural se conoce poco, apenas se vigila y, en muchos casos, está sometido a una rápida degradación y agotamiento. Para cuantificar los servicios ecosistémicos, se han desarrollados modelos que ayudan a su comprensión. Los modelos actuales, que requieren relativamente poca aportación de datos, pueden identificar áreas en las que la inversión (por planes y programas de índole territorial) puede mejorar el bienestar humano y la naturaleza (Renner, 2019).

9.2 Servicios ecosistémicos a evaluar

La selección de los servicios ambientales se llevó a cabo por medio de las necesidades plasmadas en cada uno los planes de desarrollo y sus estrategias descritas anteriormente, las cuales van desde al ámbito federal hasta el municipal. Los servicios ecosistémicos a evaluar fueron: 1) almacén de carbono, 2) calidad del hábitat, 3) producción de agua, 4) proporción de entrega de sedimentos y 5) calidad escénica. El almacén de carbono y la proporción de entrega de sedimentos, son indicadores de la calidad del suelo, así como indicadores su nivel de degradación. Por su parte, la calidad del hábitat ayuda a comprender, principalmente, el estado de la biodiversidad para la flora y fauna. En cuanto a la producción de agua, este servicio ecosistémico contribuye con el bienestar de la sociedad, mostrando las zonas con mayor o menor capacidad de recarga de agua. Por último, la calidad escénica, como se menciona en el Plan Municipal de Desarrollo 2018-2021, debido a las condiciones paisajísticas que presenta el centro de población, es un importante servicio ecosistémico por su capacidad para la recreación y riqueza de vistas.

9.3 Herramientas para la cuantificación de los servicios ecosistémicos

Para la integración, procesamiento y edición de los insumos cartográficos que requiere el programa InVEST se utilizó el programa ArcGis Pro. El ArcGis Pro, se empleó para llevar a un mismo nivel (área de estudio), los datos de entrada para el programa InVEST. El programa InVEST se utilizó para la valoración de los servicios ecosistémicos. InVEST, no es precisamente un programa para la edición

de datos cartográficos, sino más bien para el modelado a gran y pequeña escala de los servicios ecosistémicos (Hamel et al., 2015; Butsic et al., 2017).

9.4 Trabajo en campo

Mediante la creación de cuadrantes se seleccionó la muestra para el trabajo en campo. La unidad de muestreo, es la cuenca, la cual fue de utilidad para el diseño (Ilustración 3). Esta muestra se basó en un muestreo aleatorio por categoría o cobertura de suelo/uso de suelo, considerando las distintas geoformas de las ANVA y PEP. Los estratos se definen mediante la clasificación del mapa (coberturas de suelo/usos de suelo) y se asigna un tamaño de muestra proporcional al área o superficie de la cobertura de suelo.

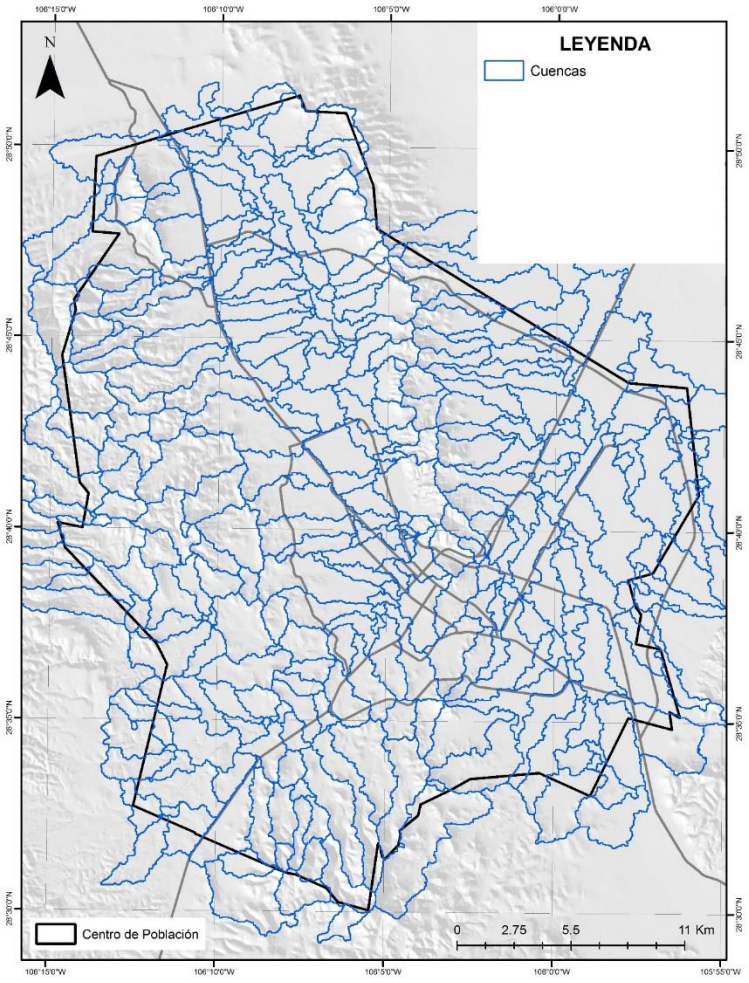


Ilustración 3. Ejemplificación de unidades territoriales de estudio (cuenca) para el diseño de muestreo. Fuente: Elaboración propia.

Los sitios de muestreo fueron de forma lineal sin compensación de pendiente, siguiendo gradientes orográficos cima-valle (Ilustración 4).

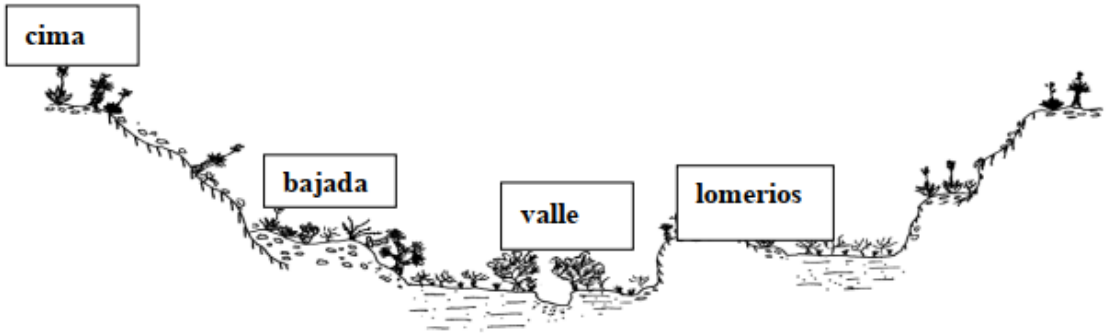


Ilustración 4. Ejemplo de perfil topográfico. Fuente: Martinez-Salvador et al., 2015.

Para el trabajo en campo se llevaron a cabo las siguientes actividades

- Medición de biomasa aérea en los estratos de hojarasca, mantillo, hierbas-arbustos y/o árboles.
- Identificarán con GPS de los sitios de muestreo, producto del diseño de muestreo.
- En los sitios de muestreo se llevó a cabo la medición de altura y ancho de las especies encontradas.
- Se llevo a cabo el corte, almacenado y etiquetado de la biomasa.

9.4.1 Mediciones en arbustos

Comprender el funcionamiento de los ecosistemas es uno de los objetivos en materia de monitoreo ambiental, lo que requiere de la medición de la dinámica de la biomasa de las plantas. Se necesitan métodos rápidos para hacer estas estimaciones de biomasa debido a la mano de obra y los gastos que implica la medición de la productividad y la necesidad de preservar el ecosistema. La medición de la biomasa vegetal, comúnmente requiere de una cosecha, un secado y un pesaje, que por lo general es referente a métodos de tipo destructivos. Este es un enfoque que consume grandes cantidades de tiempo, mano de obra y perturba el ecosistema. Por ello, las la medición de tipo destructiva no suele ser lo más adecuado, especialmente en zonas remotas, extensas o en sistemas donde las plantas son grandes (por ejemplo, matorrales, pastizales) (Pearce et al., 2010).

Un enfoque alternativo consiste en recopilar mediciones no destructivas de los atributos de las plantas (por ejemplo, la altura, las dimensiones del dosel, los

diámetros de los tallos) y relacionar estas mediciones con la biomasa con ecuaciones alométricas desarrolladas a partir de muestreos destructivos preexistentes, de plantas de diversas clases de tamaño. Estos enfoques alométricas son rápidos, razonablemente precisos y permiten realizar estimaciones no destructivas de la biomasa en áreas más grandes de lo posible con los métodos de cosecha (Ludwig et al.,1975).

Los cambios en la estructura y composición de la vegetación suelen ir acompañados de cambios en la biomasa. En muchos ecosistemas áridos, las plantas leñosas han aumentado de estatura y densidad durante el siglo pasado, particularmente en pastizales y matorrales. Aunque este fenómeno se ha observado ampliamente, hay poca información cuantitativa sobre la magnitud del cambio de la biomasa que acompañan a este cambio estructural.

En recientes evaluaciones de la industria del carbono el "espesamiento" de la vegetación leñosa en los ecosistemas forestales áridos y montañosos fue un sumidero de carbono potencialmente significativo, pero incierto. La reducción de la incertidumbre en estas estimaciones requiere la cuantificación del cambio en la biomasa del ecosistema que acompaña a los cambios hacia la dominación de las plantas leñosas dentro de las comunidades de plantas de las zonas áridas (Piao et al., 2007).

Para este proyecto se utilizarán las ecuaciones alométricas propuestas por Ludwig et al. (1975), las cuales se basan en la forma de la planta, su altura, diámetro de copa y tamaño de tallos.

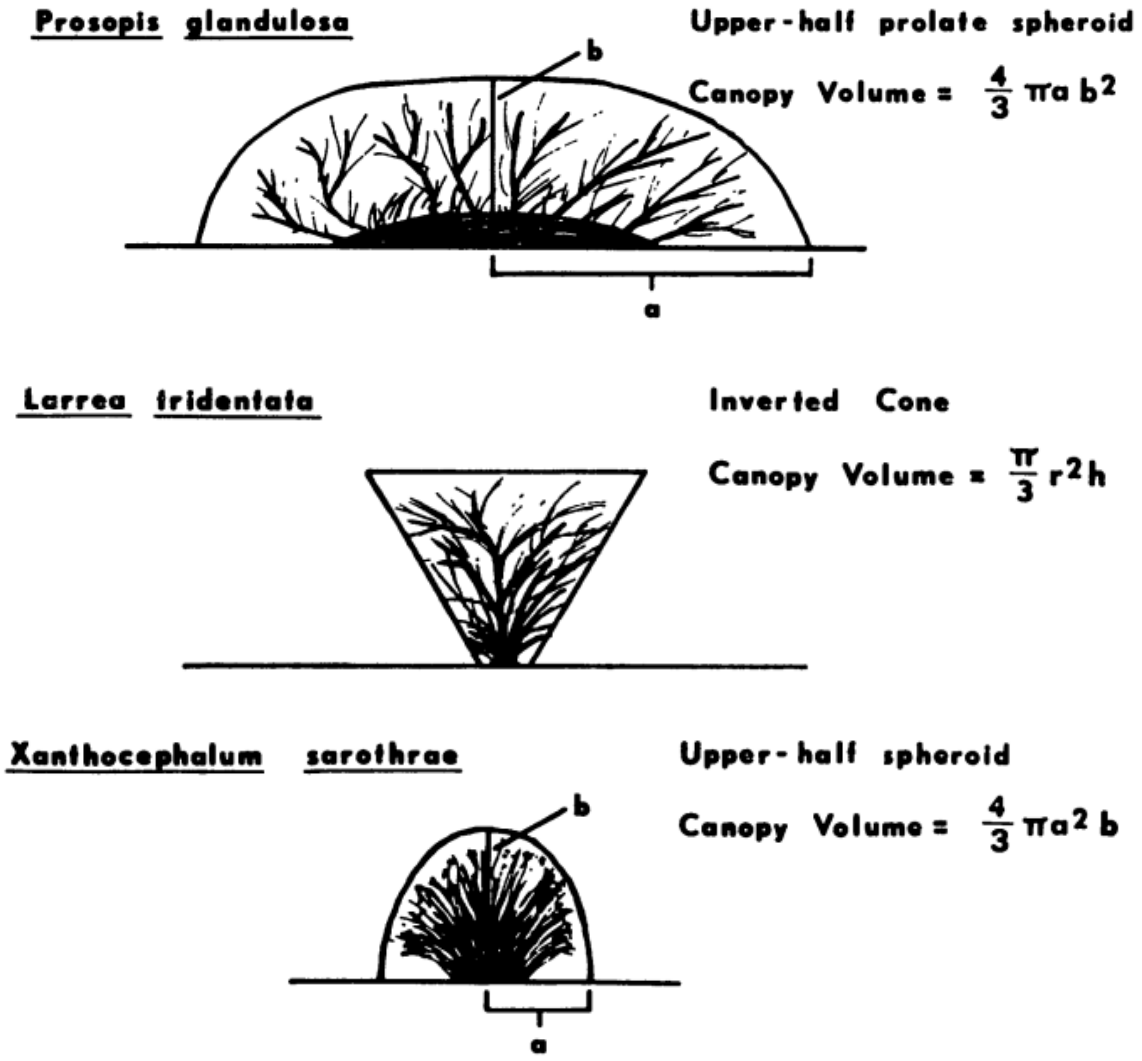


Ilustración 5. Ecuaciones alométricas propuestas por Ludwig et al. (1975) para la estimación de biomasa.

9.4.2 Vuelos con dron

Para complementar el recorrido y trabajo en campo, se utilizo un dron de multirotor, el DJI Phantom 4 Pro (Ilustración 6 y 7), compacto y ligero equipado con una cámara de 20 megapixeles. Ademas, de su cámara, el dron tiene un gimbal, que permite adquirir imágenes en distintas posiciones fuera del nadir. Esta característica es crucial para la toma de fotografías de edificaciones, infraestructura eléctrica, entre otros, desde distintas perspectivas. El dron se utilizó para hacer recorridos visuales desde una perspectiva elevada, en zonas de acceso remoto o

donde no era posible acceder por causa de cercos privados. Además, la captura de las fotografías aéreas permite visualizar otros elementos en el territorio, que desde el suelo son imperceptibles.



Ilustración 6. Dron DJI Phantom 4 Pro. Fuente: Sitio web DJI https://www.dji.com/mx/phantom-4-pro.



Ilustración 7. Vuelos con Dron DJI Phantom 4 Pro. Fuente: Sitio web DJI. Fuente: Elaboración propia.

9.5 Coberturas de suelo/uso de suelo

Uno de los insumos más importantes para la estimación de los servicios ecosistémicos es el mapa de cobertura de suelo/uso de suelo. Para su generación se utilizaron dos escenas. La primera corresponde al sensor Landsat Tematic Mapper (TM) 5 y la segunda al sensor Landsat Operational Land Imager (OLI) 8. Ambas con Path 33-Row 41, en formato ráster[1], con una resolución espacial de 30 m x 30 m por celda. Las escenas corresponden al año 2010 (Landsat TM5) y 2020 (Landsat OLI 8) y fueron adquiridas libres de nubosidad. Las escenas se descargaron del Servicio Geológico de los Estados Unidos (https://glovis.usgs.gov/). Las escenas se componen de 7 bandas espectrales Landsat TM5 y 8 bandas espectrales para Landsat OLI 8.

En el caso de Landsat TM5, este se encuentra equipado con las bandas 1 (0.45-0.52 µm), banda 2 (0.52-0.60 µm), la banda 3 (0.63-0.69 µm), las cuales corresponden al espectro visible. También está equipado con las bandas 4 (0.76-0.90 µm), banda 5 (1.55-1.75 µm), y banda 7 (2.08-2.35 µm), que corresponden al espectro infrarrojo (Lillesand et al., 2015). Por su parte, Landsat OLI 8, se encuentra equipado con las bandas 2 (0,45-0,51 µm), banda 3 (0,53-0,59 µm), la banda 4 (0,64-0,67 µm), las cuales corresponden al espectro visible. También está equipado con las bandas 5 (0,85-0,88 µm), banda 6 (1,57-1,65 µm), y banda 7 (2,11-2,29 µm), que corresponden al espectro infrarrojo (USGS, 2020). El sensor, se encuentra equipado con otras bandas, sin embargo y para efectos de este proyecto no son de utilidad.

9.5.1 Procesamiento de las bandas espectrales

Las escenas fueron corregidas radiométricamente. La conversión de los números digitales (DN) a los valores de reflectancia se realizó con el método de Dark Object Substract 1 (DOS1), método propuesto por Chavez (1988), que se basa en las propiedades de la imagen y es el método más utilizado. Elementos como el agua, los bosques y las sombras se consideran objetos oscuros cuando sus valores

[1] Un archivo ráster está formado de una matriz de celdas (o píxeles) organizadas en filas y columnas (o una cuadrícula) en la que cada celda contiene un valor que representa información, como la temperatura, elevación, pendiente, entre otros. Este pixel o celda siempre tiene el mismo tamaño. Los rásters, pueden ser fotografías aéreas digitales, imágenes de satélite, imágenes de drones, imágenes digitales, mapas escaneados.

de reflectancia son cercanos a cero. Los objetos oscuros se detectan automáticamente cuando el valor de reflectancia de los píxeles es menor o igual al 1 %. Se supone que algunos píxeles de la imagen reciben el 0% de la radiación solar (100% de sombra), debido principalmente al efecto de la topografía, y el valor de las radiaciones correspondientes a estos píxeles registrados por el satélite corresponden a la dispersión atmosférica. Si se encuentra un objeto oscuro en la imagen, se le asigna el valor mínimo de reflectancia en el histograma. A partir de este mínimo, es posible corregir toda la escena por los efectos de la dispersión atmosférica. Para obtener la reflectancia de la superficie, se utiliza la ecuación siguiente:

$$\rho_{SUP} = \frac{d^2\ \pi\ (L_{TOA} - L_0)}{E_{TOA}\ cos\theta_i}$$

donde: *d* es la distancia directa al sol, L_{TOA} es la radiancia espectral al satélite, L_0 es el brillo de retrodispersión a través de la atmósfera, E_{TOA} es la radiancia espectral solar en una superficie perpendicular a los rayos del sol fuera de la atmósfera, y θ_i es el ángulo del cenit solar. La corrección radiométrica se llevó a cabo con el plugin de Clasificación Semi-Automática desarrollado por Congedo (2017) e incluido en el software QGis (v.2.18).

9.5.2 Combinación de bandas e indicadores espaciales

Para el proceso de clasificación supervisada (paso posterior) se aplicó la combinación para el sensor Landsat TM5 el cual correspondió a las bandas 5, 4 y 3, donde la banda 5 corresponde al canal del infrarrojo medio 5 (1.55-1.75 µm), la banda 4 al canal del infrarrojo cercano (0.76-0.90 µm) y la banda 3 al canal rojo (0.63-0.69 µm) (Lillesan et al., 2015) (Ilustración 8). Por su parte, para el sensor Landsat OLI8 la combinación de bandas correspondió a las bandas 6, 5 y 4, donde la banda 6 corresponde al canal del infrarrojo medio (1.55-1.65 µm), la banda 5 al canal del infrarrojo cercano (0.85-0.88 µm) y la banda 4 al canal rojo (0.64-0.67 µm) (USGS, 2020) (Ilustración 9).

Adicional a la combinación de bandas, se integraron algunos indicadores espaciales. Algunos de estos indicadores son: el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI, por sus siglas en ingles), el cual es de utilidad para conocer el

estatus/actividad fotosintética de la vegetación. Otros índices, como la proximidad a la mancha urbana, las principales vías de comunicación, entre otros, ayudan determinar el nivel de antropización del centro de población. Estos índices son de ayuda para la generación de las cubiertas de suelo/usos de suelo y ha sido implementados en previos estudios, adicionalmente a las bandas espectrales, las cuales son utilizadas comúnmente (Rodríguez-Galiano et al., 2012a; Ruíz-Hernandez y Shi, 2018).

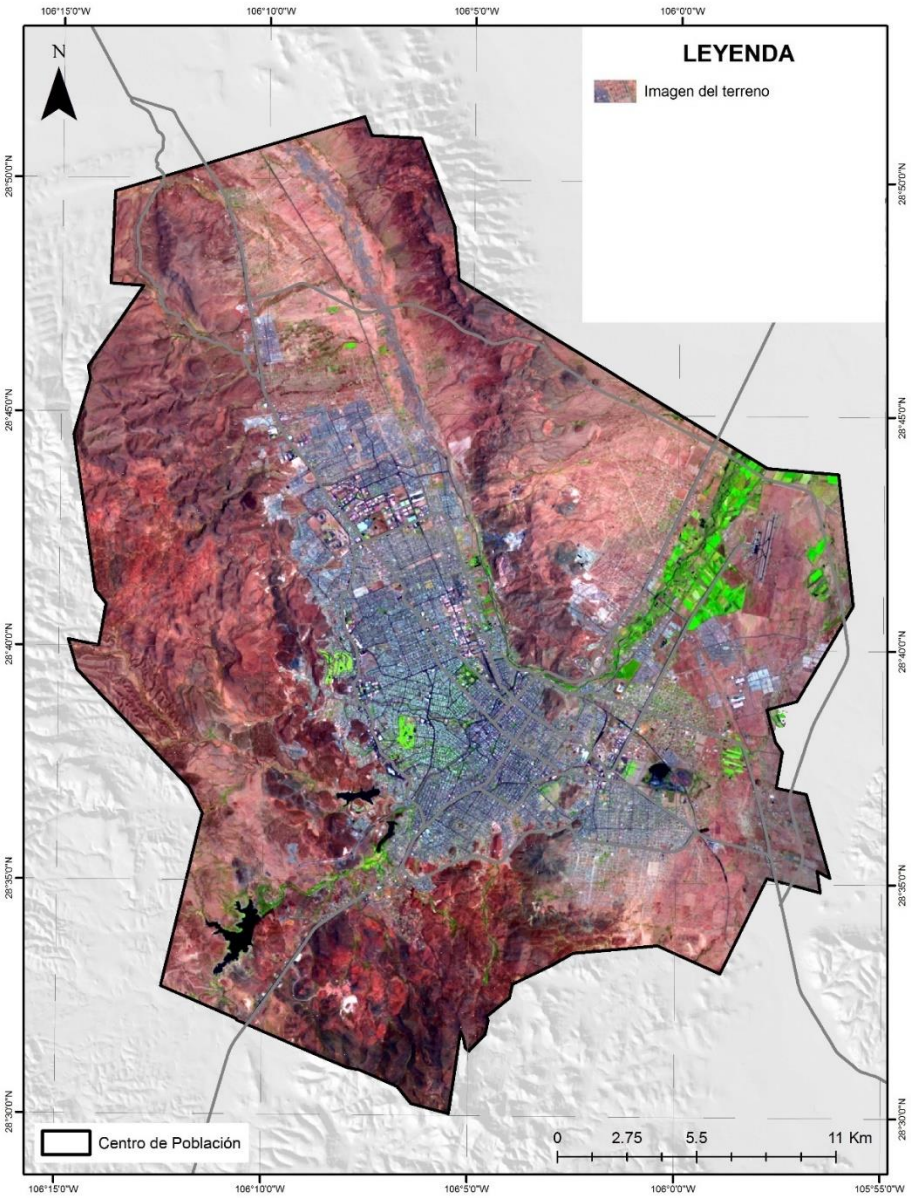


Ilustración 8. Composición en falso color de la escena Landsat en 2010. Fuente: Elaboración propia

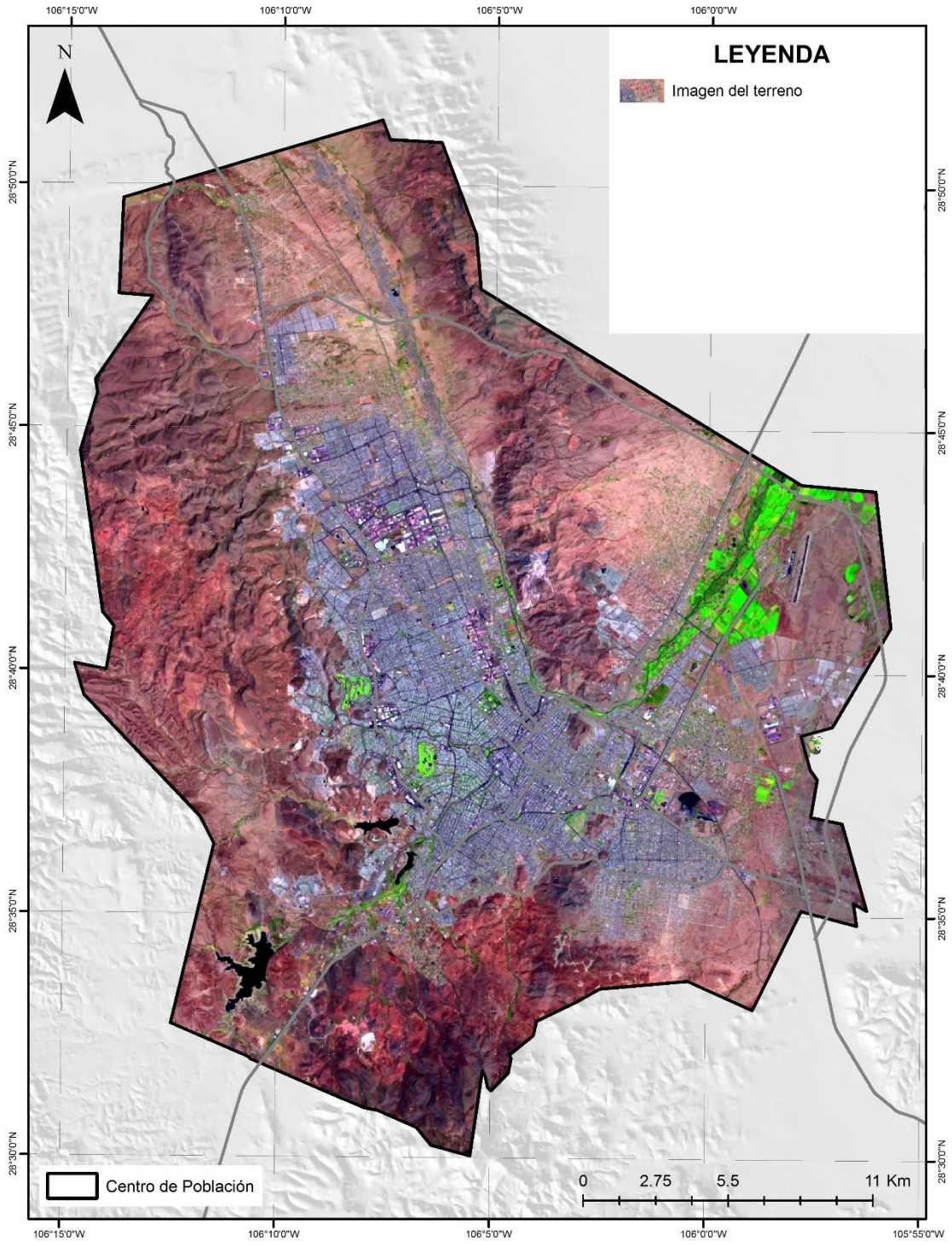


Ilustración 9. Composición en falso color de la escena Landsat en 2020. Fuente: Elaboración propia

9.5.3 Clasificación supervisada de la imagen

La clasificación supervisada para las composiciones del 2010 y 2020 se realizó utilizando el método de aprendizaje automatico Random Forest (RF). El método RF se ejecutó utilizando el paquete *superClass* en el programa estadístico R, versión 3.4.2 (R Core Team, 2017). En este programa de libre uso, utiliza paquetes que incorporan procesos geoespaciales, que permiten generar clasificaciones con un contexto espacial. El rendimiento de RF se ha empleado en varios estudios para la determinación de mapas de cobertura de suelo/uso de suelo (Rodriguez-Galiano et al., 2012b; Adam et al., 2014). Esta clasificación, requiere de datos de entrenamiento, para esto, se utilizó la información de campo, así como la interpretación visual de las coberturas de suelo/uso de suelo sobre las composiciones de color. Las imágenes se clasificaron en nueves clases de cobertura de suelo/uso de suelo, las cuales fueron: bosques, matorrales, pastizales, cultivos, vegetación ribereña, vegetación dispersa, áreas sin vegetación aparente, áreas urbanas y cuerpos de agua (Ilustración 10 y 11).

.

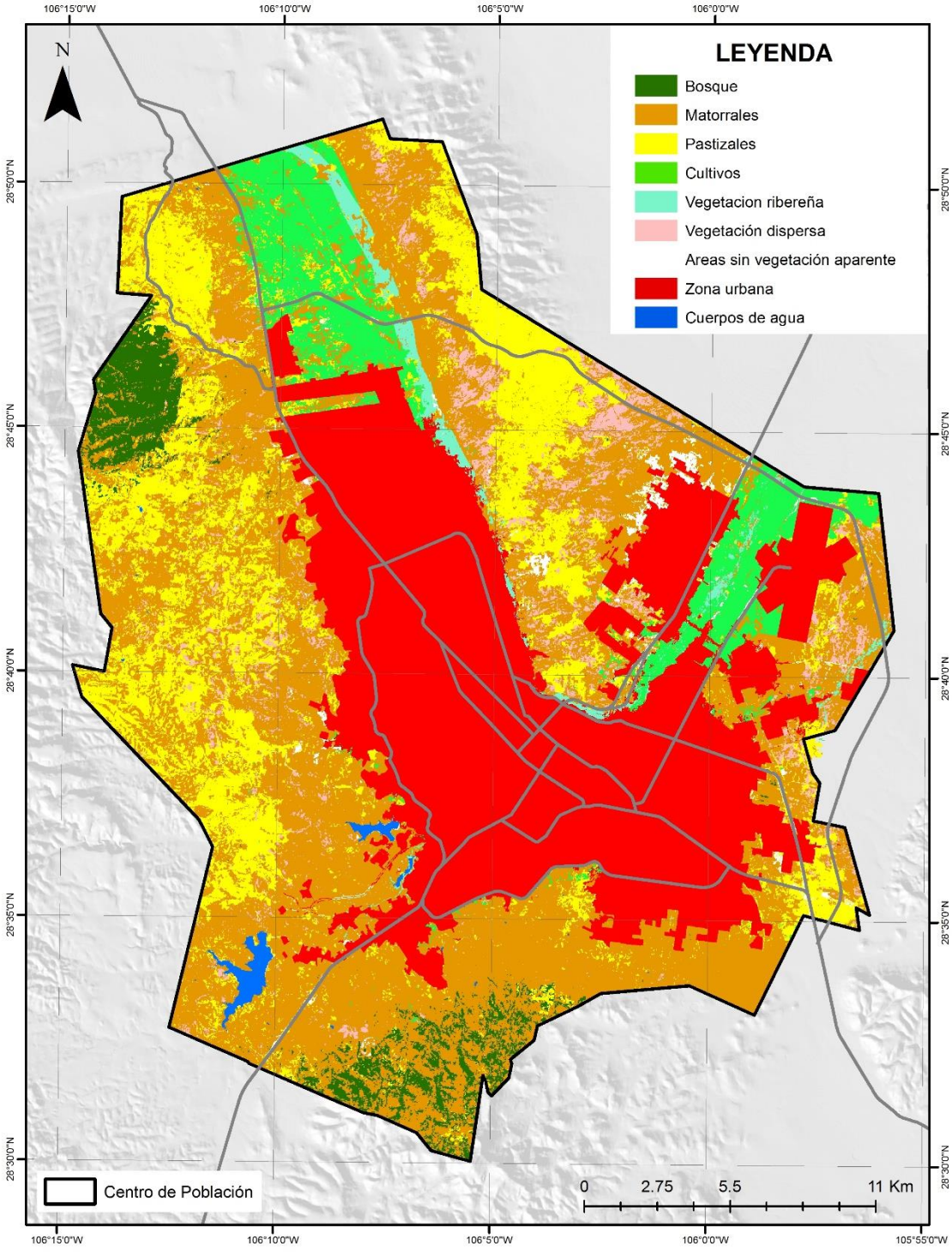


Ilustración 10. Cobertura de suelo/uso de suelo del 2010. Fuente: Elaboración propia

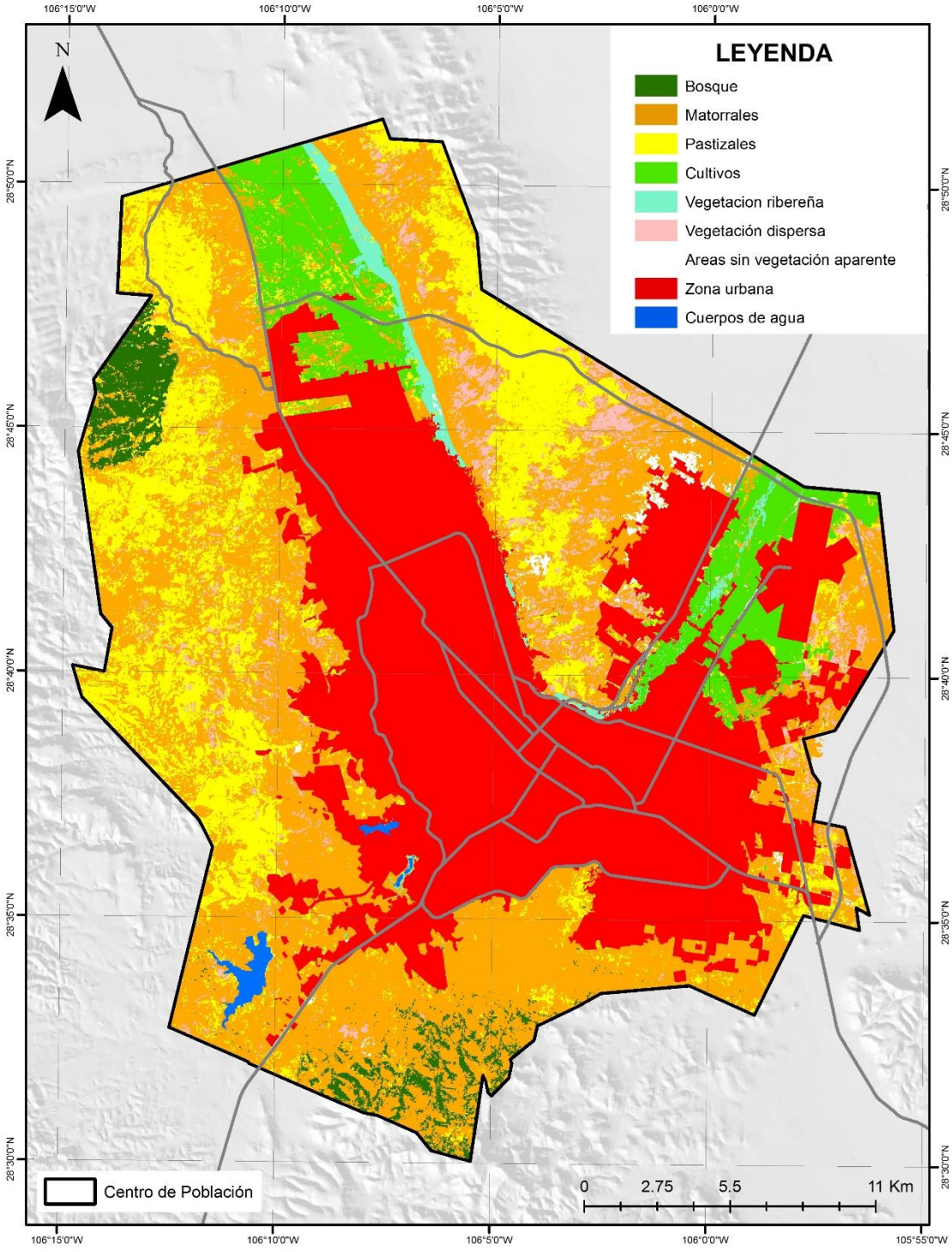


Ilustración 11. Cobertura de suelo/uso de suelo del 2020. Fuente: Elaboración propia

9.6 Almacenamiento de Carbono

El módulo de almacenamiento de carbono del programa InVEST es de utilidad para cuantificar la cantidad de almacenamiento y secuestro de carbono basado en cuatro almacenes, los cuales son la biomasa aérea (hojas, ramas), biomasa bajo la tierra (raíces), biomasa en el suelo (biomasa entre la superficie y las raices) y materia orgánica muerta (biomasa muerto). Estos almacenes y el mapa de cobertura de suelo/uso de suelo de 2020, se utilizaron como datos de entrada para estimar el almacenamiento de carbono total en cada celda o pixel (Sharp et al., 2018). El carbono de cada almacén, se anexo a cada tipo de cobertura de suelo/uso de suelo para estimar el almacenamiento de carbono total en el área del centro de población. El almacén de carbono total puede calcularse como:

$$C_t = A \times (B_{aereo} + B_{subterrena} + B_{muerta} + B_{suelo})$$

donde: C_t = Almacén total de carbono, B_{aereo}, $B_{subterranea}$, B_{muerta} y B_{suelo}, corresponden a la biomasa aérea, biomasa subterránea, biomasa muerta y biomasa en el suelo, respectivamente, mientras que *A* es el área actual en cada celda o pixel del mapa de cobertura de suelo/uso de suelo en hectáreas. Las unidades para cada uno de los almacenes de carbono (B_{aereo}, $B_{subterranea}$, B_{muerta} y B_{suelo}) son toneladas por hectárea (ton/ha) por pixel.

Los insumos necesarios para el módulo de almacenamiento de carbono son:

1. Mapa de cobertura de suelo/uso de suelo.
2. Tabla biofísica

Los datos de carbono utilizados para relaciónalos con las coberturas de suelo/uso de suelo fueron obtenidos del trabajo en campo y se incluyeron en la tabla biofísica.

Para obtener el valor de la tonelada de carbono secuestrada en dólares por tonelada métrica de carbono se utilizaron dos precios, 50 y 100 dlls, acorde a lo mencionado por Petrolog (2020). Por otra parte, también se debe añadir un valor de tasa de descuento del mercado. El valor de la tasa de descuento sugerido es del 7% anual, el cual es una tasa de descuento recomendada por el mercado americano, para la evaluación del costo beneficio de los proyectos ambientales

(Sharp et al., 2018; Petrolog, 2020). Finalmente, es necesario considerar una tasa de variación anual del precio del carbono. Sharp et al. (2018), menciona que fijar esta tasa en un valor mayor al 0% sugiere que el valor social del carbono secuestrado en el futuro será menor que el carbono secuestrado actual. Para este caso, se utilizará una tasa anual del 3%, bajo el supuesto de que el carbono almacenado en el futuro será menor que el actual.

9.7 Calidad del hábitat

El impacto de las actividades humanas en el uso de suelo contribuye a la disminución de la biodiversidad. Algunas de estas actividades, son la deforestación, fragmentación del hábitat, causadas por la conversión de los usos de suelo y la intensificación de expansión urbana (Terrado et al., 2016). Para lograr la preservación de la biodiversidad es necesario proteger la calidad del hábitat. El desarrollo de los caminos, los asentamientos humanos, ya sean urbanos, semiurbanos, rurales, son impulsores de la degradación del hábitat. Varios estudios han demostrado el impacto negativo de estos impulsores, los cuales promueven la pérdida del hábitat debido a su conversión (He et al., 2017; Li et al., 2018).

El modelo de calidad del hábitat de InVEST, es una herramienta útil para describir espacialmente la sensibilidad del hábitat a las amenazas, principalmente de carácter antropogénico. Este modelo, ayudó a evaluar la distribución espacial de la calidad del hábitat a través de las diferentes coberturas de suelo/usos de suelo o hábitats (Sharp et al., 2018). Los cuatro insumos necesarios para el modelo InVEST son:

1. Mapa de cobertura de suelo/uso de suelo
2. Mapas de amenazas
3. Tabla de sensibilidad
4. Tabla de amenazas

Las amenazas utilizadas para este módulo corresponden a: 1) área urbana (Ilustración 12), 2) localidades dentro del centro de población (Ilustración 13) y 3) red vial (Ilustración 14), las cuales son las más recurrentes en las cercanías a las áreas urbanas (Czech et al., 2000). En la tabla de sensibilidad, se definen las clases de cobertura de suelo/uso de suelo utilizando un sistema binario en el que valores

próximos al cero corresponden a una cobertura de suelo no natural (por ej., asentamientos humanos) y valores cercanos al uno corresponden a coberturas del suelo con vegetación natural (por ej. bosque, matorral).

Por otro lado, se define la sensibilidad o ponderación de las amenazas sobre cada uno de las coberturas de suelo/uso de suelo. Este valor, también tiene un rango de entre 0 y 1, mientras más cercano a 0, el uso de suelo y vegetación es menos sensible a la amenaza, de lo contrario mientras más se acerca al 1 es mayor la sensibilidad a la amenaza.

Para la tabla de amenazas, el modelo de calidad de hábitat considera la distancia, medida en kilómetros entre la fuente de la amenaza y la cobertura de suelo/uso de suelo. La intensidad del impacto en la calidad del hábitat causada por una amenaza específica disminuye con la distancia de acuerdo con una función exponencial o lineal decreciente. Es decir, si se utiliza una función lineal, se considera que la amenaza cuenta con una tasa de cambio constante, mientras que una función lineal, expresaría una tasa de cambio que se va multiplicando. Las distancias y lo pesos de las amenazas fueron definidos de acuerdo a la cercanía y distribución de estas, en apoyo de la literatura (Sulistyawan et al., 2017; Sun et al., 2019; Kija et al., 2020).

La superficie de estas amenazas, con respecto al centro de población fue de 21327.20 para las zonas de influencia de las localidades, 10086.61 ha para el área de influencia de los caminos, y 27348.03 hectáreas para la zona urbana.

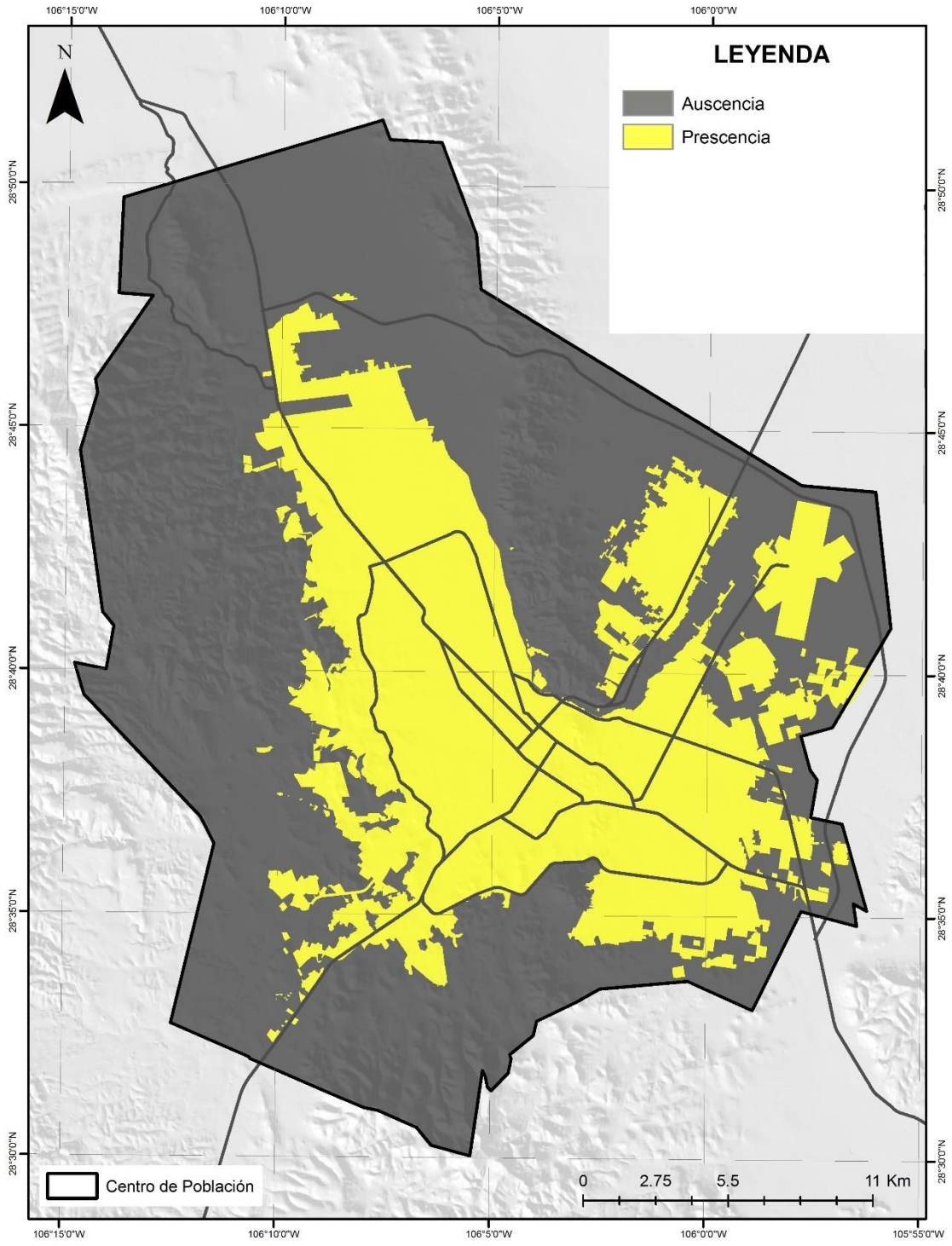


Ilustración 12. Área urbana en 2020. Fuente: IMPLAN, 2020.

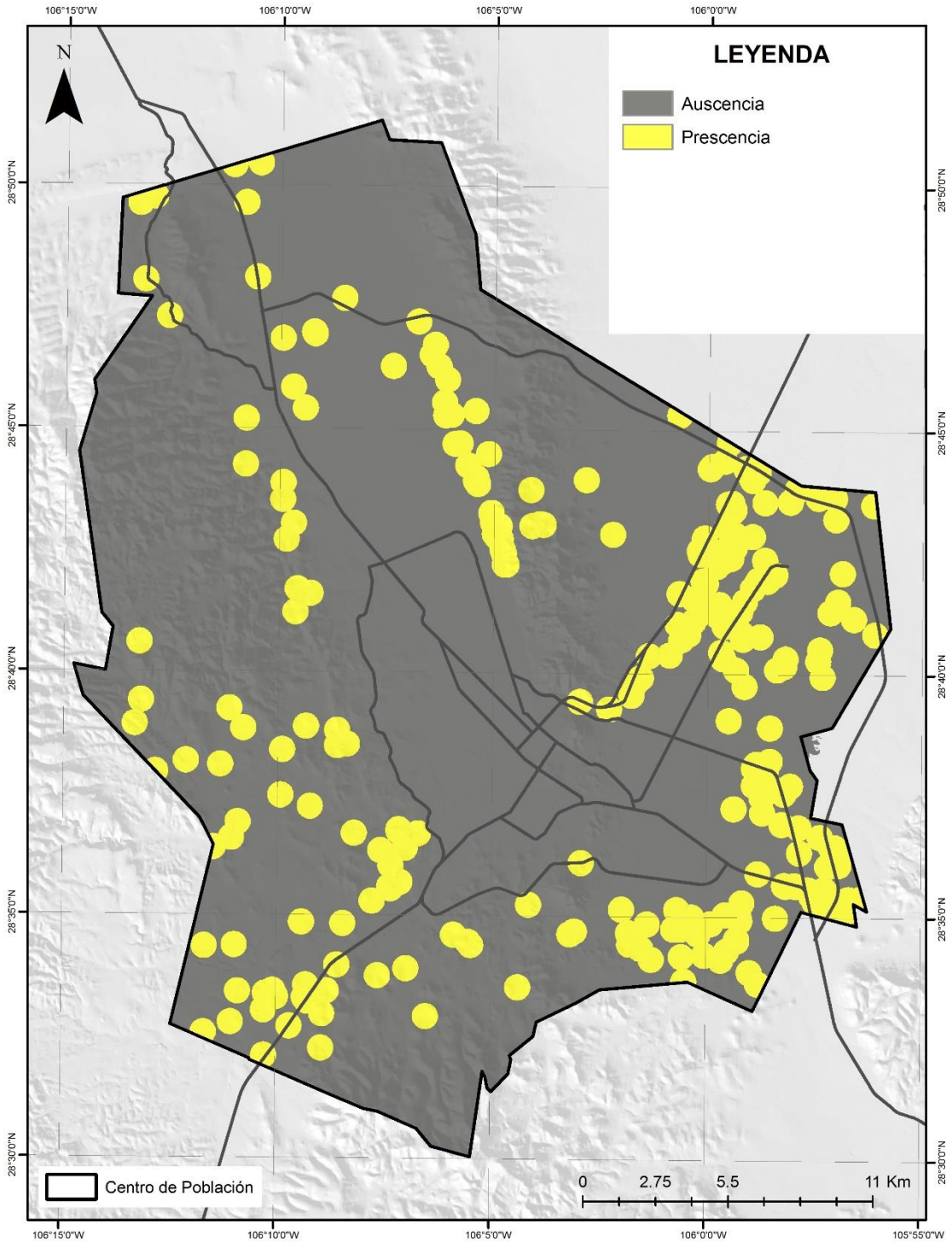


Ilustración 13. Localidades rurales en el centro de población. Fuente: INEGI, 2018.

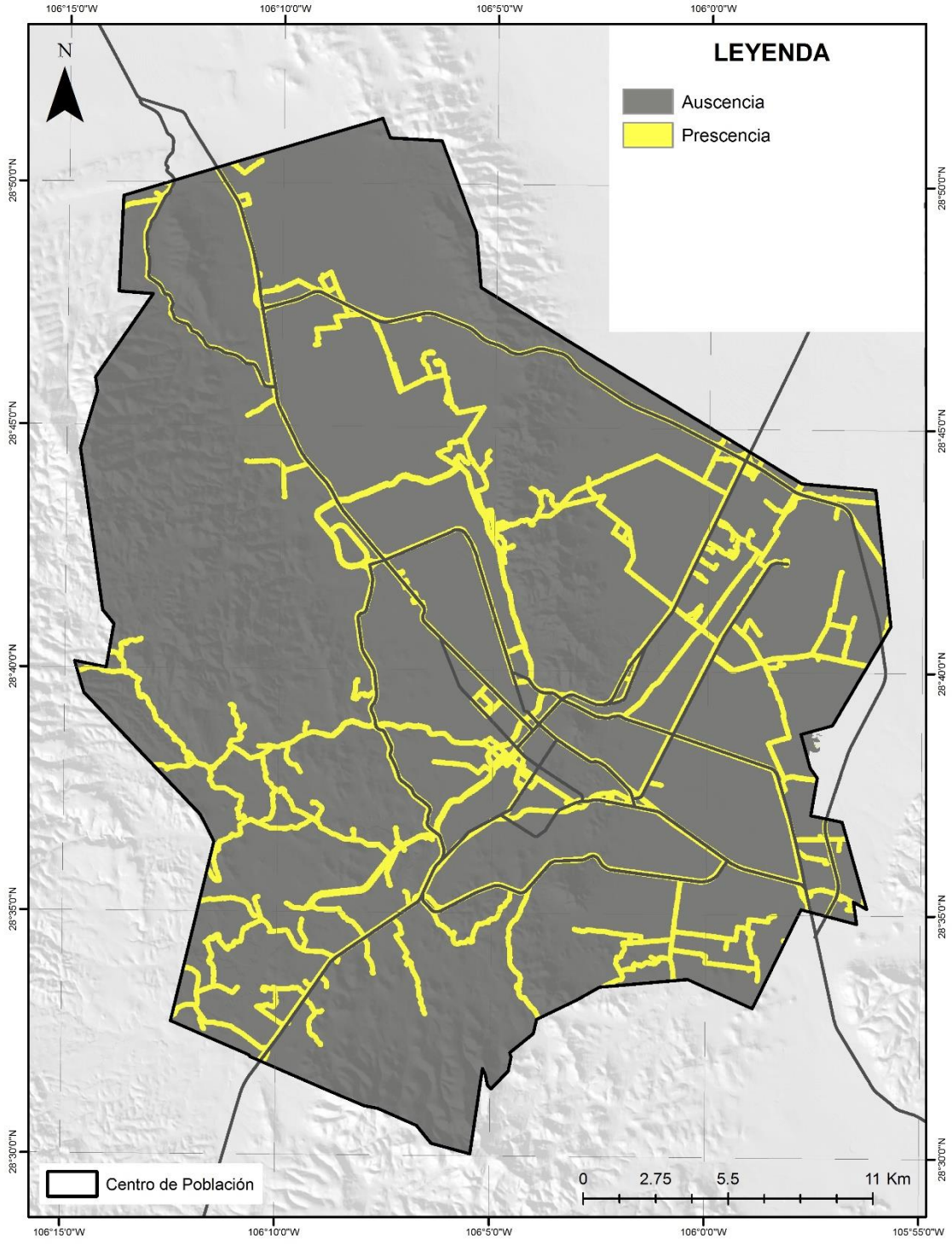


Ilustración 14. Red vial del centro de población. IMPLAN, 2016; INEGI, 2019.

9.8 Producción de agua

Las ANVA y PEP brindan funciones importantes, incluidas la conservación natural, la mitigación de desastres, suministro de agua y la recreación. Tanto la producción de agua como el almacenamiento de esta mismas, además de la prevención de la pérdida de suelo, son modificadas por los cambios en la cobertura vegetal y el clima.

El módulo de producción de agua de InVEST se utilizó para estimar el suministro de agua que provee el sistema natural de drenajes. Para englobar la capacidad de producción de agua de este sistema de drenajes se utilizó la cuenca. El modelo estima el rendimiento anual total de agua para cada pixel del área de estudio, basado en datos de cobertura de suelo/uso de suelo, precipitación, evapotranspiración, principalmente. La cantidad de producción de agua, es calculada a partir de cada píxel de los insumos mencionados anteriormente. Este modelo, sigue la función de precipitación anual promedio de la curva de Budyko (Gentine et al., 2012).

Los ocho insumos necesarios para el modelo producción de agua son los siguientes:

1. Precipitación anual
2. Evapotranspiración
3. Capa de restricción de profundidad de raíz
4. Contenido de agua disponible de la planta (PAWC, por sus siglas en ingles)
5. Cobertura de suelo/uso de suelo
6. Cuencas hidrográficas
7. Subcuencas hidrográficas
8. Tabla biofísica
9. Factor de estacionalidad (Z)

La precipitación fue obtenida del rango de valores de precipitación de un conjunto de 15 estaciones meteorológicas provistas por el servicio Global Weather Data for SWAT (https://globalweather.tamu.edu/) con periodicidad de 1979 a 2014 (Ilustración 15). El mapa de precipitación fue construido a partir del método de interpolación de distancia inversa ponderada (IDW, por sus siglas en ingles) en

formato ráster con una resolución de 14.73 m por celda o pixel. El método IDW utiliza los valores existentes que se encuentran alrededor del área de la estación para estimar la distribución de las superficies sin estaciones. Los valores de las estaciones más cercanas tendrán una mayor influencia que los que están más lejos, es decir, la influencia disminuye con la distancia (Moreno, 2008). El mapa de precipitación mediante el método IDW se obtuvo mediante la ecuación 2.

$$Z(S_o) = \sum_{i=1}^{N} \lambda \times Z(S_i) \qquad 2$$

donde: $Z(S_0)$ es el valor a estimar en el lugar, N es el número de estaciones cercanas al lugar a estimar, λ corresponde al peso asignado a cada observación a utilizar, disminuye con la distancia, y $Z(S_i)$ es el valor observado de la estación.

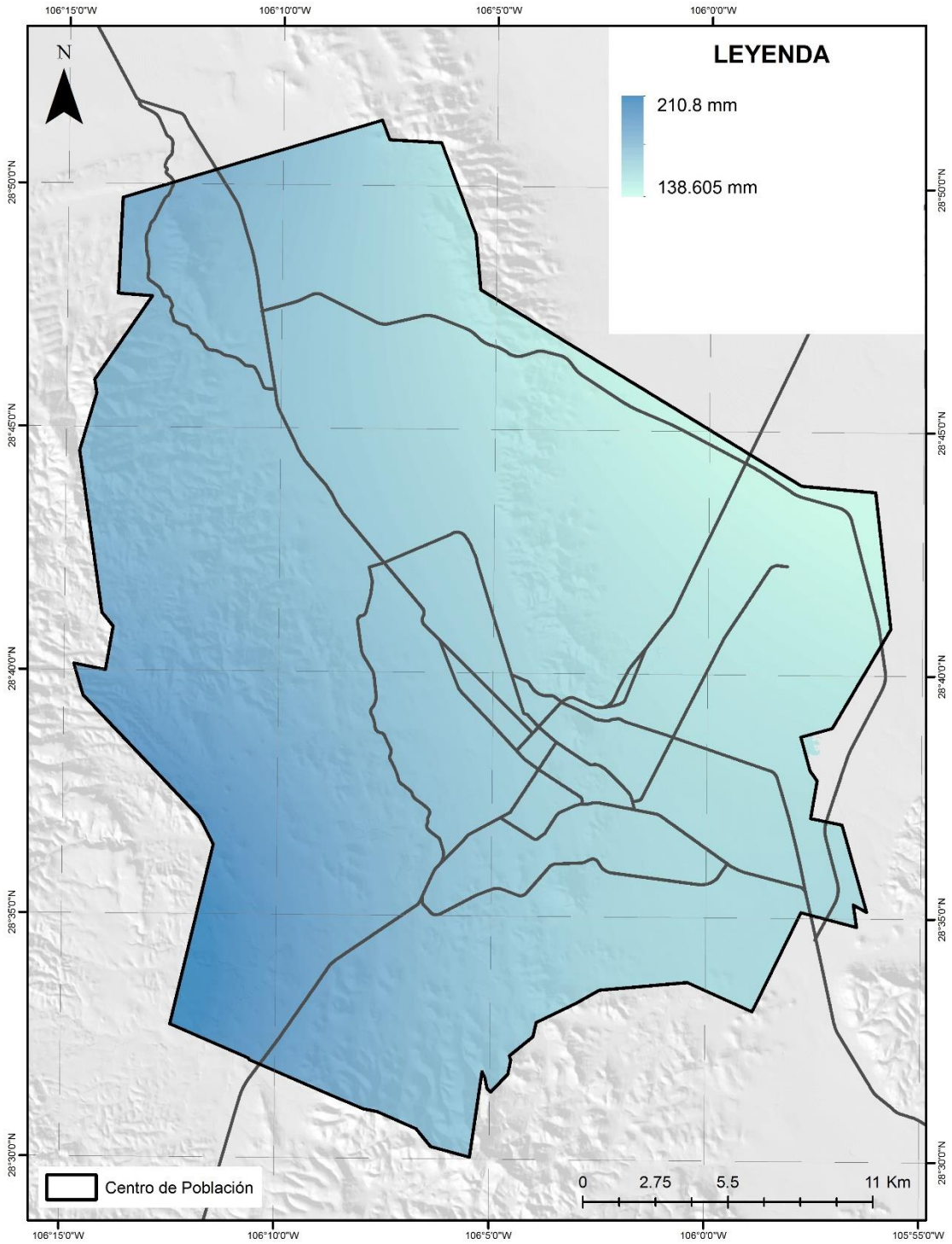


Ilustración 15. Precipitación media anual del periodo 1979 a 2014. Fuente: Elaboración propia con datos de Global Weather Data for SWAT (https://globalweather.tamu.edu/)

La evapotranspiración (Ilustración 16) fue estimada con el método de Turc (1954), utilizando las mismas estaciones meteorológicas anteriores. Para obtener la evapotranspiración se utilizaron las ecuaciones 3 y 4.

$$ET = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \left(\frac{P^2}{L^2}\right)}} \qquad 3$$

$$L = 300 + 25\,T + 0.05T^2 \qquad 4$$

donde: *ET* es la evapotranspiración en milímetros, *P* es la precipitación media anual en milímetros, *L* es una función de *T*, *T* es la temperatura media anual. Esta capa también se construyó con el método IDW en formato ráster con una resolución de 14.73 m por celda.

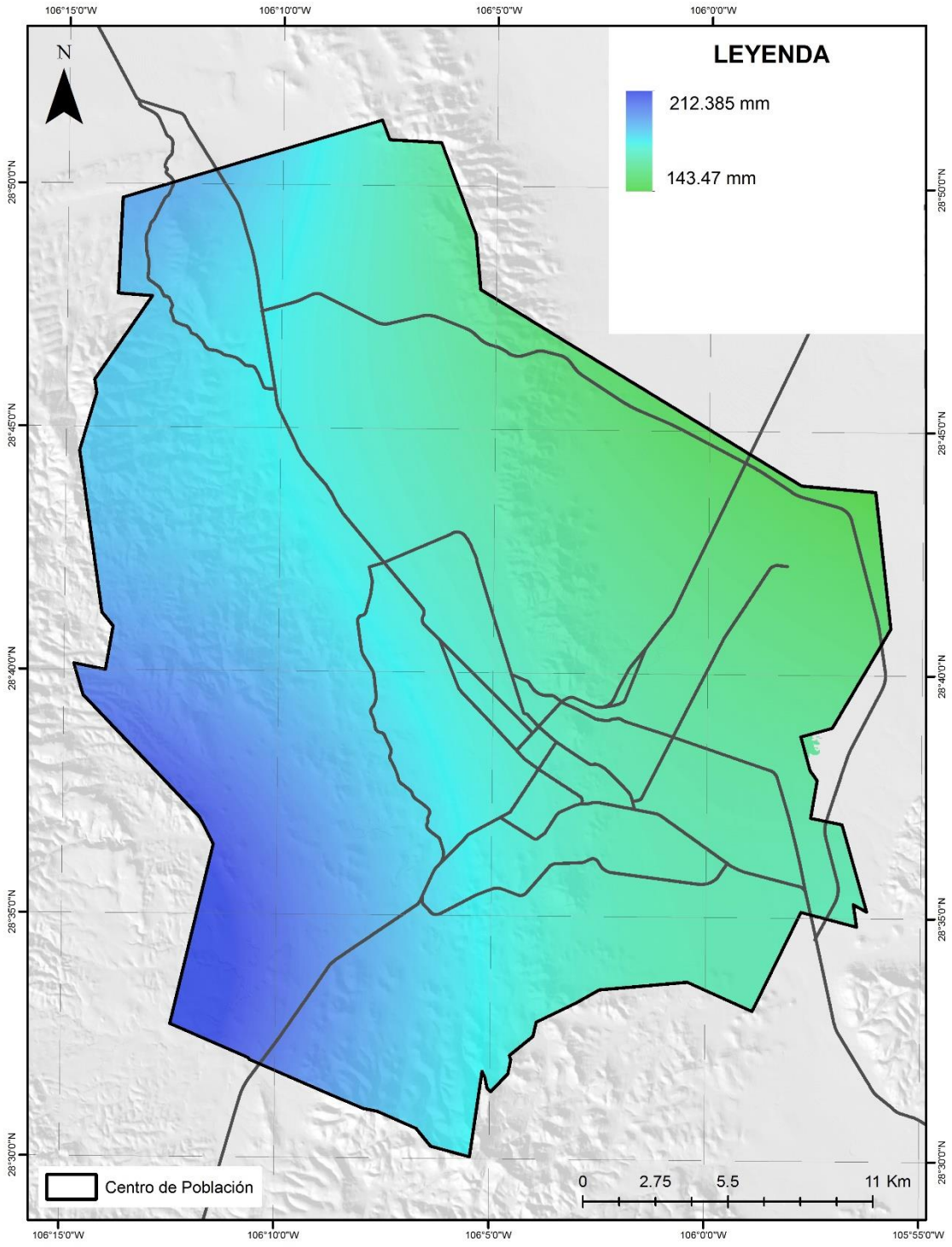


Ilustración 16. Evapotranspiración. Fuente: Elaboración propia.

La capa de restricción de profundidad a raíz (PAWC) se define como el contenido de agua disponible para la vegetación (Ilustración 17). También, este se

entiende como la diferencia entre la fracción de la capacidad del campo volumétrico y el punto de marchitez permanente. Esta fracción de la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente se relaciona con la porosidad del suelo y sus propiedades (arcilla, limo y arena). Para este insumo, se utilizaron los datos sugeridos por la guía InVEST (Sharp et al., 2018).

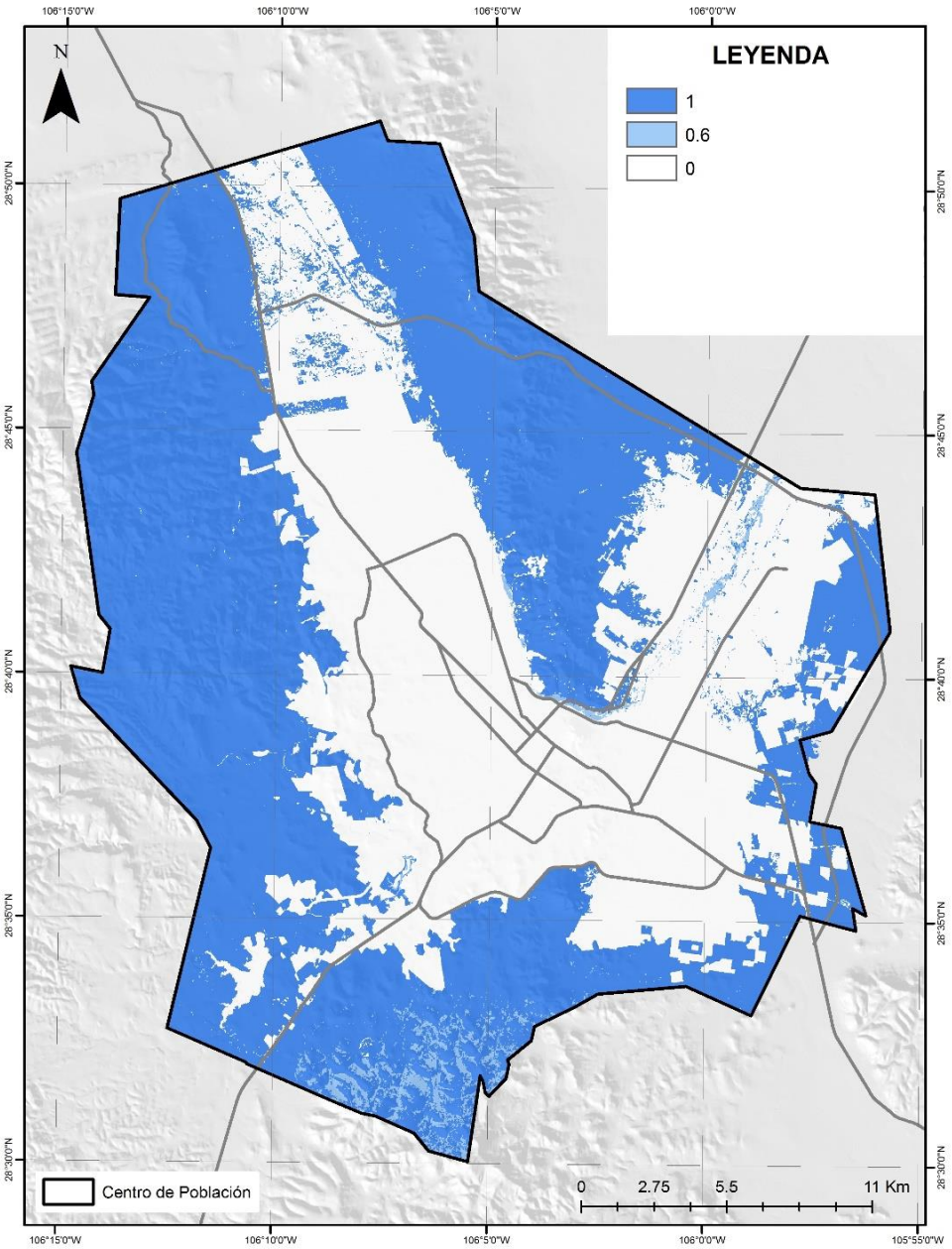


Ilustración 17. Capa de restricción de profundidad a raíz (PAWC). Fuente: Elaboración propia

Las cuencas (Ilustración 18) y subcuencas (Ilustración 19) fueron obtenidas con el programa Global Mapper.

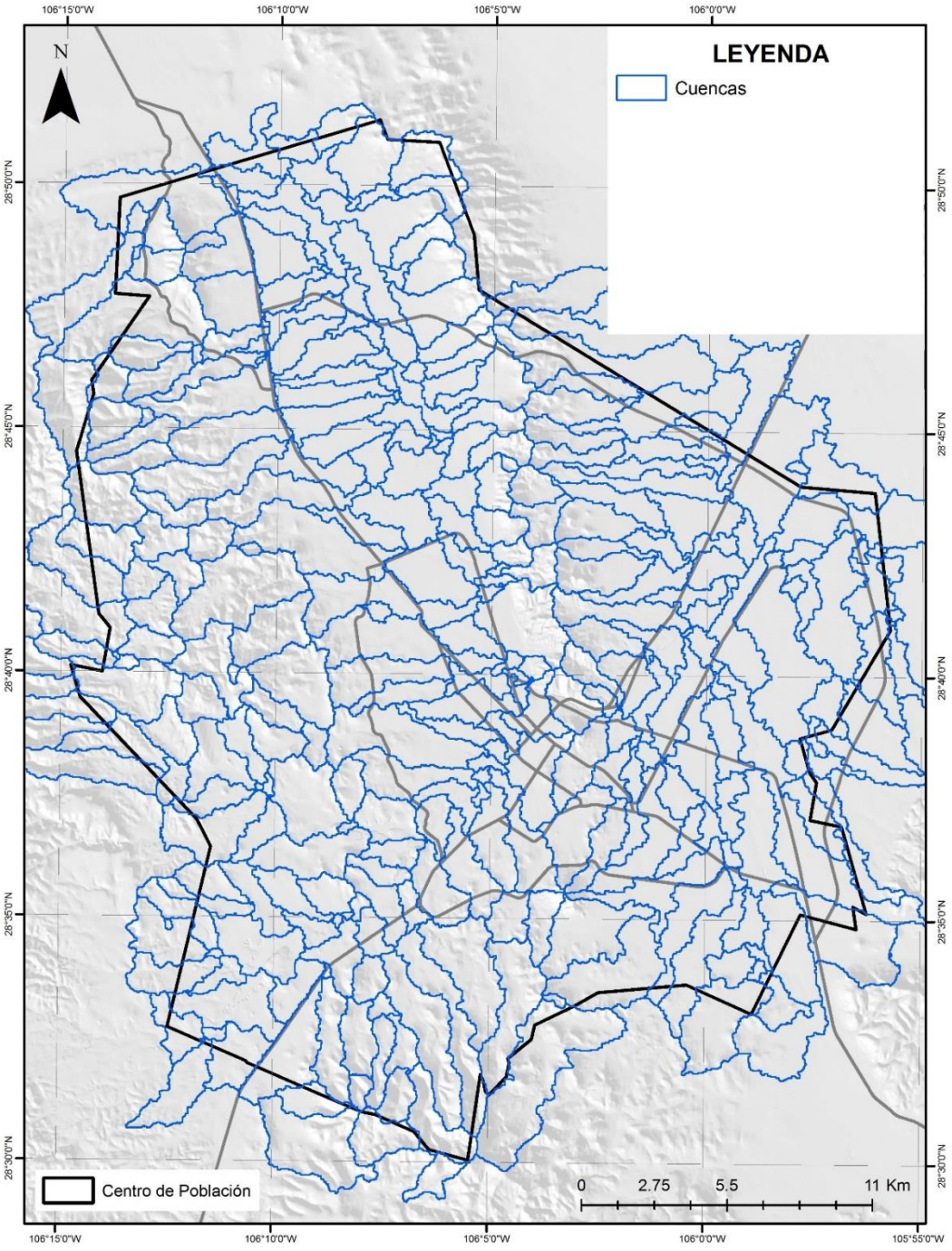


Ilustración 18. Cuencas. Fuente: Elaboración propia

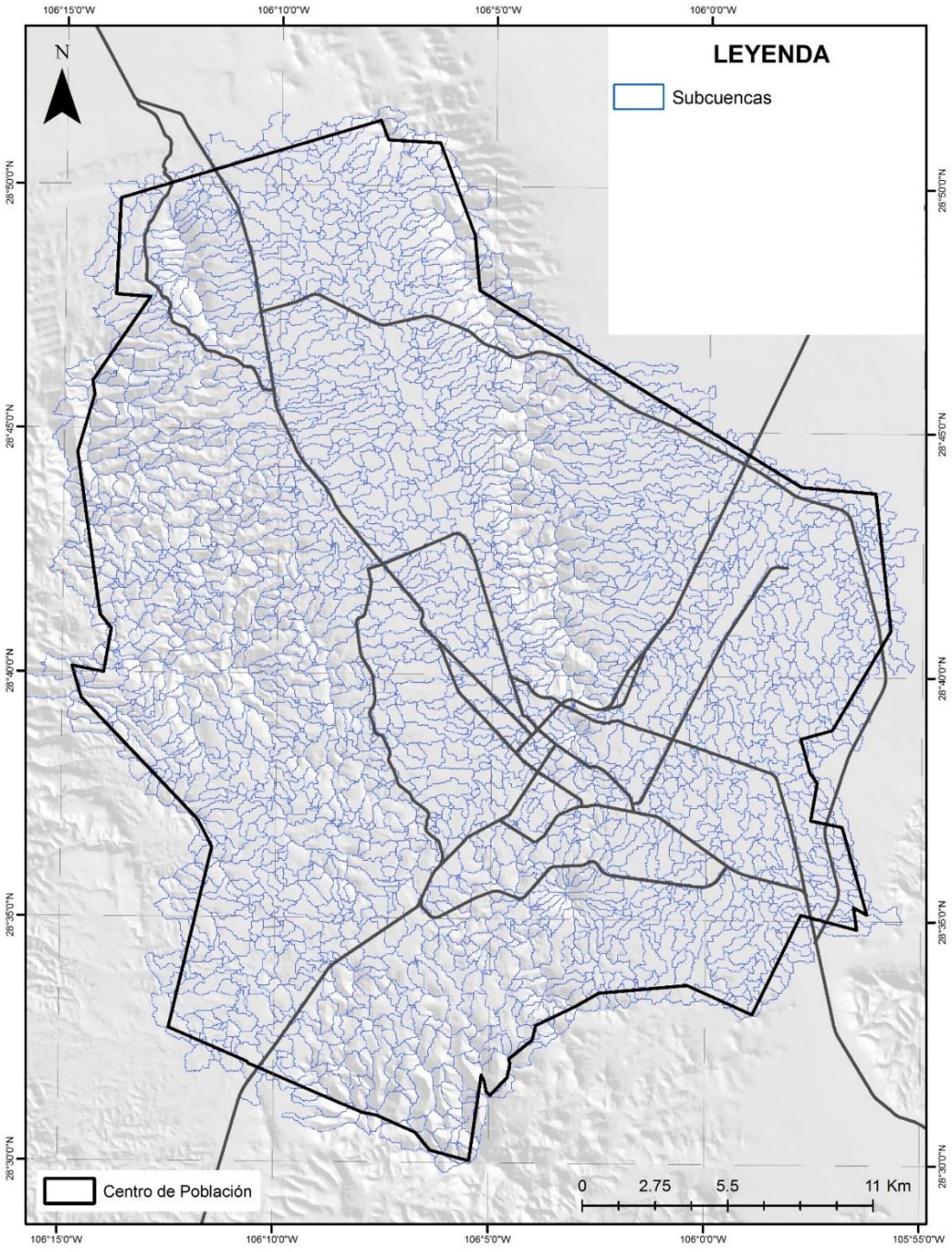


Ilustración 19. Subcuencas. Fuente: Elaboración propia

La profundidad máxima de la raíz (de las coberturas de suelo/uso de suelo), medido en milímetros se muestra en la Ilustración 20. Esta profundidad de raíz, es la restricción a la cual la raíz de la planta podría llegar, debido a las características

de la cobertura de suelo/uso de suelo. Los datos de entrada para esta variable se adecuaron según la guía del usuario y el formulario de datos de muestra proporcionado por el modelo InVEST (Sharp et al., 2018).

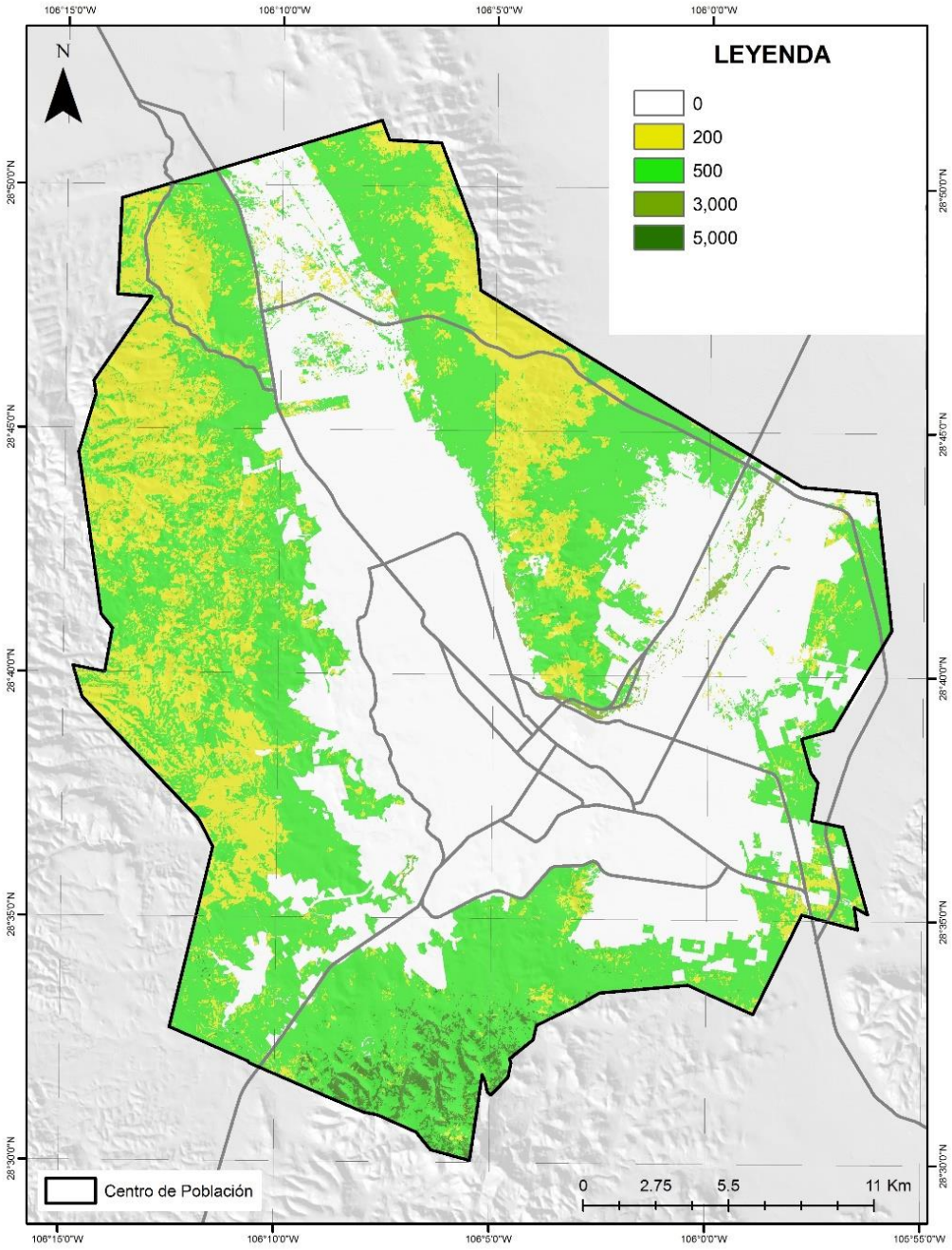


Ilustración 20. Tamaño de profundidad de raíz en milímetros. Fuente: Elaboración propia

9.9 Proporción de entrega de sedimentos

El módulo de proporción de entrega de sedimentos (PES) fue utilizado para mapear la generación de sedimentos terrestres. Para este mapeo, se utilizó nuevamente la cuenca, ya que este módulo también se basa en las propiedades de la topografía, de los sistemas naturales hídricos (ríos y arroyos). El cálculo de la proporción de entrega de sedimentos de basa en la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE, por sus siglas en ingles). Para obtener la ecuación la ecuación universal de pérdida del suelo se utilizó la ecuación 5:

$$USLE = R \times K \times L \times S \times C \times P \qquad 5$$

donde: USLE= Pérdida de suelo (ton/ha/año), R= Erosividad de la lluvia (MJ mm/ha hr año), K= Erosionabilidad del suelo (ton/hr/Mj mm), L= Factor por longitud de pendiente (adimensional), S= Factor por grado de pendiente (adimensional), C= Factor por cubierta vegetal (adimensional), P = Factor por prácticas de manejo (adimensional).

Los insumos necesarios para el módulo de proporción de entrega de sedimentos son:

1. Modelo digital de elevaciones
2. Mapa de erosividad (Factor K)
3. Mapa de erodabilidad (Factor R)
4. Mapa de cobertura de suelo/uso de suelo
5. Cuencas hidrográficas
6. Tabla biofísica (datos de Factor C y Factor P)

El modelo digital de elevaciones (MDE) se obtuvo del continuo de elevaciones mexicano (CEM), versión 3.0 del INEGI, con una resolución de 14.73 m por celda (Ilustración 21). Las impurezas del MDE fueron corregidas con la herramienta *Fill.* La herramienta se encuentra en la caja de herramientas Hidrology de ArcGis Pro.

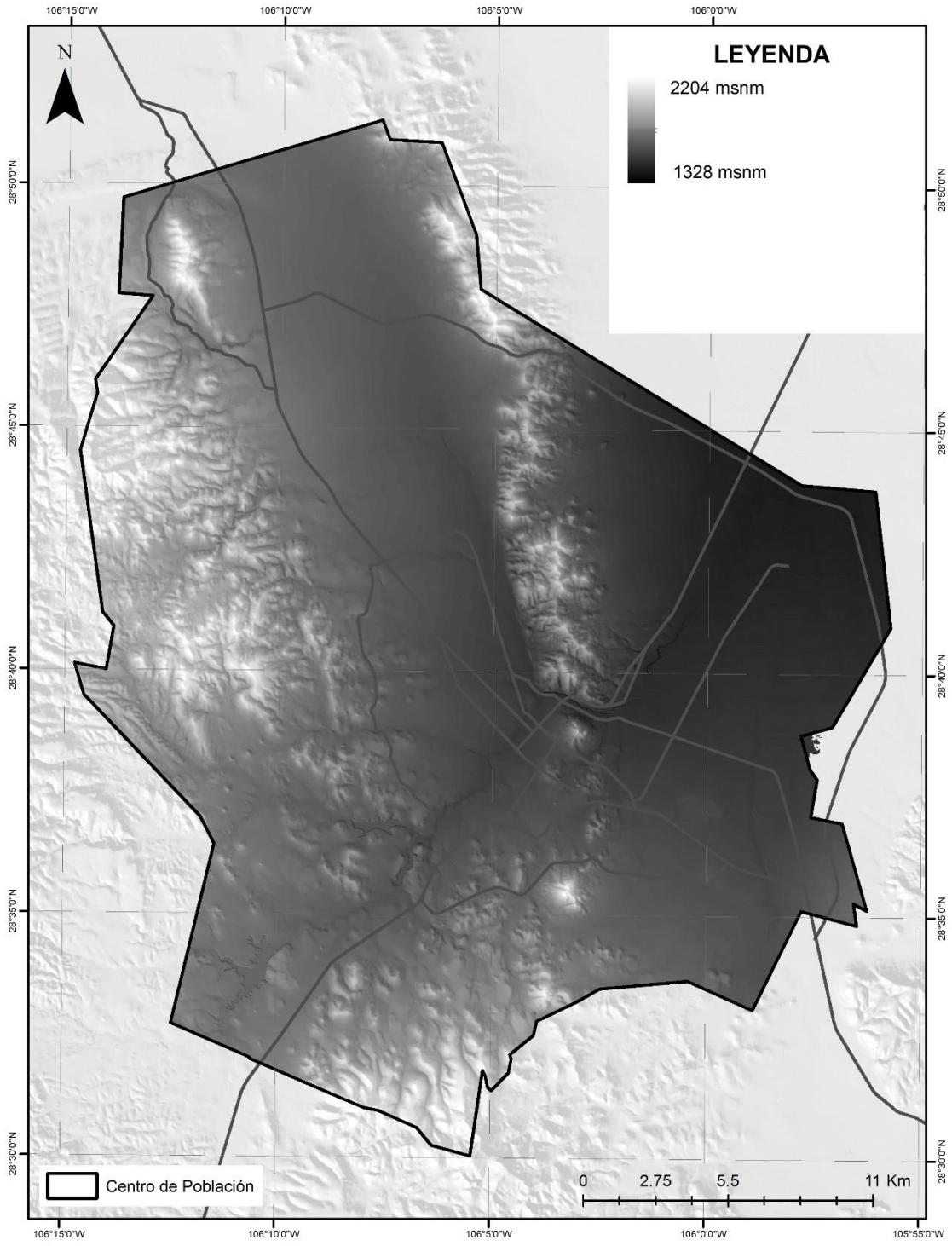


Ilustración 21. Modelo digital de elevaciones. Fuente: Elaboración propia

Para obtener el valor del Factor R (Ilustración 22), se utilizó la regionalización propuesta por Cortés (1991) para México, considerando la localidad para este

factor. Esta regionalización, provee de un conjunto de ecuaciones de regresión (Tabla 1), para el territorio mexicano. A partir de datos de precipitación anual se puede estimar el Factor R de la ecuación de perdida de suelo. El Factor R fue calculado utilizando los valores de precipitación de un conjunto de 15 estaciones meteorológicas provistas por el servicio Global Weather Data for SWAT (https://globalweather.tamu.edu/) con periodicidad de 1979 a 2014. La ecuación de regresión utilizada para obtener el Factor R corresponde a la región 4, de acuerdo a la Ilustración 23.

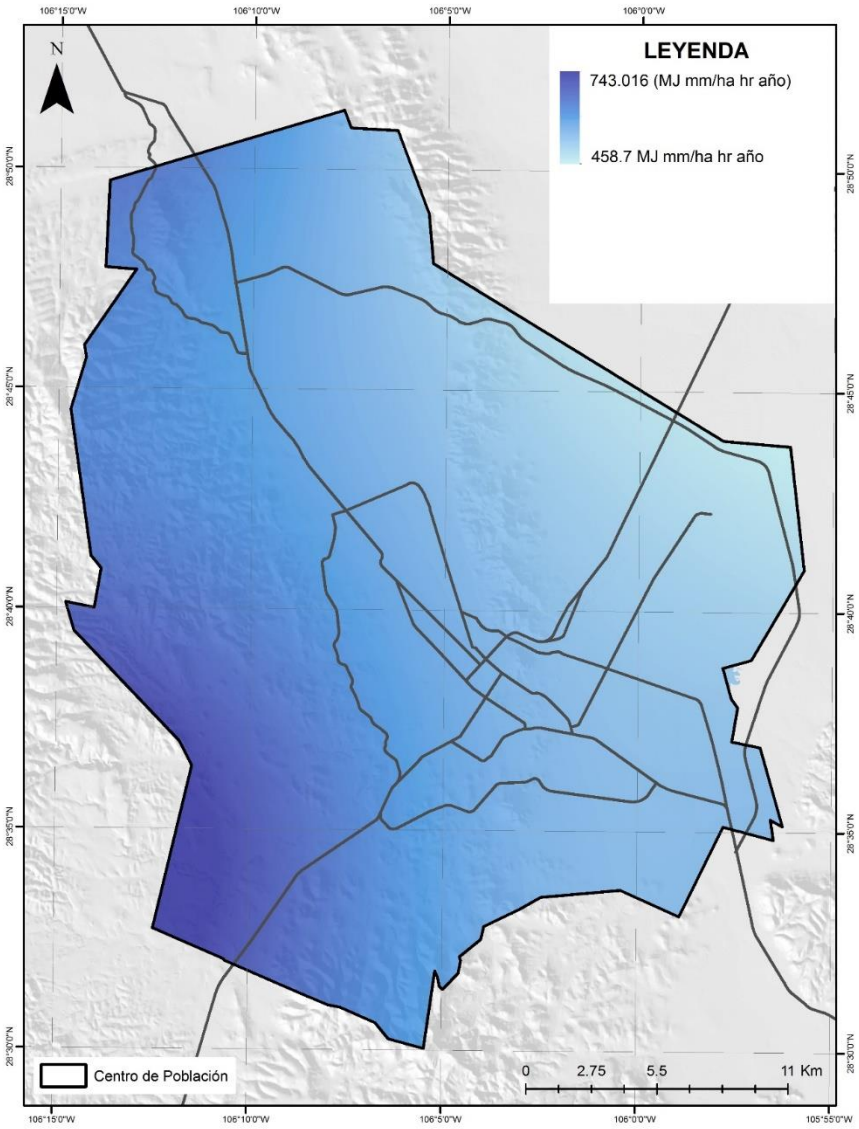


Ilustración 22. Factor R. Fuente: Elaboración propia

Tabla 1. Ecuaciones de regresión lineal por región para obtener el Factor R, propuestas por Cortés (1991).

Región	Ecuaciones	R^2
1	$Y= 1.20785x + 0.002276X^2$	0.92
2	$Y= 3.45552x + 0.006470X^2$	0.93
3	$Y=3.67516x - 0.001720X^2$	0.94
4	$Y=2.89594x + 0.002983X^2$	0.92
5	$Y=3.48801x - 0.000188x^2$	0.94
6	$Y=6.68471x + 0.001680x^2$	0.90
7	$Y=0.03338x + 0.006661x^2$	0.98
8	$Y=1.99671x +0.003270x^2$	0.98
9	$Y=7.04579x - 0.002096x^2$	0.97
10	$Y=6.89375x + 0.000442x^2$	0.95
11	$Y=3.77448x + 0.004540x^2$	0.98
12	$Y=2.46190x + 0.006067x^2$	0.96
13	$Y=10.74273x - 0.001008x^2$	0.97
14	$Y=1.50046x +0.002640x^2$	0.95

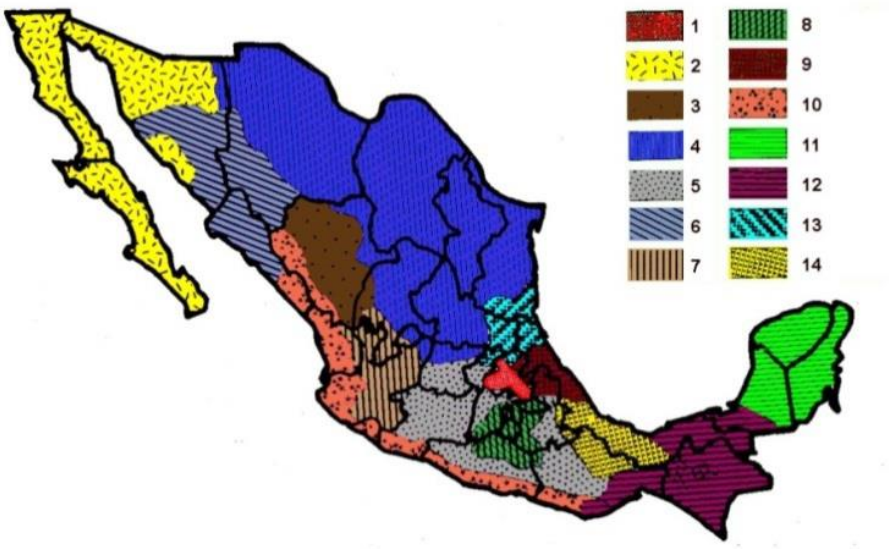


Ilustración 23. Regiones propuestas para determinar el Factor R, propuestas por Cortés (1991).

El Factor K (Ilustración 24) es un indicador de la capacidad que tiene el suelo a perder suelo por erosión. Esta capacidad está en función de sus características, como son el tipo de suelo y su textura. Considerando los tipos de suelo y la cartografía disponible compatible con los valores disponibles y compatibles con los

propuestos por la FAO, se signó, acorde al tipo de suelo y su textura, un coeficiente que corresponde al Factor K (Tabla 2).

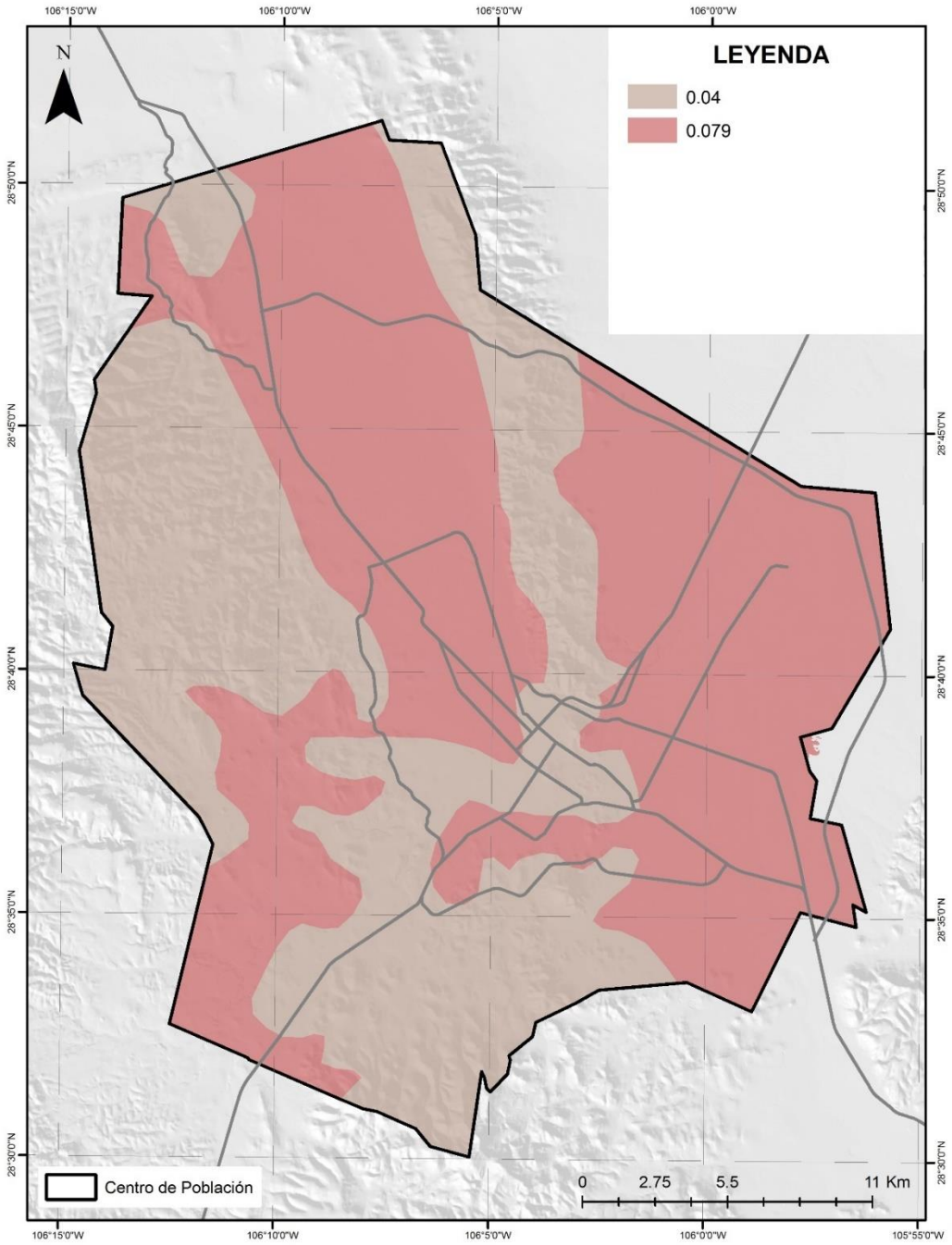


Ilustración 24. Factor K. Fuente: Elaboración propia

Tabla 2. Valores del Factor K para cada tipo de suelo de acuerdo a la FAO.

Tipo de Suelo	Tipo de subsuelo 1	Textura	Factor K
Regosol	eútrico	Media	0.04
Xerosol	cálcico	Media	0.079
Xerosol	háplico	Media	0.079
Regosol	eútrico	Media	0.04
Xerosol	háplico	Media	0.079
Xerosol	háplico	Media	0.079
Xerosol	lúvico	Media	0.079
Xerosol	háplico	Media	0.079
Regosol	eútrico	Media	0.04

El Factor C (factor de cobertura vegetal) representa el efecto de la cobertura del suelo/uso de suelo ya sean plantas, actividad por cultivos, nivel de productividad, biomasa subterránea, entre otros. Las áreas urbanas tienen un papel definitivo en el retraso del proceso de infiltración del agua, lo que lleva a un aumento de la escorrentía y la pérdida de suelo. Por otro lado, la vegetación natural juega un papel predominante en la reducción de la erosión hídrica. Los valores del Factor C tienen un rango que va de 0 a 1, donde aquellos valores cercanos a 0 corresponden a buena y muy buena cobertura vegetal, mientras que los valores cercanos a 1 indican una pobre cobertura vegetal. Por otro lado, el factor P (factor de prácticas de manejo), se refiere a la influencia que podrían tener las prácticas de conservación de suelo sobre las tasas de erosión de un territorio, realizando surcos al contorno, surcos rectos, terrazas, entre otros, ya que muchas veces la vegetación por sí misma no evita el escurrimiento superficial. El mapa de cobertura de suelo/uso de suelo fue generado mediante clasificación supervisada. El mapa se usó como insumo para asignar los valores del Factor C y el Factor P. Estos dos, se añaden únicamente en la tabla biofísica y no como mapa.

9.10 Calidad escénica

Las vistas naturales o paisajísticas, pueden contribuir al bienestar de las comunidades, ciudades, en un variado número de formas. El servicio ambiental desempeña un papel importante, ya que puede ser una fuente de atracción local, lo que a su vez tendría influencia sobre los negocios circundantes, beneficiando el aumento en sus economías. Además de la parte económica, otros de los servicios que ofrece las vistas, se han encontrado vínculos entre la visualización de la

naturaleza, la recreación, convivencia familiar, punto de reunión espiritual, entre otros. Estos dos aspectos mencionados, contribuyen al rumbo y desarrollo urbano, especialmente en la zona oeste de la ciudad de Chihuahua, ya que, aunado a las vistas, estos sitios comienzan a tomar un valor, por sus características, que lo hace preferible para vivir. Por ello, los desarrolladores comienzan a planificar los próximos asentamientos habitacionales y comerciales en estos lugares, que van adquiriendo una mayor plusvalía.

El modelo de calidad escénica de InVEST proporciona información sobre la visibilidad de los objetos desde un paisaje circundante. Los mapas de calidad escénica se pueden utilizar para identificar las áreas que más propensas a verse afectadas por los nuevos desarrollos en el paisaje, también conocido como la huella visual.

Se utilizó el modelo de calidad escénica de InVEST para evaluar el impacto escénico del área urbana, la red vial, y las localidades sobre las ANVAS y PEP Los insumos necesarios para el modelo de calidad escénica son los siguientes:

1. Área de interés (ANVA y PEP)
2. Tamaño de celda (14.73 m)
3. Objetos que impactan la calidad escénica
4. Modelo digital de elevaciones
5. Coeficiente de refractividad

El área de interés considerada para el módulo fue las zonas de ANVA y PEP, el tamaño de celda fue definido en 14.73 m por celda o pixel. Este valor se utilizó acorde al tamaño de celda homogenizado para todos los ráster que se utilizaron en el desarrollo del proyecto. Los objetos que impactan la calidad escénica del paisaje fue el área urbana, las vías de comunicación, y las localidades dentro del centro de población (Ilustración 25).

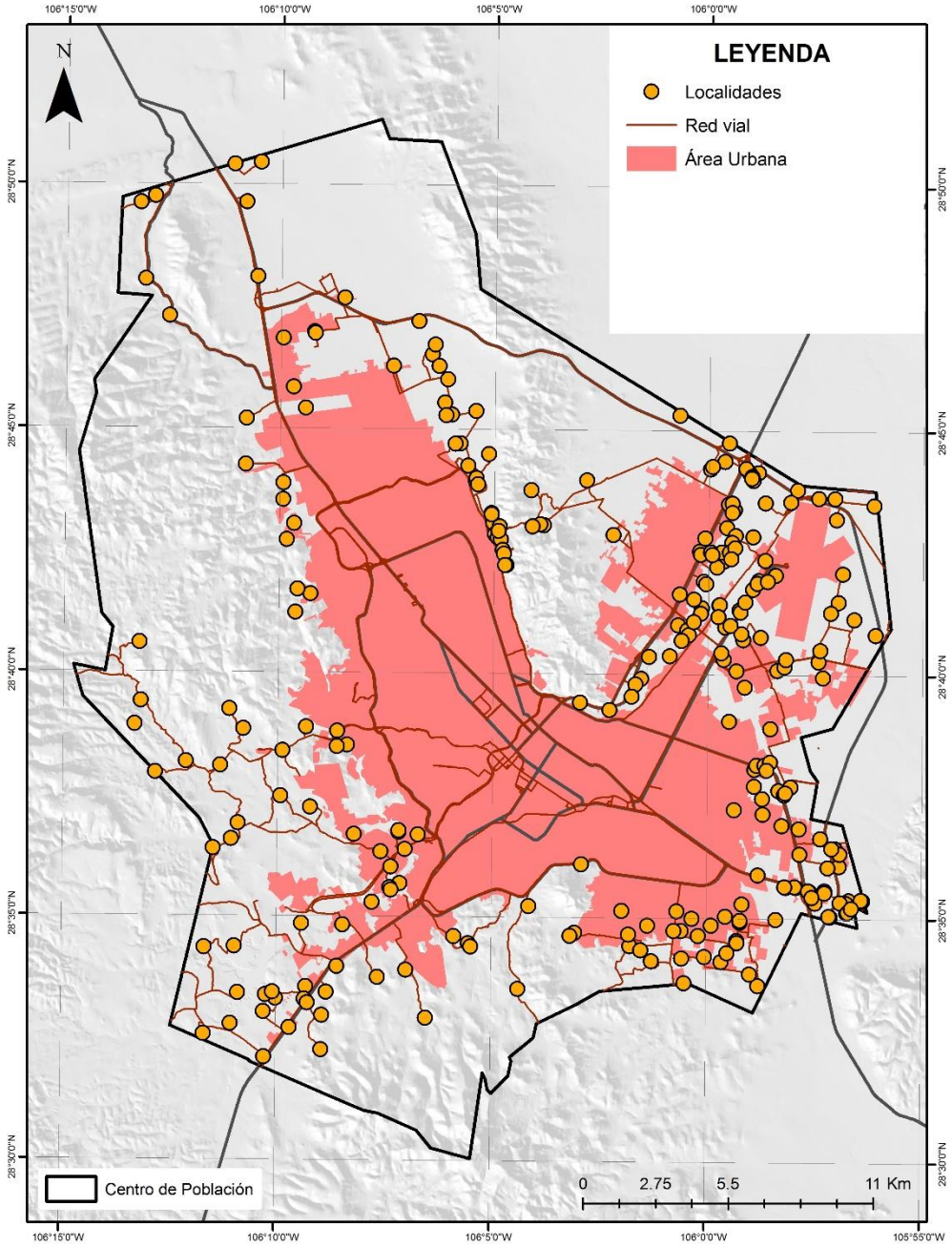


Ilustración 25. Objetos que impactan. Fuente: Elaboración propia.

El modelo digital de elevaciones (MDE) se obtuvo del continuo de elevaciones mexicano (CEM), versión 3.0 del INEGI, con una resolución de 14.73 m por celda (Ilustración 26). Las impurezas del MDE fueron corregidas con la herramienta *Fill.* La herramienta se encuentra en la caja de herramientas Hidrology de ArcGis Pro.

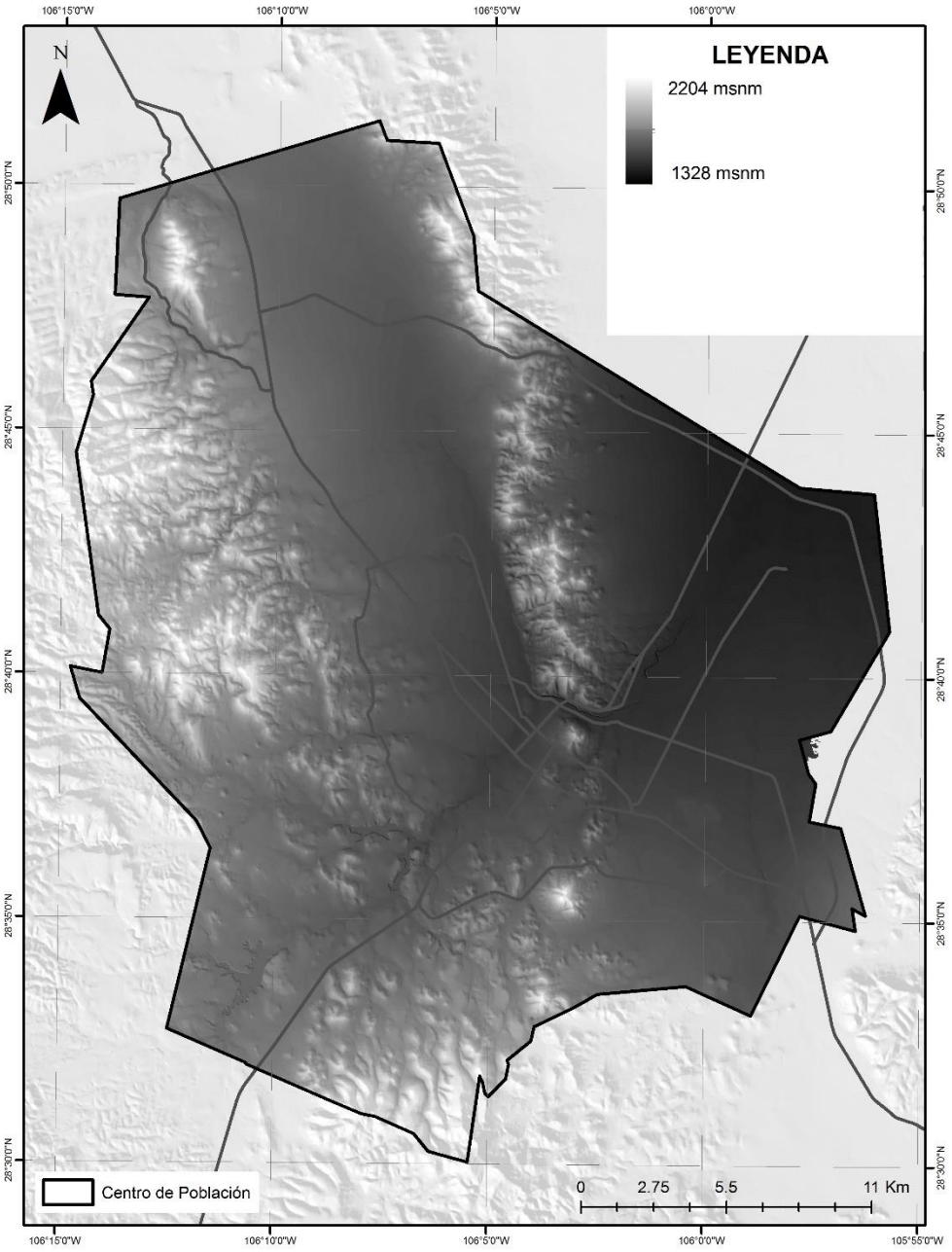


Ilustración 26. Modelo digital de elevaciones. Fuente: Elaboración propia.

El coeficiente de refractividad fue de 0.13 y fue el sugerido por la guía de InVEST (Sharp et al., 2018).

9.11 Modelización y simulación futura con Dinamica-EGO

Algunos de los modelos de InVEST, requieren de un mapa de cobertura de suelo/uso de suelo proyectado. Para esto, se elaboró una simulación futura del mapa de cobertura de suelo/uso de suelo a 2030. El mapa futuro de cobertura de suelo/uso de suelo requiere del comportamiento histórico de las coberturas de suelo/uso de suelo. Este mapa histórico de las coberturas de suelo/uso de suelo correspondió al centro de población en 2010 (Mencionado en la sección 9.5). Posterior a la obtención de la cobertura de suelo/uso de suelo, se utilizó el programa Dinamica-EGO (https://csr.ufmg.br/dinamica/) (Soares-Filho et al., 2002) para la generación del mapa de cobertura de suelo/uso de suelo futuro. Las tendencias históricas del cambio de cobertura de suelo/uso de suelo se basan en la matriz de transición (Monteiro-Junior et al., 2018). Dinamica-EGO utiliza el algoritmo de los autómatas celulares, y el método de Weights of Evidence (pesos de evidencia) para realizar la simulación futura (Olmedo et al., 2018). El mapa de cobertura de suelo/uso de suelo a 2030 se muestra en la Ilustración 27.

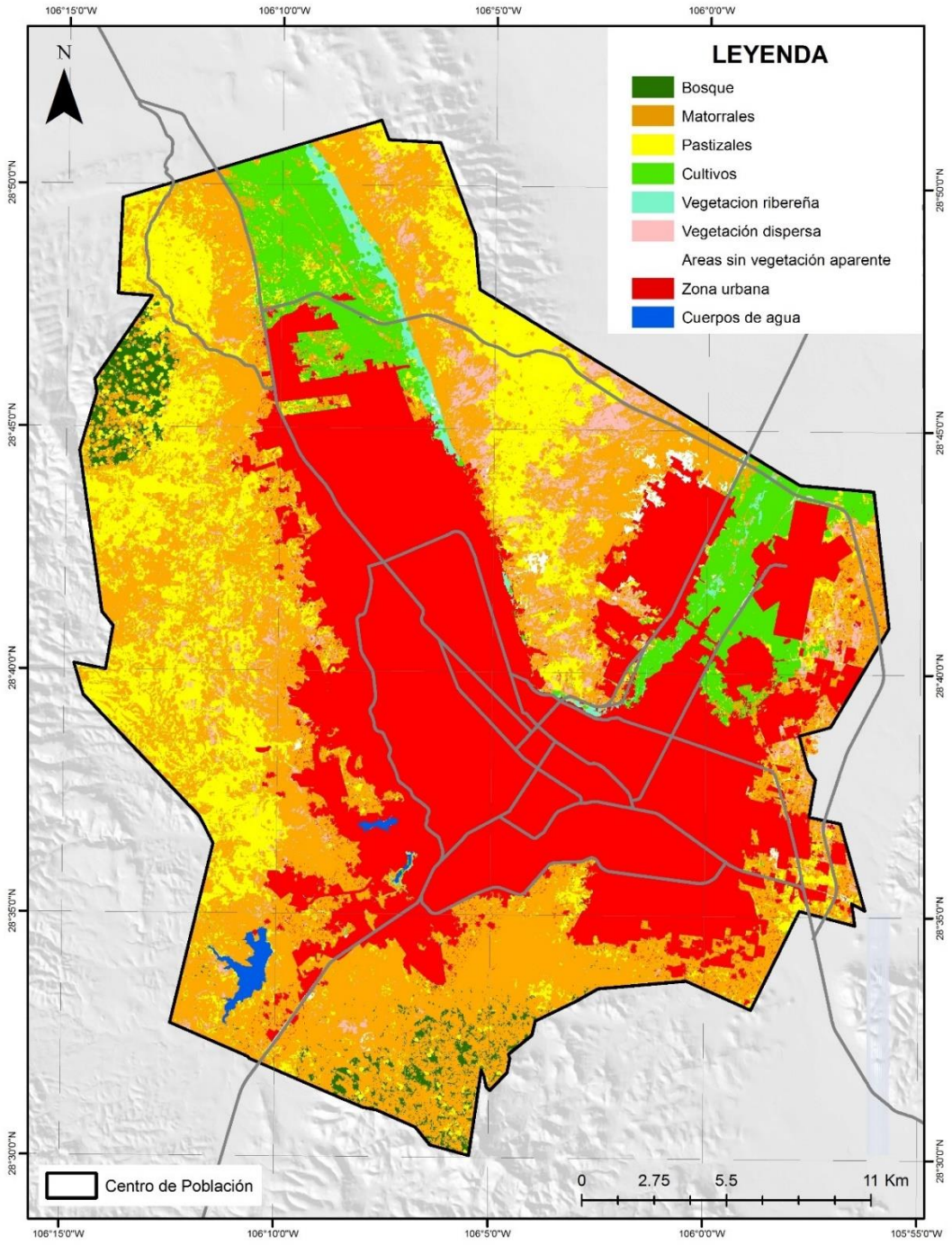


Ilustración 27. Cobertura de suelo/uso de suelo del 2030. Fuente: Elaboración propia.

10. RESULTADOS E IMPLICACIONES

10.1 Clasificación de coberturas de suelo usos de suelo

Se obtuvieron nueve tipos de coberturas de suelo/usos de suelo para el centro de población de la ciudad de Chihuahua. Acorde al método de clasificación supervisada Random Forest, las coberturas de suelo/uso de suelo con mayor superficie fueron los matorrales, seguido del área urbana y los pastizales. En menor superficie están las áreas de cultivo y las demás coberturas (Tabla 3). La precisión de las clasificaciones fue de 0.87 para el 2010 y 0.83 para 2020. Acorde a lo mencionado por Sousa et al. (2002), el nivel de la precisión de las clasificaciones es aceptable y se considera bueno.

Tabla 3. Superficies y porcentajes de ocupación de las coberturas de suelo/uso de suelo del centro de población por el método de clasificación supervisada SVM.

Cobertura de suelo/uso de suelo	2010		2020	
	Superficie (ha)	Ocupación (%)	Superficie (ha)	Ocupación (%)
Bosques	2567.68	3.28	1973.55	2.52
Matorrales	28967.32	36.98	27168.08	34.68
Pastizales	12792.49	16.33	12269.83	15.66
Cultivos	4936.74	6.30	5033.64	6.43
Vegetación ribereña	909.70	1.16	855.48	1.09
Vegetación dispersa	2619.63	3.34	2528.97	3.23
Áreas desnudas	678.02	0.87	543.81	0.69
Área urbana	24488.67	31.26	27634.89	35.28
Cuerpos de agua	370.28	0.47	322.27	0.41

10.2 Distribución del carbono

10.2.1. Almacén de carbono

En el modelo InVEST, el almacenamiento de carbono de la vegetación en el área conurbada del centro de población es la suma de los carbonos aéreo, del subterráneo, del suelo y el muerto, en ton/ha por pixel. El mapa de carbono total incluye la suma de los almacenes anteriormente mencionados. Los valores del carbono superficial (Ilustración 28) se encuentran un rango de 0 a 3.68 ton/ha. La parte sur del centro de población registró el mayor almacenamiento de carbono, principalmente en las comunidades de matorrales con presencia de mezquitales (Tabla 4). La mayor cantidad de carbono almacenado en las ANVA y las PEP fue de 3.68 ton/ha. Las áreas de matorral que circundan el área urbana registraron un almacenamiento de carbono de 2.35 ton/ha. Mientras tanto, en zonas de pastizal, se cuenta con cantidades de 1.605 ton/ha de carbono. Por su parte el carbono aéreo, subterráneo, del suelo y el muerto (Ilustración 29 a 32), mostraron los mayores almacenamientos de carbono en la parte sur de la mancha urbana, al igual que el carbono total.

Tabla 4. Tabla biofísica de los almacenes de carbono (ton/ha).

LUCODE	CSUS	Carbono aéreo	Carbono subterráneo	Carbono en el suelo	Carbono muerto
1	Bosques	80	60	20	10
2	Matorrales	30	30	30	13
3	Pastizales	5	35	30	4
4	Cultivos	0	0	0	0
5	Vegetación ribereña	10	20	60	12
6	Vegetación dispersa	5	5	15	2
7	Áreas desnudas	0	0	0	0
8	Área urbana	5	5	15	2
10	Cuerpos de agua	0	0	0	0

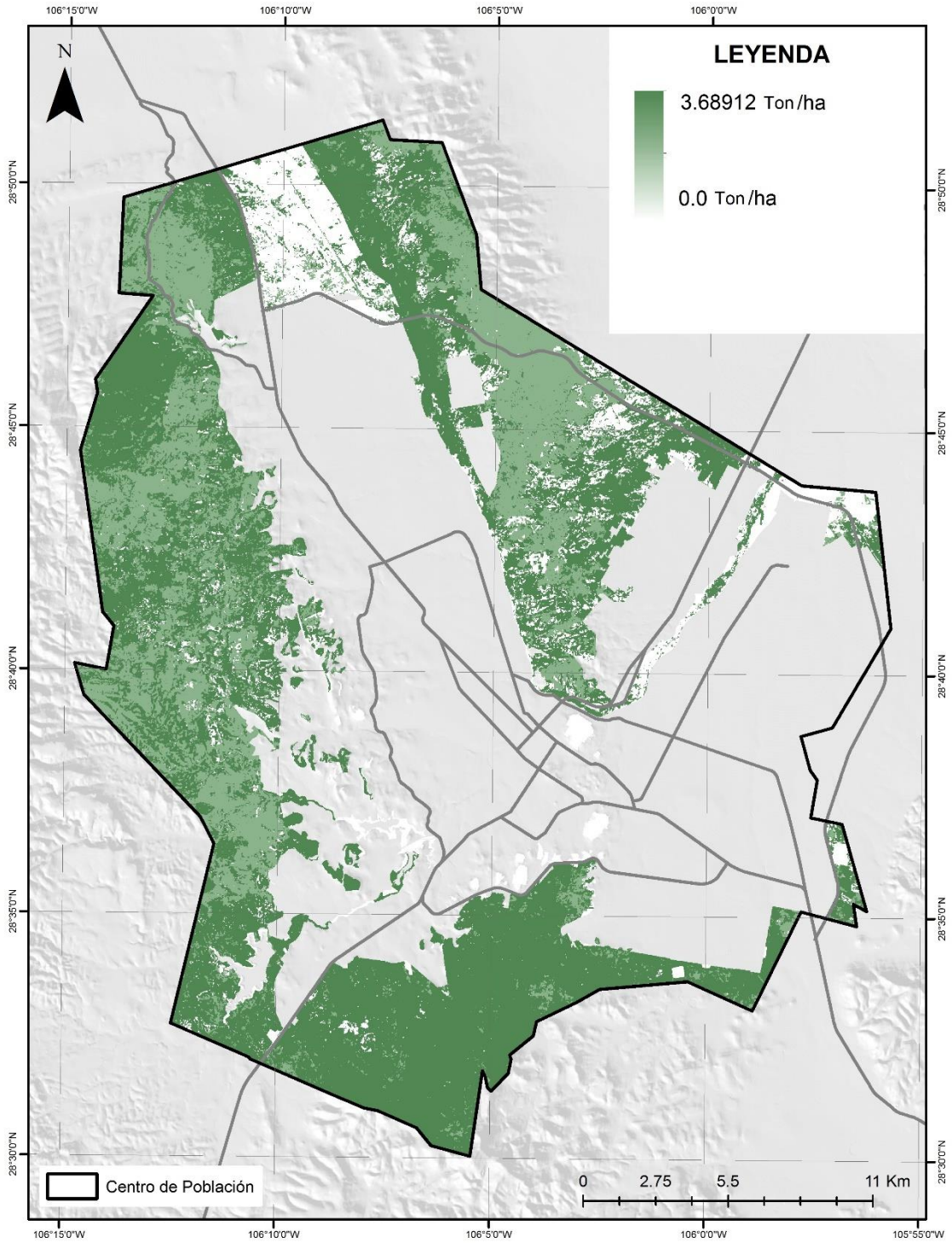


Ilustración 28. Carbono total en ton/ha, de las ANVA y PEP del centro de población. Fuente: Elaboración propia

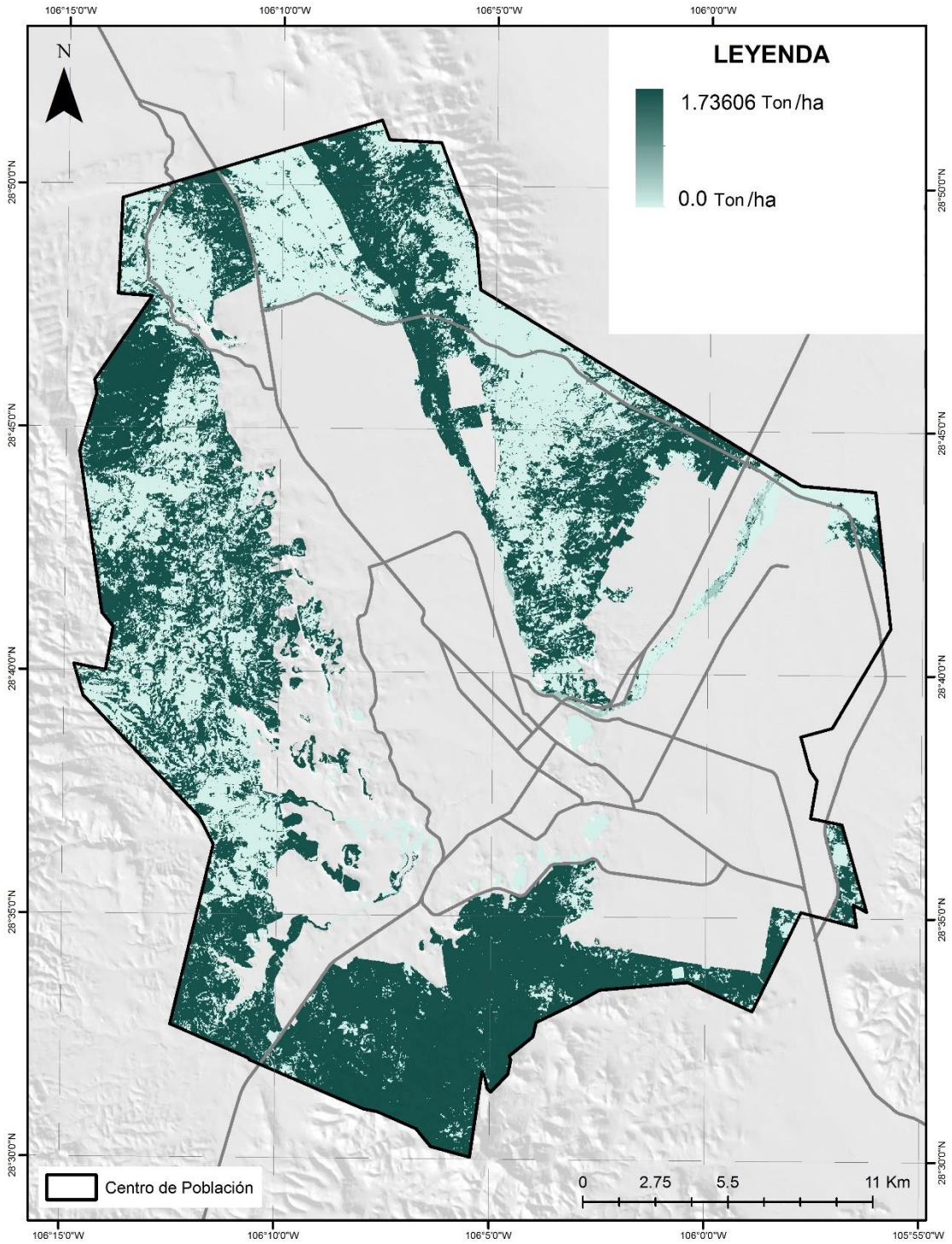


Ilustración 29. Carbono aéreo en ton/ha, de las ANVA y PEP del centro de población. Fuente: Elaboración propia

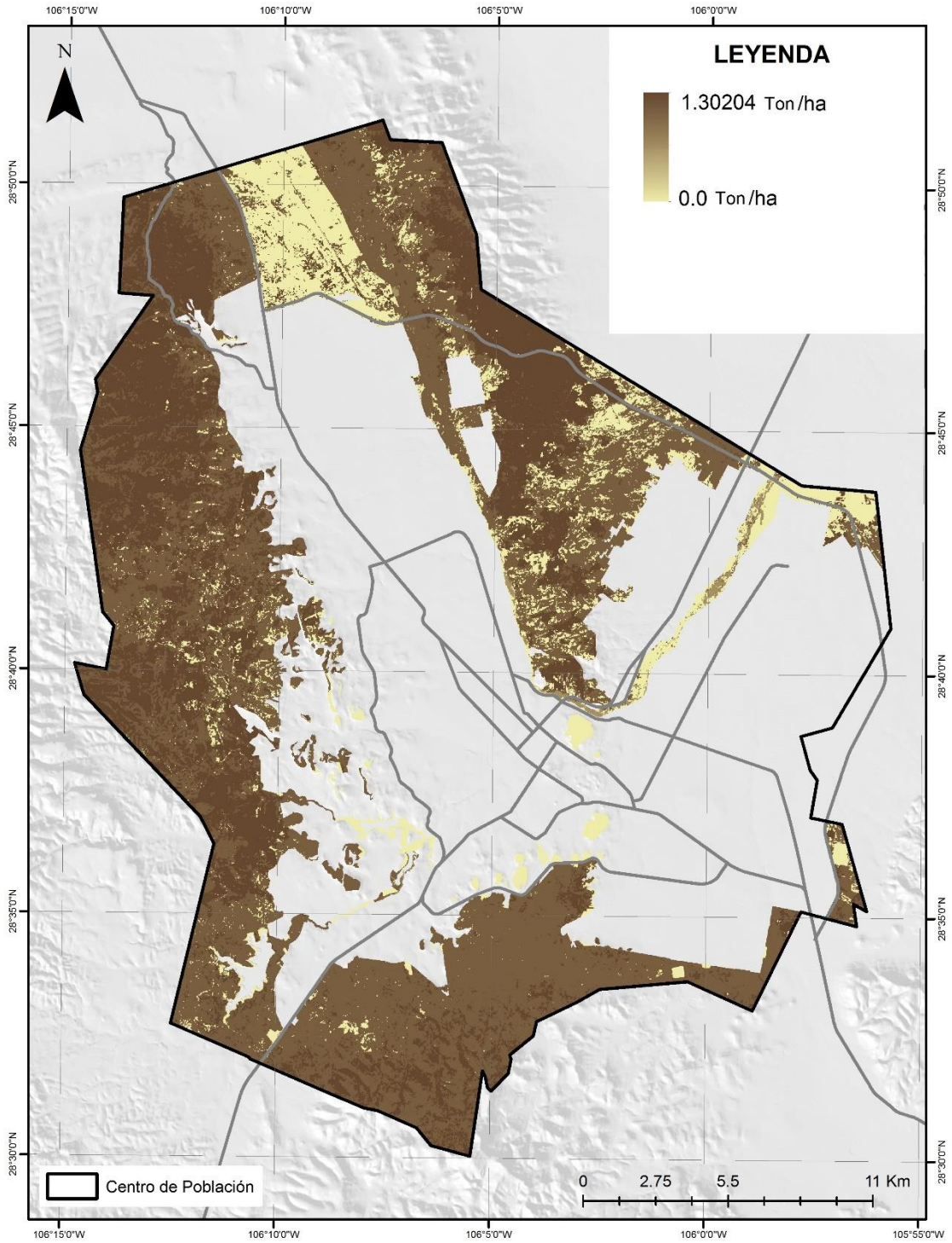


Ilustración 30. Carbono subterráneo en ton/ha, de las ANVA y PEP del centro de población. Fuente: Elaboración propia

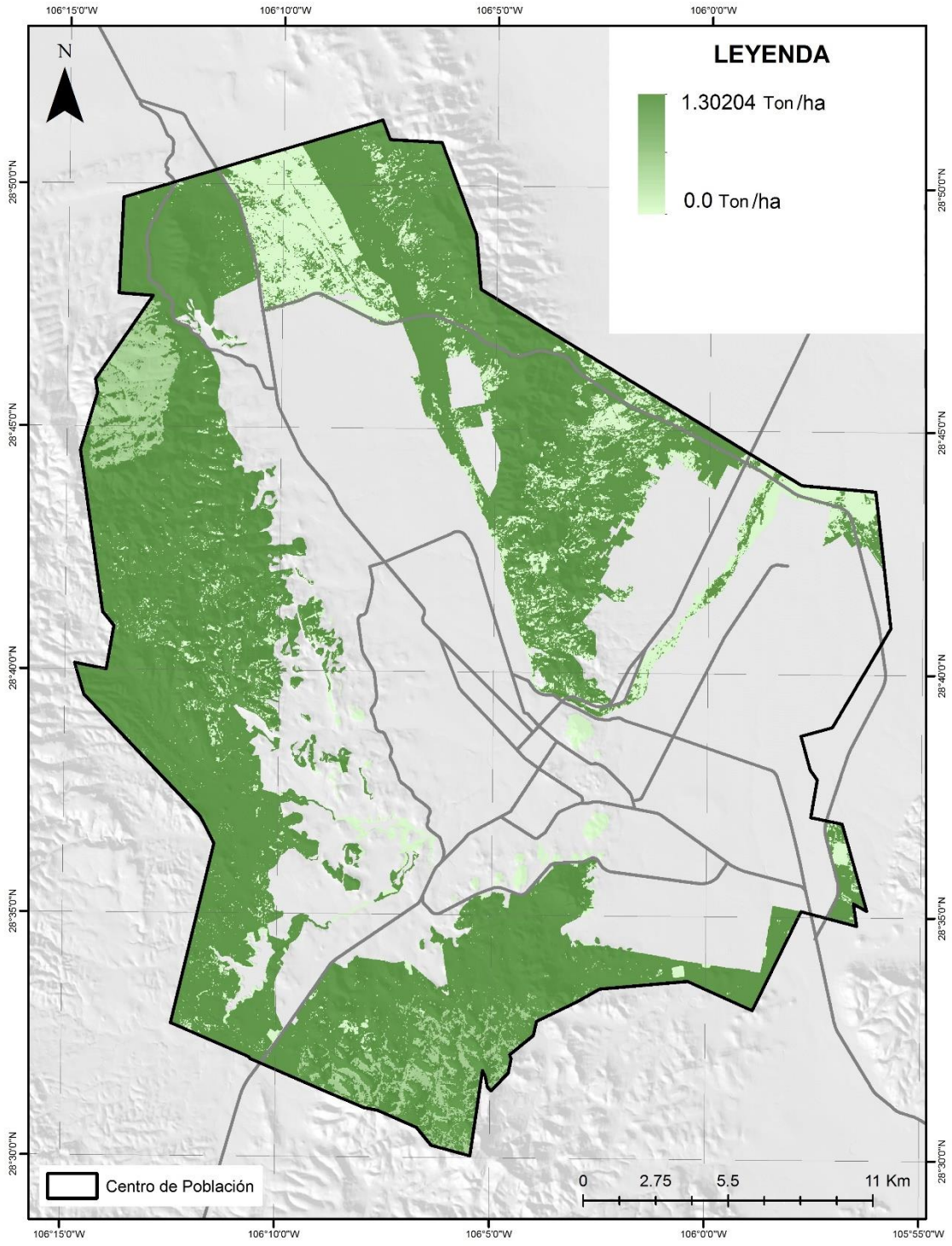


Ilustración 31. Carbono en el suelo en ton/ha, de las ANVA y PEP del centro de población. Fuente: Elaboración propia

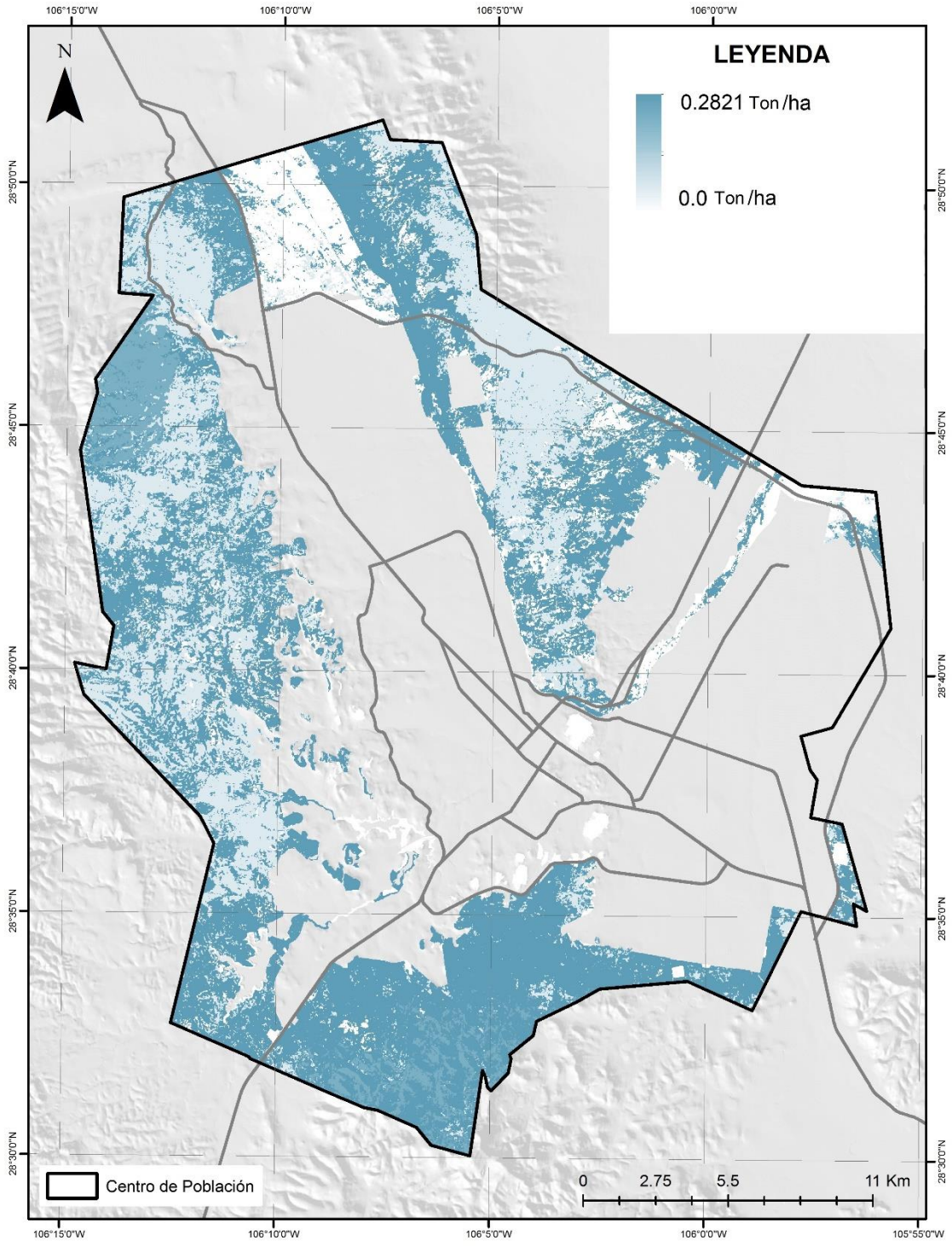


Ilustración 32. Carbono muerto en ton/ha, de las ANVA y PEP del centro de población. Fuente: Elaboración propia

La distribución de los terrenos forestales maderables (mezquitales) y no maderables (arbustivas, pastizales) es de gran importancia y tiene un gran potencial para usar de base en la toma de decisiones para enfocar esfuerzos de conservación y protección para estas coberturas de uso de suelo/usos de suelo. La rápida visualización de los patrones espaciales de almacenamiento de carbono en el área de estudio permitió crear una imagen visualmente comunicativa que muestra las áreas potenciales de almacenamiento de carbono en las áreas conurbadas de la ciudad de Chihuahua.

Las zonas ubicadas hacia el sur, en las cercanías (lomeríos) del cerro grande; oeste, que incluye Sierra Azul y parte de la sierra del mogote; así como al este, por la zona de la Sierra de Nombre de Dios; son áreas importantes para el almacenamiento de carbono. El almacenamiento de carbono es un servicio ecosistémico que ayuda en la mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero hacia la atmósfera y en regulación del clima. El carbono se almacena en los matorrales, pastizales, bosques, y cultivos. Sin embargo, este servicio ecosistémico ha disminuido su calidad debido principalmente a la expansión urbana en el área (Ito, 2005, Lyu et al., 2018). Adicionalmente, se ha reportado que la introducción de especies exóticas y los efectos de las islas de calor urbano, reducen la tasa de almacenamiento de carbono.

Las áreas más alejadas al centro de población y con ausencia de localidades rurales o caminos se encuentran al sur del centro de población; como los son las zonas cerrilles cercanas al Cerro Grande, así como Sierra Azul y parte de la Sierra del Migote (hacia el oeste). Algunas de las localidades cercanas, ubicadas hacia el sur de la ciudad son: La Cañada, Los Ojitos, El Picacho, San Ramón. Por el lado oeste, las localidades cercanas a Sierra Azul son Rancho el Pajarito, El Cuervo y Rancho Alegría. Es de gran importancia prestar atención a estas localidades debido a que su presencia y conexión mediante caminos y calles da la pauta para la fragmentación de las coberturas de suelo/usos de suelo del centro de población. En la Ilustración 33 se puede apreciar, como en los lomeríos cercanos a la localidad La Haciendita, un cambio de uso de suelo. En esa área, la remoción de la cobertura

vegetal limita la infiltración del agua para su percolación y posterior recarga de mantos acuíferos en la zona. Además, esta acción de acelera el proceso de erosión hídrica y azolva causes cauces de arroyos y ríos, y provoca una reducción en el almacenamiento de carbono.



Ilustración 33. Cambio de cobertura de suelo/uso de suelo en los alrededores de la localidad “La Haciendita”. (28.637727, -106.191572). Fuente: Elaboración propia.

En este estudio, se asumió que el área urbana y los cultivos tiene un almacenamiento de carbono que se puede considerar como nulo. Sin embargo, se entiende que coberturas de suelos como los bosques urbanos, arbustos, jardines, asi como cultivos, contribuyen con una porción del almacenamiento de carbono total (Liu y Li, 2012). Sin embargo, se optó por este enfoque conservador para establecer una línea de base sobre el almacenamiento de carbono en el centro de población.

10.2.2. Secuestro de carbono

Respecto al secuestro de carbono, considerando el primer escenario con un precio de 50 dlls para el precio métrico de la tonelada de carbono (PMTC), un 7% de descuento en el precio del carbono en el mercado (DPCM), y una tasa anual de cambio en el precio del mercado del carbono (TACPMC) del 3% (PMTC=50,

DPCM=7%, TACPMC=3%, respectivamente), parámetros solicitados por el programa, se generaron los mapas de secuestro de carbono y valor económico. El primero de ellos (Ilustración 34) muestra la diferencia en carbono secuestrado entre la cobertura de suelo/uso de suelo actual (2020) y la futura (2030). Los valores negativos indican perdida de carbono, mientras que los valores positivos indican carbono secuestrado. En este primer escenario se tiene un rango de -3.102 ton/ha de perdida de carbono, hasta una ganancia de 2.23 ton/ha de secuestro de carbono. Por otra parte, la Ilustración 35, muestra el valor económico del carbono secuestrado entre el 2020 y el 2030. Para este mapa se tiene un rango de valores que van de los 82.99 dlls por celda (ganancia), hasta los -115.22 dlls (perdida). Cada celda tiene una resolución de 14.73 m, es decir 216.97 m^2. En las ANVA y PEP, existen 11 celdas con una perdida a 2030 de -115.22 dlls, es decir 1267.42 dlls, 969 celdas con un valor de -82.99 dlls, 8602 celdas con -82.18, 13414 celdas con -77.35, con pérdidas de 80417.31 dlls, 706912.36 dlls, 1037572.9 dlls, respectivamente, sumando 1’826,169.99. Lo que se traduce en pesos mexicanos, con un tipo de cambio de 21.00 MNX, a 38’349,569.79 pesos. En términos de superficie, la cantidad de dinero mencionada anteriormente, correspondería a un cambio en la cobertura de suelo/uso de suelo de 498.94 ha.

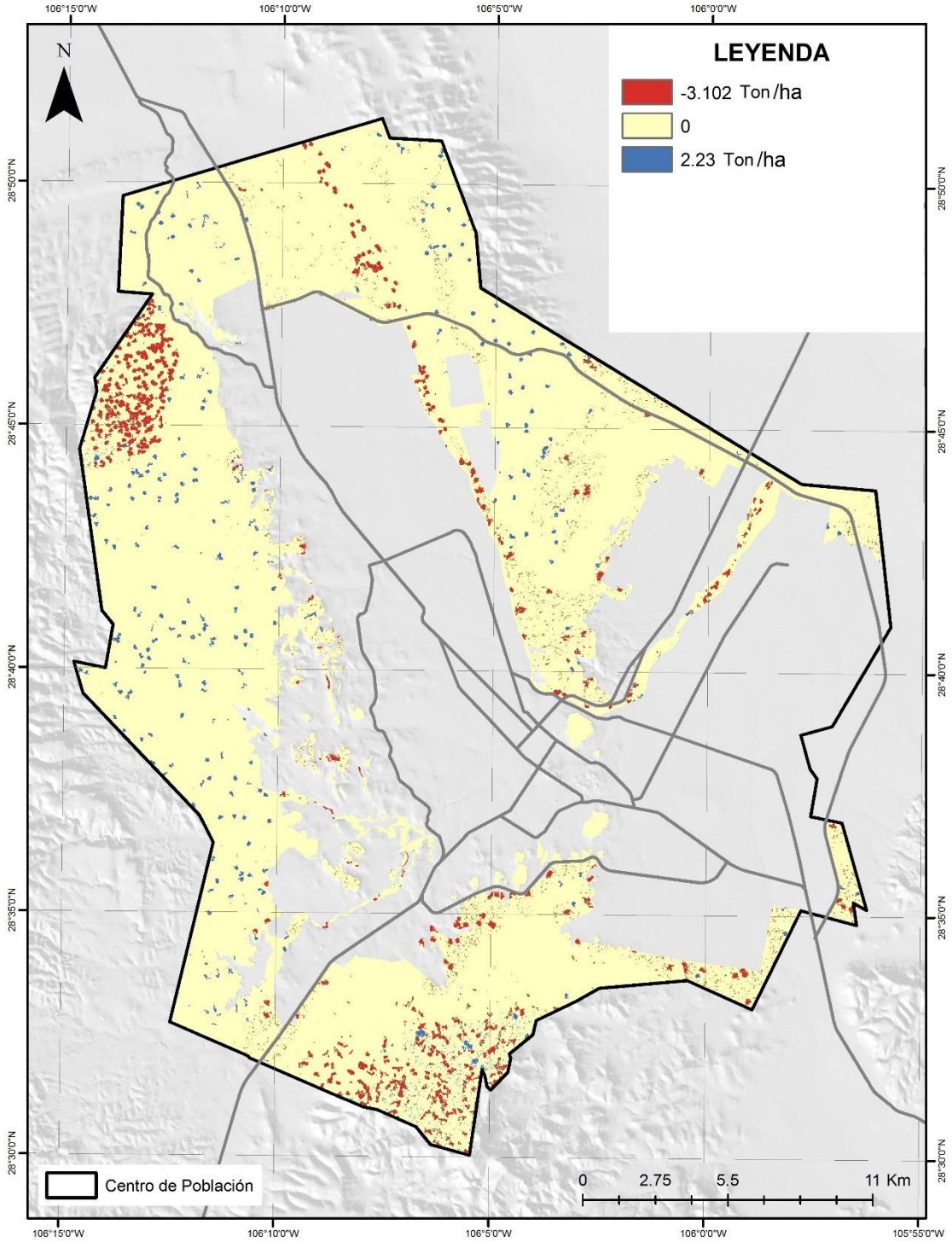


Ilustración 34. Diferencia en carbono secuestrado entre la cobertura de suelo/uso de suelo del 2020 y del 2030 en ton/ha. Fuente: Elaboración propia.

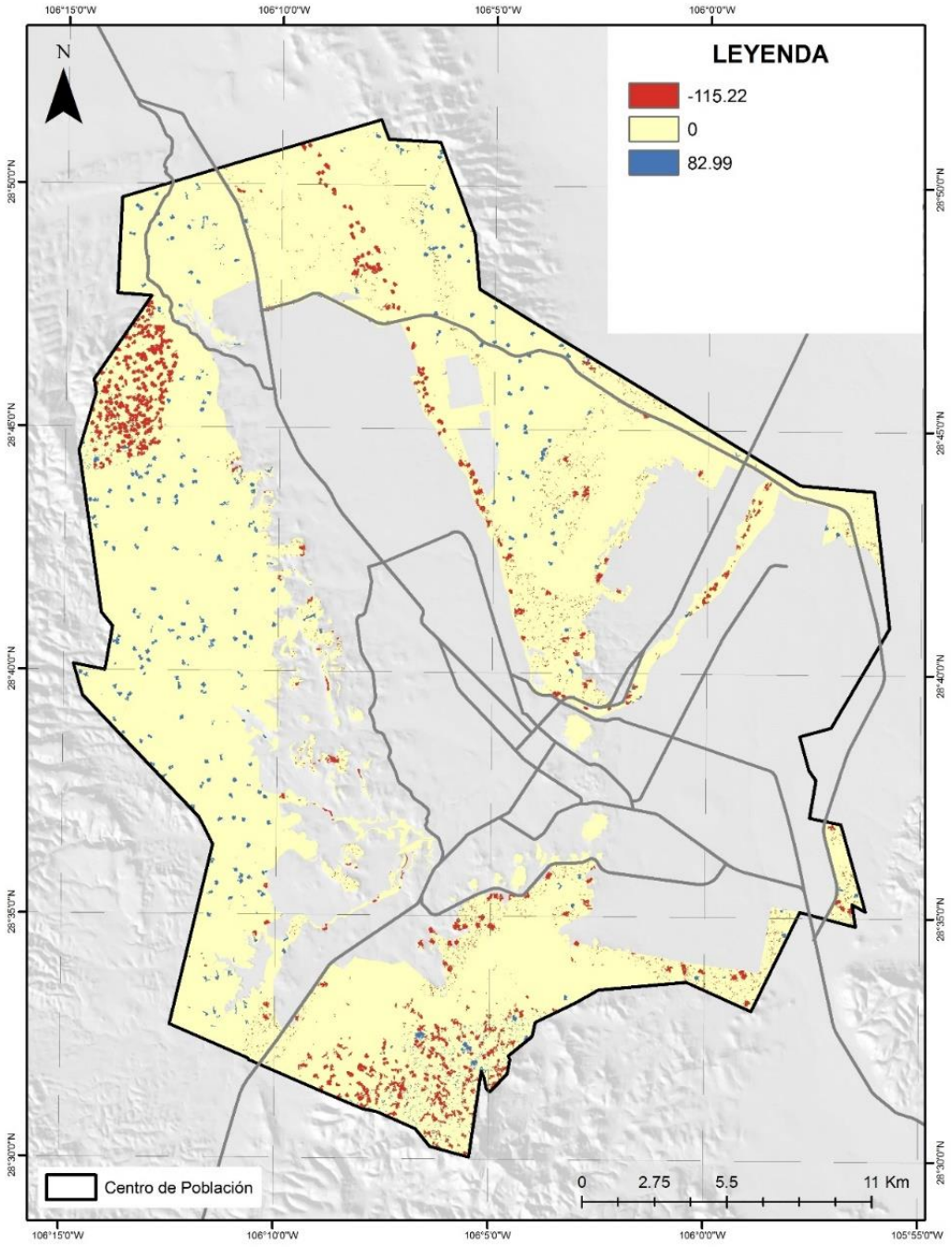


Ilustración 35. Valor económico del carbono secuestrado entre el 2020 y el 2030 en dolares. Fuente: Elaboración propia.

Considerando el segundo escenario con un precio de 100 dlls en el precio métrico de la tonelada de carbono, un 7% de descuento en el precio del carbono en el mercado, y una tasa anual de cambio en el precio del mercado del carbono del 3% (PMTC=100, DPCM=7%, TACPMC=3%, respectivamente) de se obtuvieron los

mapas de almacén de carbono y valor económico. La diferencia en carbono almacenado entre la cobertura de suelo/uso de suelo actual y la futura (2020-2030), se mantiene, ya que son los mismos cambios. Sin embargo, lo que cambia es el valor económico del carbono secuestrado entre el 2020 y el 2030 (Ilustración 36). Para este mapa se tiene un rango de valores que van de los 165 dlls por celda (ganancia), hasta los -230.44 dlls (perdida).

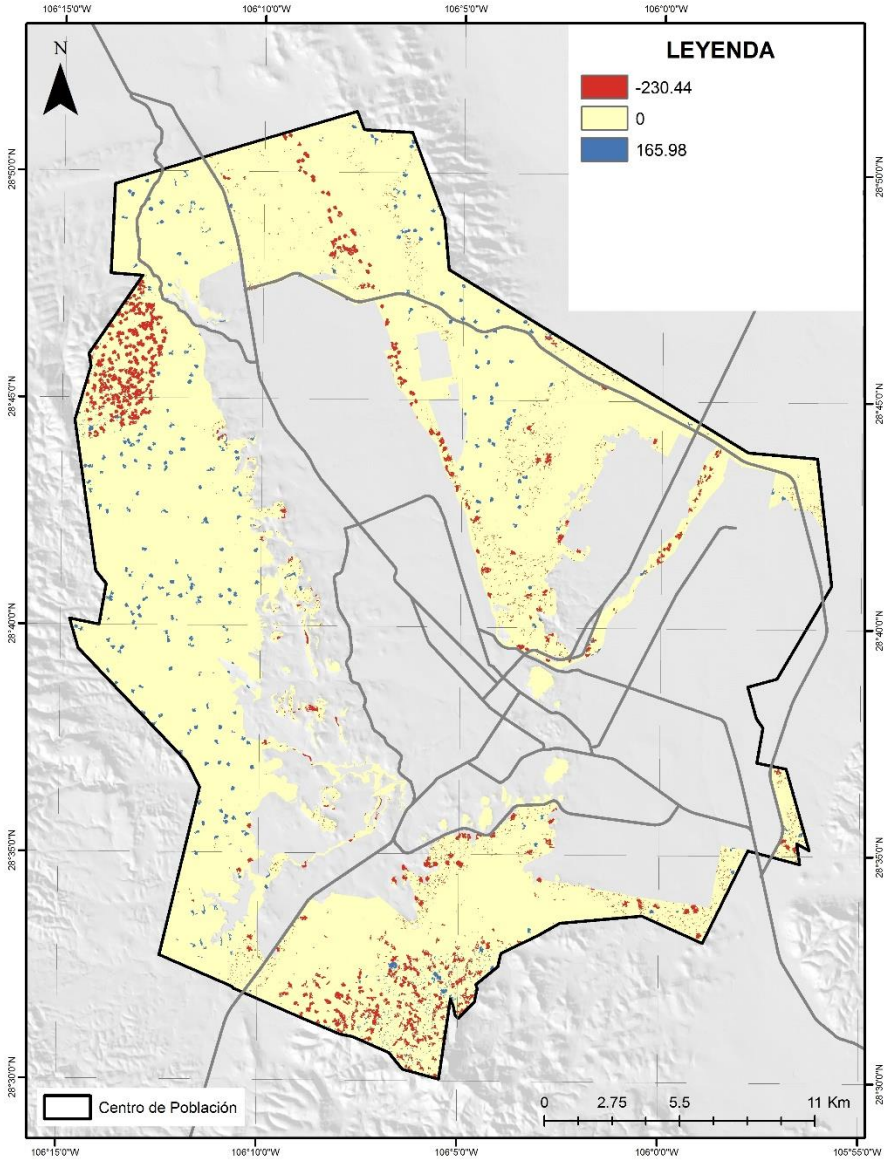


Ilustración 36. Valor económico del carbono secuestrado entre el 2020 y el 2030 en dólares. Fuente: Elaboración propia.

10.3 Calidad del hábitat

La pérdida y degradación del hábitat consiste en la disminución de la biodiversidad. Por ello, los esfuerzos dentro del Plan de Desarrollo Urbano están enfocados a promover la conservación de las ANVA y PEP. Para lograr este objetivo, es necesario contar con información sobre las decisiones relacionada con la gestión del uso de suelo. Se conoce que la disminución de la calidad del hábitat se produce principalmente por los procesos asociados a la urbanización. Esto incluye la creación de nuevas vías de comunicación y su distribución, el crecimiento poblacional, la consecuente aparición de nuevas localidades, el desarrollo agrícola y la extensión de la frontera urbana. La disminución en la calidad del hábitat se exacerba debido a otras amenazas como son el cambio climático y la introducción de especies que no son nativas de la región (Abell, 2002).

El mapa de degradación del hábitat (Ilustración 37) hace referencia a la calidad actual del hábitat. Un nivel de calidad de hábitat alto lo representan las zonas oscuras mientras que las zonas claras corresponden a áreas con niveles bajos de calidad del hábitat. Esta variable mostró valores de celda en un rango de 0 (baja calidad) a 1 (alta calidad) para el hábitat de vida silvestre. El mapa representa la condición actual con base en datos de cobertura de suelo/uso de suelo y las amenazas. Como se observa, existe una alta heterogeneidad espacial en la calidad del hábitat. Las áreas con tonos claros en el mapa muestran el impacto de las actividades antropogénicas. Por otro lado, las zonas oscuras representan superficies con alta calidad de hábitat, sin disturbios aparentes. Las zonas de bosque ubicadas en la parte sur, coloreadas de café oscuro, y en la parte oeste que comprenden las zonas de Sierra Azul y parte de Sierra del Mogote, tienen la más alta calidad de hábitat. Esta calidad del hábitat se observa reducida para las coberturas de suelo/uso de suelo de pastizal y matorral, donde se observa la presencia de caminos y localidades.

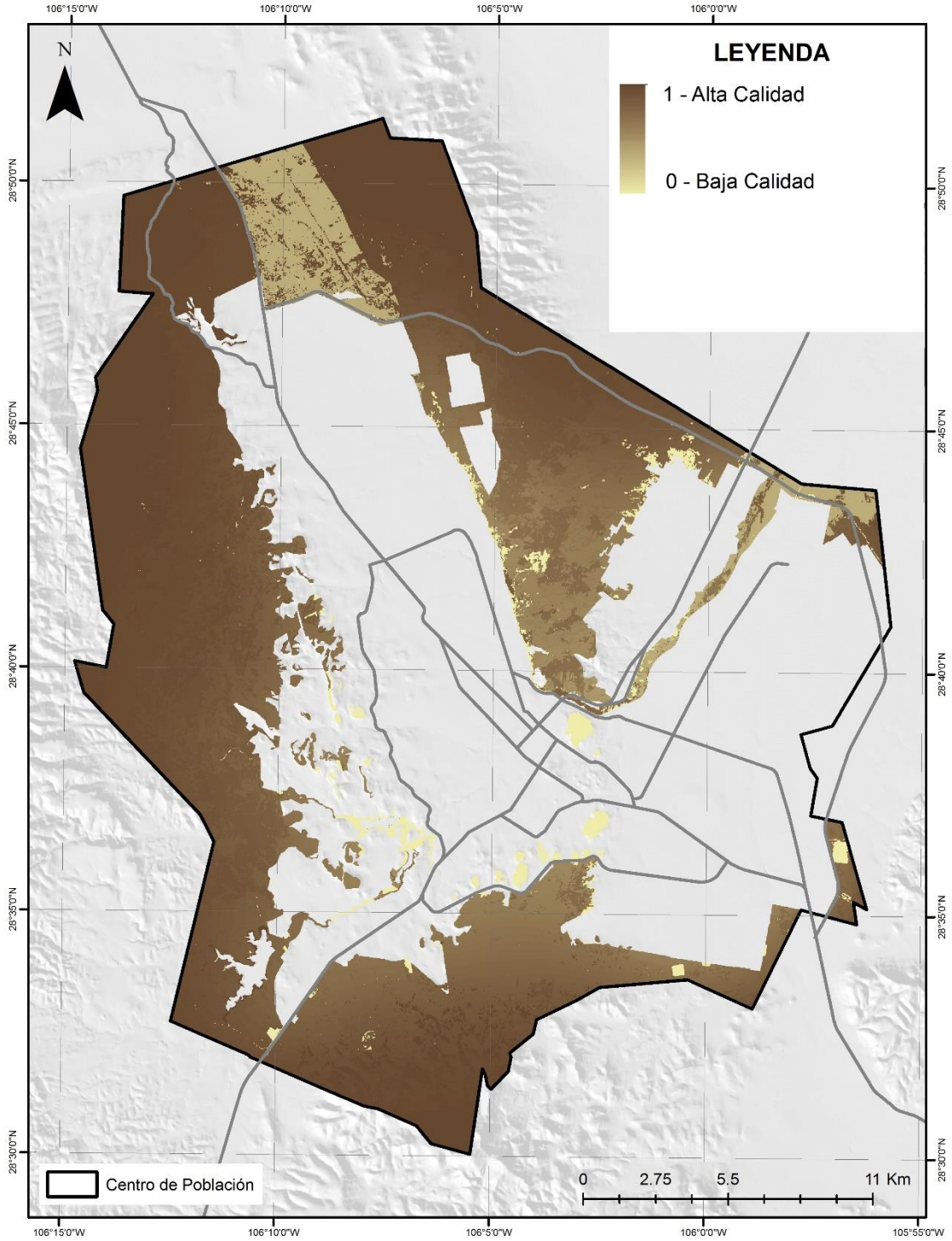


Ilustración 37. Calidad del hábitat de las ANVA y PEP del centro de población. Fuente: Elaboración propia.

Con la información sobre coberturas de suelo/uso de suelo y amenazas, el modelo es capaz de representar explícitamente, de manera espacial, la calidad del hábitat. Esta calidad se correlaciona con la biodiversidad a escala del centro de población de la ciudad de Chihuahua. La amenaza, expresada de una forma espacialmente explicita, es de gran importancia para la gestión ambiental de las ANVA y PEP. Lo anterior debido a que la calidad del hábitat ha recibido poca atención, aún y cuando está contacto con distintas amenazas. Los patrones de calidad del hábitat tienen un carácter espacial y se deben analizar con relación a las amenazas circundantes, así como a su impacto, a la sensibilidad del hábitat a cada amenaza, a las distancias entre los hábitats y a las fuentes de las amenazas (Pert y otros, 2012; Tallis et al., 2010).

La relación entre la calidad del hábitat y los servicios ecosistémicos y se ha debatido ampliamente. Las funciones del ecosistema que son afectadas por la pérdida de calidad del hábitat incluyen a la polinización, la dispersión de semillas, la regulación del clima, el secuestro de carbono, el control de plagas y enfermedades en la agricultura, y otros (MEA, 2005). Esto cobra particular importancia para el caso para los centros de población, donde servicios ecosistémicos como la calidad y cantidad del agua y la conservación de suelo tiene una importancia económica. El concepto de prestación de servicios ecosistémicos justifica la conservación y la restauración de la vegetación nativa (Nelson et al., 2008). La conservación es difícil de justificar si no se demuestra primero los beneficios directos para los seres humanos. El ordenamiento territorial impacta la biodiversidad y la prestación de los servicios ecosistémicos. El cambio de uso de suelo ha alterado la mayor parte del paisaje en muchas partes del mundo; esto ha repercutido en una disminución de la biodiversidad y de los servicios que brindan los ecosistemas (Zhao et al., 2006). El centro de población, está sufriendo una considerable reducción y fragmentación del hábitat. Encontramos que los cambios en el uso del suelo, que están ocurriendo actualmente podrían deteriorar aún más la biodiversidad, principalmente debido a la conversión de matorrales y pastizales (Ilustración 38, 39).



Ilustración 38. Fragmentación de las zonas cerriles correspondientes a Sierra Azul, en el fraccionamiento Bosque Escondido. (28.6731118, -106.158376). Fuente: Elaboración propia.



Ilustración 39. Desmonte en zonas cerriles en Sierra Azul (28.6985, -106.163935). Fuente: Elaboración propia.

10.4 Producción de agua

El rendimiento hídrico es conocido como la diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración en cada cobertura de suelo/uso de suelo. La contribución de cada cuenca al rendimiento hídrico del centro de población es variable a lo largo del territorio (Ilustración 40). El rendimiento de cada subcuenca registró valores alrededor de los 105 m^3/ha, los cuales se representan como zonas en azul claro. Estas zonas corresponden zonas de la sierra de nombre de Dios y Sierra Azul, con rendimientos de hasta 1567.55 m^3/ha (zonas en azul oscuro). La mayor contribución se registró en las zonas este, las cuales se encuentran por el área del aeropuerto de Chihuahua; en el suroeste, por la salida a Delicias; y en la zona norte, ubicada por salida a Juárez. Las sierras de nombre de Dios y Sierra Azul fungen como captadores de agua para la ciudad de Chihuahua.

Los cambios en el ciclo del agua producidos por efecto del centro de población pueden tener implicaciones importantes en la disponibilidad de agua para el centro de población. Con respecto a los servicios ecosistémicos, los cambios en el ciclo del agua vinculados a los cambios en la cobertura de suelo/uso de suelo han reducido la infiltración en las cuencas, lo cual afecta directamente la calidad del servicio ecosistémico de cosecha de agua (Willaarts et al., 2012).

El rendimiento de agua se representa directamente por un flujo natural de la corriente; sin embargo, cabe señalar que el flujo observado en la salida de las cuencas registra un impacto antropogénico. La mayor parte del agua extraída y empleada con fines económicos como la agricultura, la industria y uso doméstico, no vuelve a fluir hacia el río.

Las cuencas mencionadas de las sierras de Nombre de Dios y Sierra Azul requieren una atención especial debido a su sensibilidad. Estas cuencas pueden producir un mayor rendimiento de agua. El cambio en los ecosistemas tiene implicaciones prácticas para los recursos hídricos y los servicios de gestión de los ecosistemas.

La precipitación es la fuente principal de captura de agua. La alteración en el régimen de precipitación, ya sea por remoción de la cobertura vegetal o por efecto

del cambio climático, tiene una influencia fuerte sobre el rendimiento de la captura de agua.

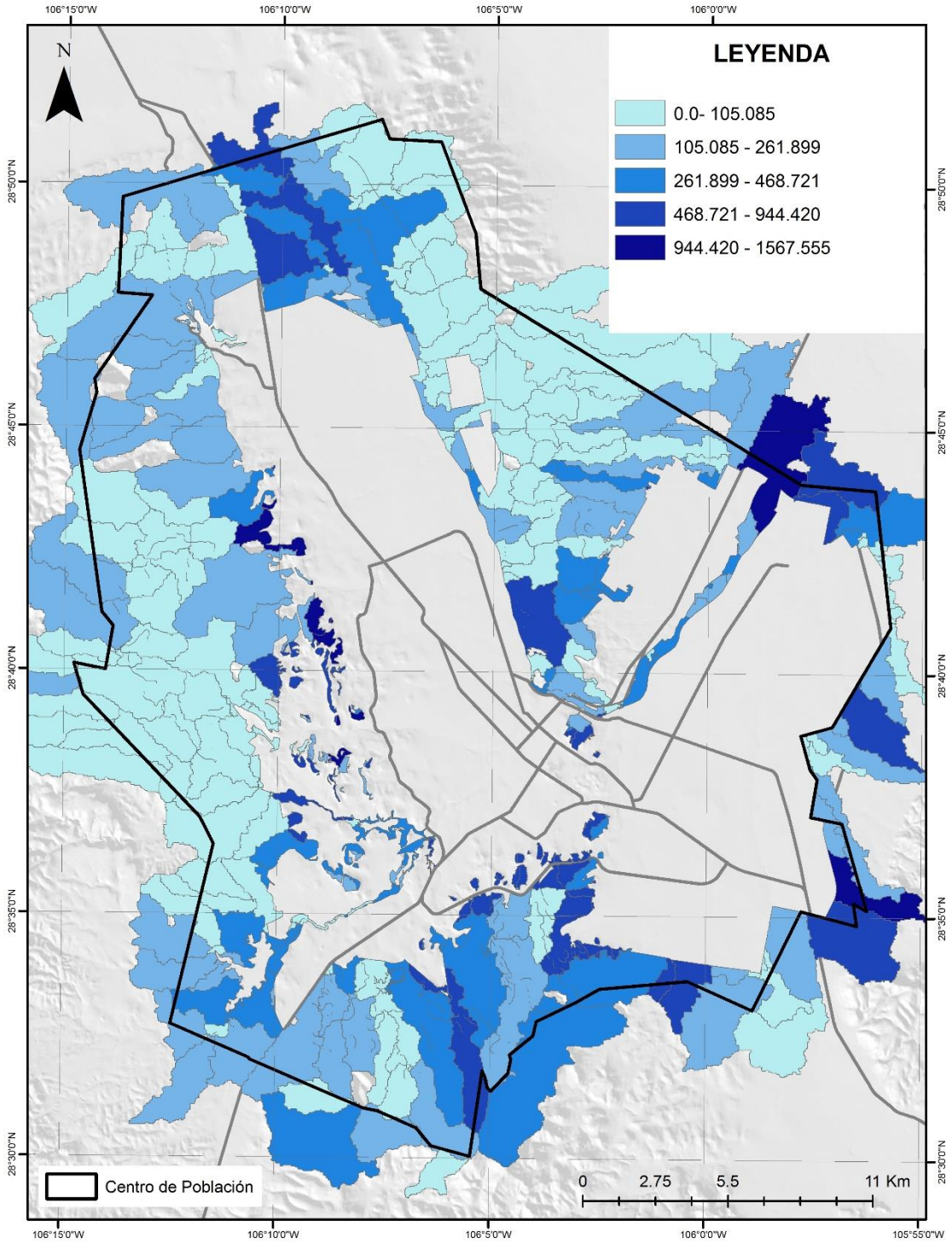


Ilustración 40. Producción de agua en m^3/ha de las ANVA y PEP del centro de población. Fuente: Elaboración propia

10.5 Producción de sedimentos

Los mapas que alimentan el modelo de producción de sedimentos, así como la tabla biofísica se integraron en el programa InVEST. Los resultados fueron analizados con ArcGIS Pro. La Ilustración 41 presenta el mapa de erosión anual del área de estudio, y ayuda a la identificación de las áreas vulnerables en cuanto a la perdida de suelo en el centro de población.

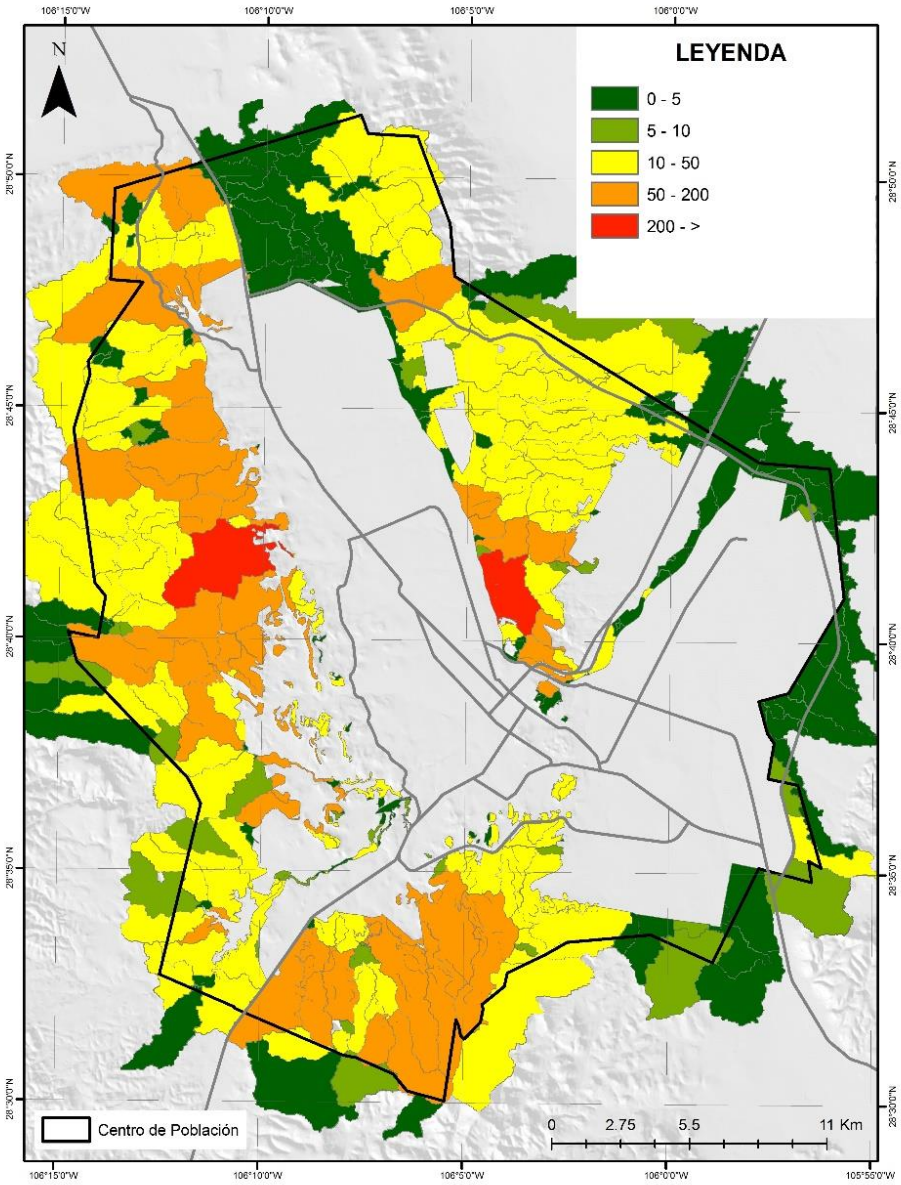


Ilustración 41. Perdida de suelo en ton/ha/año de las ANVA y PEP del centro de población, con un promedio de precipitación de 1979 a 2014. Fuente: Elaboración propia.

La media anual de pérdida de suelo estimada para el conjunto de cuencas varía de las 5 ton/ha/año a las 200 ton/ha/año. Solo una porción del total de partículas erosionadas logra salir de la cuenca y constituyen los sedimentos que arrastran las corrientes de arroyos tributarios y ríos. La Ilustración X muestra como la perdida de suelo se incrementa conforme el borde de la ciudad de Chihuahua se acerca (zonas en color rojo y naranja). Además, el arrastre de estos sedimentos registra un aumento conforme se incrementa la pendiente. El 60% de la superficie de la cuenca registra una pérdida de suelo superior a las 5 ton/ha/año. En la zona sur del centro de población y en el área de Sierra Azul, se tienen los mayores valores de pendiente, lo que se traduce en las zonas con mayor propensión a la perdida de suelo. En la parte sur, en las cercanías a la localidad El Fresno, en los recorridos en campo (Ilustración 42 y 43) se estimaron perdida de suelo altas, al grado de encontrar grandes afloramientos de rocas.



Ilustración 42. Cárcavas[2] en el suelo (28.538896, -106.155531). Fuente: Elaboración propia-

[2] Socavones producidos en rocas y suelos producidos por la avenida de precipitación y la pendiente. Estas cárcavas producen la erosión remontante.



Ilustración 43. Alteraciones en el suelo (28.538896, -106.155531). Fuente: Elaboración propia.

El cambio de cobertura de suelo/uso de suelo de ganadería (Ilustración 44 y 45) da lugar a una degradación de los recursos del suelo, lo cual contribuye a exacerbar los efectos del cambio climático debido a la deforestación de especies maderables y no maderables, así como y el agotamiento del almacén de carbono orgánico en el suelo (Barrera et al., 2018). Debido al cambio de cobertura de suelo/uso de suelo, el cambio climático está modificando directamente el patrón precipitaciones, que implica cambios en los tiempos en que se presentan los eventos de lluvia y sus intensidades. De forma indirecta, el cambio climático afecta la eficiencia en uso del agua de las plantas al alterar la tasa de crecimiento de las mismas y la composición de las especies (Alkharabsheh et al., 2013).



Ilustración 44. Actividad ganadera dentro del centro de población (28.538896, -106.155531). Fuente: Elaboración propia.



Ilustración 45. Exposición de rocas por efecto de la perdida de cobertura vegetal y perdida del suelo (28.538896, -106.155531). Fuente: Elaboración propia.

10.6 Calidad escénica

En general, existe una preferencia de la población de rodearse de paisajes naturales. Esto con fines de recreación y relajación. Estos paisajes proporcionan a las personas una noción sobre la belleza natural (Daniel et al. 2012). La cuantificación de esta belleza natural o escénica capta la calidad de un determinado lugar como fuente de vistas naturales (verdes) a la escala del paisaje, la cual es inhibida por perturbaciones humanas. Ejemplo de su funcionamiento se muestra en la Ilustración 46. Los elementos de perturbación predominantes en el centro de población incluyen la red vial, las localidades y la zona urbana. Todos los datos se integraron en el módulo de calidad escénica en InVEST.

Con respecto a las ANVA y PEP, se tiene un número de 85 vistas posibles (Ilustración 41). En los colores morados de la ilustración se aprecian 85 puntos de vista distintos. Los lugares que pueden ser apreciados con mayor número de vistas son el área de la Sierra de nombre de Dios (Ilustración 47), ubicada al este, el área sur de centro de población, que incluye el cerro Grande, y la parte norte de la Sierra Azul, ubicada al oeste (Ilustración 48).

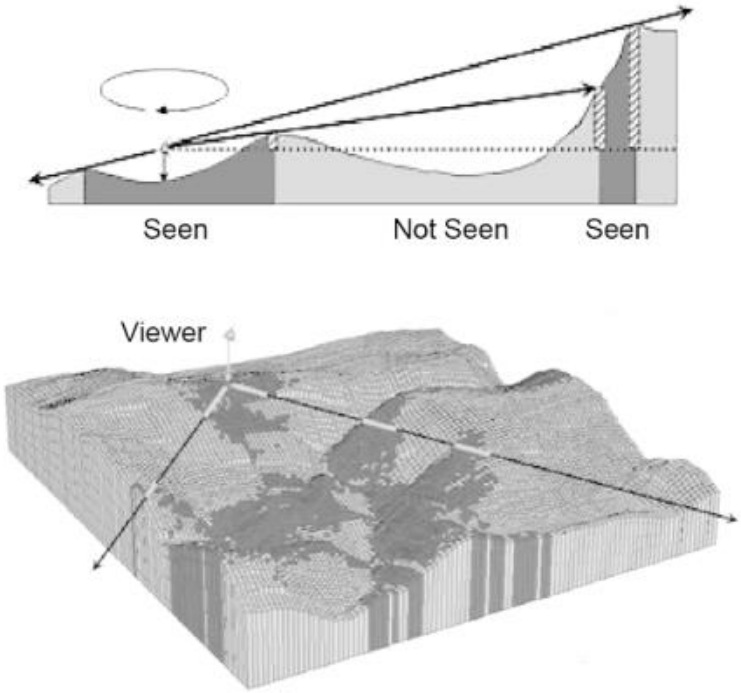


Ilustración 46. Funcionamiento de la herramienta, Calidad escénica desde un punto en el terreno. Áreas visibles (gris oscuro) Áreas no visibles (gris claro). Fuente: Verutes et al., 2014.

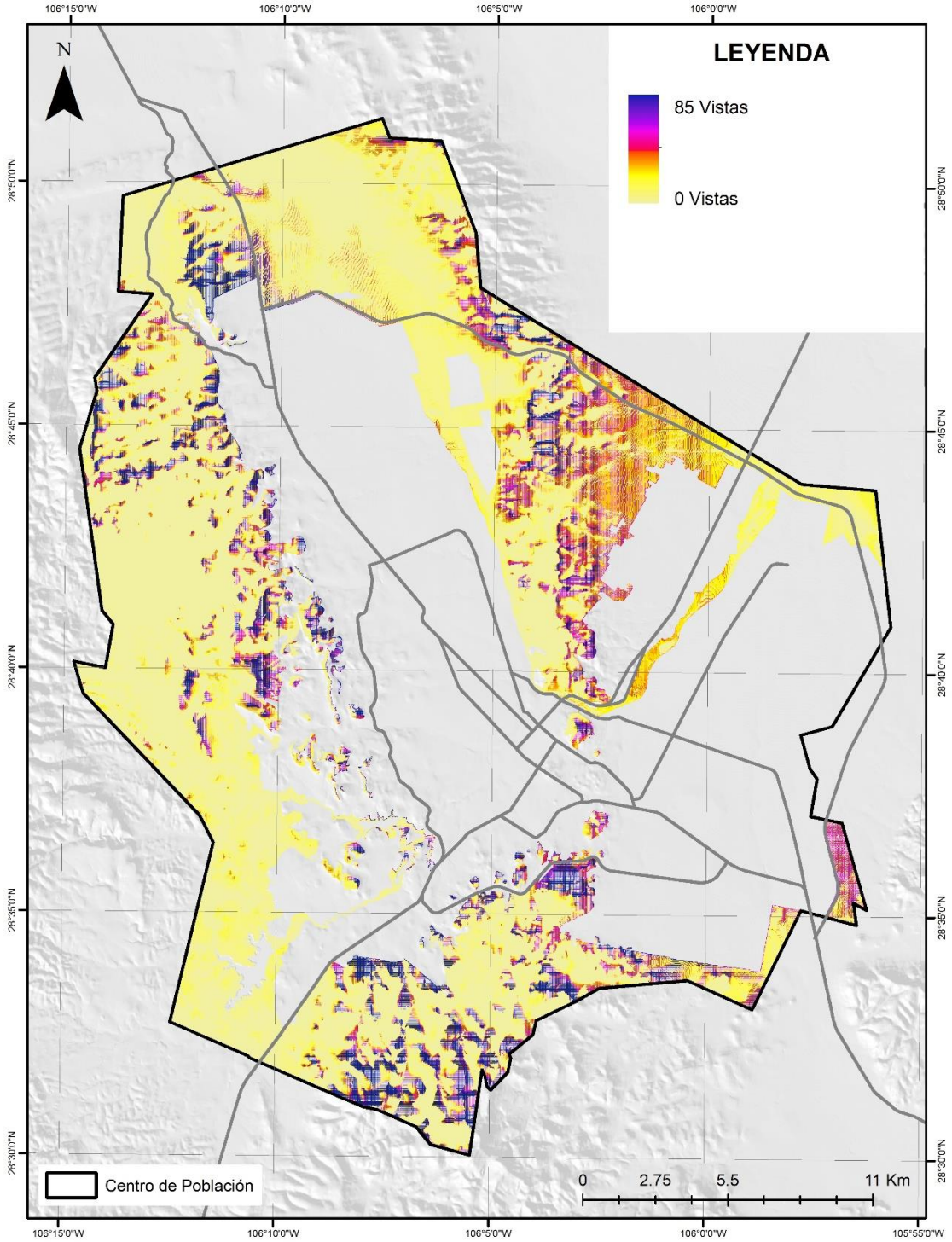


Ilustración 47. Vistas de las ANVA y PEP del centro de población. Fuente: Elaboración propia.



Ilustración 48. Vista de la ciudad de Chihuahua desde la Sierra de Nombre de Dios con dirección este-oeste (28.717387, -106.079787). Fuente: Elaboración propia.



Ilustración 49. Vista del Cañón del Marro (28.722173, -106.172940). Fuente: Elaboración propia.

11. CONCLUSIONES

En este proyecto se mapearon y describieron los servicios ecosistémicos de almacén de carbono, calidad de hábitat, calidad paisajística, perdida de suelo y rendimiento de agua en el centro de población de la ciudad de Chihuahua. Este proyecto, es el primero de su tipo en cuanto a combinar las tecnologías de sistemas de información geográfica en conjunto de los servicios ecosistémicos y su valoración.

Se encontró, que las zonas de las ANVA y PEP con mayores almacenes de carbono se encuentran en la zona sur, en el área de las zonas aledañas al Cerro Grande y Granjas Universitarias. Esta zona, de forma espacial, muestra ser la de mayor calidad del hábitat, con un continuo espacial amplio. También, otra de las zonas que presenta condiciones similares, en cuanto a la cantidad de carbono y calidad del hábitat es la zona de la Sierra Azul, y parte de la Sierra del Mogote. Sin embargo, también se muestra que se encuentran bajo un proceso de erosión moderado a severo.

En las zonas aledañas al Cerro Grande y Granjas Universitarias y la zona de la Sierra Azul, y parte de la Sierra del Mogote, se muestra también que existe el potencial para la producción y almacenamiento de agua, por lo que estas áreas fungen como principales captadores. Adicionalmente, la producción de agua también resalto, que en las zonas inundables del centro de población (área del aeropuerto y salida a delicias-PEMEX), se muestra también una muy alta producción de agua, sin embargo, esto se traduce en zonas potenciales de inundación, por sus pendientes planas y mal drenaje.

Por otro lado, la calidad escénica, mostró las áreas con mayor calidad escénica. Estas zonas, en gran parte coinciden con las ANVA y PEP, pero principalmente, las áreas aledañas al Cerro Grande y Granjas Universitarias y la zona de la Sierra Azul, y parte de la Sierra del Mogote.

En cuanto a la valoración del secuestro de carbono, se trabajo con dos escenarios a 2030, con distintos precios métricos de carbono, y con un descuento y tasa fijas en el precio del mercado del carbono. Ciertamente, el valor social del carbono es complicado y controvertido, debido a las distintas opiniones, precios de

mercado, modelos y cálculos del costo social de almacenamiento de carbono. Para este estudio, se muestran perdidas millonarias en los escenarios con precios métricos de carbono de 50 y 100 dlls, lo que en términos de pesos mexicanos se vuelve enorme. Lo anterior da la pauta, a la posibilidad de generar distintos escenarios, bajo varias políticas de intervención para conocer el costo potencial de continuar modificando la cobertura natural.

La disponibilidad de datos e instrumentos apropiados suele considerarse una cuestión de evaluación de la diversidad biológica y los servicios ecosistémicos. Se ha demostrado que el enfoque espacialmente explicito, fue de utilidad para clasificar el paisaje en función de la calidad del hábitat, almacén y secuestro de carbono, calidad escénica, rendimiento de agua y proporción de entrega de sedimentos. Los datos, instrumentos y modelos espaciales simples y fácilmente disponibles pueden ser útiles para la evaluación, la planificación y la gestión de la conservación.

El análisis, mostró la distribución espacial de los servicios ecosistémicos, así como las implicaciones del crecimiento urbano, por lo que continuar con la misma tendencia de desarrollo no sería lo óptimo en términos de suministro de los servicios ecosistémicos a escala del paisaje. Las alternativas de planificación del uso de del suelo, como la restricción del crecimiento hacia las zonas cerriles podría emplearse para mantener las funciones ambientales de estas zonas. Así también, el establecimiento de zonas de amortiguación fluvial, podrían reducir la cantidad de perdida de suelo. Además, estas medidas aumentan el potencial del paisaje para secuestrar carbono y proporcionar hábitats adecuados para una variedad de especies vegetales y animales.

12. LECCIONES APRENDIDAS

Dentro de las lecciones aprendidas durante el desarrollo del proyecto, se puede mencionar que 1) la tenencia de la tierra es uno de los principales obstáculos para llevar a cabo investigación en áreas naturales. Una gran cantidad de puertas cerradas y vigilancia por parte de la población estuvo presente en el desarrollo del trabajo en campo, por lo que no todas las áreas naturales pudieron ser analizadas, 2) las áreas naturales se encuentran bajo una enorme contaminación en todas las direcciones, con desechos domésticos, de fábricas, escombro, siendo focos de infección presentes en matorrales y pastizales, 3) la fragmentación del paisaje es evidente y se muestra en las fotografías aéreas, rompiendo el continuo de la vegetación, 4) en las zonas de la periferia, en especial en el sur, se muestra un alto riesgo de la población, expuestos a una carente infraestructura, con ubicación en zonas cercanas a cauces de arroyos y con grandes cantidades de basura, propiciando condiciones de insustentabilidad territorial (Ver Anexo Fotográfico, Ilustración 55).

13. CONTINUIDAD

En aras de los resultados aquí expuestos, es necesario continuar con el monitoreo del crecimiento urbano sobre las ANVA y PEP, así como continuar evaluando el estado de salud de los ecosistemas de matorrales, pastizales, bosque de mezquites, y sus respectivas asociaciones. Lo anterior será de utilidad para ver el cambio en los servicios ambientales del centro de población de la ciudad de Chihuahua. Análisis de fragmentación, así como utilizar indicadores de abundancia, frecuencia, dominancia, índices de diversidad, de equidad, entre otros, serían de gran utilidad para un conocimiento de la flora más profundo.

14. AGRADECIMIENTOS

El autor, agradece al Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua por la posibilidad de desarrollar la investigación aquí mostrada, como una primera aproximación y línea base de la cuantificación y valoración de servicios ecosistemicos.

15. REFERENCIAS

Abell, R. (2002). Conservation biology for the biodiversity crisis: a freshwater follow-up. Conservation Biology, 16(5), 1435-1437.

Adam, E., Mutanga, O., Odindi, J., & Abdel-Rahman, E. M. (2014). Land-use/cove classification in a heterogeneous coastal landscape using RapidEye imagery: evaluating the performance of random forest and support vector machines classifiers. International Journal of Remote Sensing, 35(10), 3440-3458.

Alkharabsheh, M. M., Alexandridis, T. K., Bilas, G., Misopolinos, N., & Silleos, N. (2013). Impact of land cover change on soil erosion hazard in northern Jordan using remote sensing and GIS. Procedia Environmental Sciences, 19, 912-921.

Arnone, E., Pumo, D., Francipane, A., La Loggia, G., & Noto, L. V. (2018). The role of urban growth, climate change, and their interplay in altering runoff extremes. Hydrological processes, 32(12), 1755-1770.

Barrera, J., Pacheco, O. R., Sánchez, C. D., & Unda, S. B. (2018, July). Variabilidad del almacenamiento del carbono en suelos cultivados con cacao en la provincia El Oro. In Conference Proceedings (Vol. 2, No. 2).

Butsic, V., Shapero, M., Moanga, D., & Larson, S. (2017). Using InVEST to assess ecosystem services on conserved properties in Sonoma County, CA. California Agriculture, 71(2), 81-89.

Chan, K. M., Hoshizaki, L., & Klinkenberg, B. (2011). Ecosystem services in conservation planning: targeted benefits vs. co-benefits or costs?. PloS one, 6(9), e24378.

Chavez Jr, P. S. (1988). An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. Remote sensing of environment, 24(3), 459-479.

Chirino, E., Bonet, A., Bellot, J., & Sánchez, J. R. (2006). Effects of 30-year-old Aleppo pine plantations on runoff, soil erosion, and plant diversity in a semi-arid landscape in south eastern Spain. Catena, 65(1), 19-29.

Congedo L. 2017. Semi-Automatic Classification Plugin for QGIS. Technical Report. Sapienza University, ACC Dar

Congreso de la Union. 2018. Ley General de Equilibrio Ecologico y la Protección al Medio Ambiente. Artículo 23, Fracción III.

Cortés, H. 1991. Caracterización de la erosividad de la lluvia en México utilizando métodos multivariados (Vol. Tesis de Maestría en Ciencias). México: Colegio de Postgraduados.

Costanza, R., y Folke, C. (1997). Valuing ecosystem services with efficiency, fairness and sustainability as goals. Nature's services: Societal dependence on natural ecosystems, 49-70.

Czech, B., Krausman, P. R., & Devers, P. K. (2000). Economic associations among causes of species endangerment in the United States: associations among causes of species endangerment in the United States reflect the integration of economic sectors, supporting the theory and evidence that economic growth proceeds at the competitive exclusion of nonhuman species in the aggregate. BioScience, 50(7), 593-601.

Daniel, T. C., Muhar, A., Arnberger, A., Aznar, O., Boyd, J. W., Chan, K. M., & Grêt-Regamey, A. (2012). Contributions of cultural services to the ecosystem services agenda. Proceedings of the National Academy of Sciences, 109(23), 8812-8819.

Gentine, P., D'Odorico, P., Lintner, B. R., Sivandran, G., & Salvucci, G. (2012). Interdependence of climate, soil, and vegetation as constrained by the Budyko curve. Geophysical Research Letters, 39(19).

Gobierno de México. (2019). Plan Nacional de Desarrollo 2019-2024.

Gobierno del Estado de Chihuahua. (2017). Plan Estatal de Desarrollo 2017-2021.

Gobierno Municipal de Chihuahua. (2018). Plan Municipal de Desarrollo 2018-2021.

Gómez-Baggethun, E., & Barton, D. N. (2013). Classifying and valuing ecosystem services for urban planning. Ecological economics, 86, 235-245.

Hák, T., Janoušková, S., & Moldan, B. (2016). Sustainable Development Goals: A need for relevant indicators. Ecological Indicators, 60, 565-573.

Hamel, P., Chaplin-Kramer, R., Sim, S., & Mueller, C. (2015). A new approach to modeling the sediment retention service (InVEST 3.0): Case study of the Cape Fear catchment, North Carolina, USA. Science of the Total Environment, 524, 166-177.

Harmáčková, Z. V., & Vačkář, D. (2015). Modelling regulating ecosystem services trade-offs across landscape scenarios in Třeboňsko Wetlands Biosphere Reserve, Czech Republic. Ecological Modelling, 295, 207-215.

He, J., Huang, J., & Li, C. (2017). The evaluation for the impact of land use change on habitat quality: A joint contribution of cellular automata scenario simulation and habitat quality assessment model. Ecological Modelling, 366, 58-67.

IMPLAN (Instituto Municipal Planeación del Municipio de Chihuahua) (2026). Datos Abiertos, Cartografía - Zonificación Primaria 2016. Dispinible en https://implanchihuahua.org/Descargables_DA.html

Ito, A. (2005). Climate-related uncertainties in projections of the twenty-first century terrestrial carbon budget: off-line model experiments using IPCC greenhouse-gas scenarios and AOGCM climate projections. Climate Dynamics, 24(5), 435-448.

Jiang, W., Deng, Y., Tang, Z., Lei, X., y Chen, Z. (2017). Modelling the potential impacts of urban ecosystem changes on carbon storage under different scenarios by linking the CLUE-S and the InVEST models. Ecological Modelling, 345, 30-40.

Kija, H. K., Ogutu, J. O., Mangewa, L. J., Bukombe, J., Verones, F., Graae, B., ... & Nzunda, E. F. (2020). Spatio-Temporal Changes in Wildlife Habitat Quality in the Greater Serengeti Ecosystem. Sustainability, 12(6), 2440.

Kroll, F., Müller, F., Haase, D., y Fohrer, N. (2012). Rural–urban gradient analysis of ecosystem services supply and demand dynamics. Land use policy, 29(3), 521-535.

Lal, M., & Mishra, S. K. (2015). Characterization of surface runoff, soil erosion, nutrient loss and their relationship for agricultural plots in India. Current World Environment, 10(2), 593.

Larondelle, N., & Haase, D. (2013). Urban ecosystem services assessment along a rural urban gradient: A cross- analysis of European cities. Ecological Indicators, 29, 179-190.

Lawler, J. J., Lewis, D. J., Nelson, E., Plantinga, A. J., Polasky, S., Withey, J. C., ... & Radeloff, V. C. (2014). Projected land-use change impacts on ecosystem services in the United States. Proceedings of the National Academy of Sciences, 111(20), 7492-7497.

Li, F., Wang, L., Chen, Z., Clarke, K. C., Li, M., & Jiang, P. (2018). Extending the SLEUTH model to integrate habitat quality into urban growth simulation. Journal of environmental management, 217, 486-498.

Lillesand, T., Kiefer, R. W., & Chipman, J. (2015). Remote sensing and image interpretation. John Wiley & Sons.

Liu, C., & Li, X. (2012). Carbon storage and sequestration by urban forests in Shenyang, China. Urban Forestry & Urban Greening, 11(2), 121-128.

Ludwig, J. A., Reynolds, J. F., & Whitson, P. D. (1975). Size-biomass relationships of severa Chihuahuan desert shrubs. American Midland Naturalist, 451-461.

Ludwig, J. A., Reynolds, J. F., & Whitson, P. D. (1975). Size-biomass relationships of several Chihuahuan desert shrubs. *American Midland Naturalist*, 451-461.

Lyu, R., Zhang, J., & Xu, M. (2018). Integrating ecosystem services evaluation and landscape pattern analysis into urban planning based on scenario prediction and regression model. Chinese Journal of Population Resources and Environment, 16(3), 252-266.

Martinez-Salvador, M., Hermosillo-Rojas, D.E., Mojica-Guerrero, A.S., Prieto-Amparan, J.A. 2015. Potencial Productivo Y Zonificación Para El Uso Y Manejo De Especies Forestales De Zonas Áridas. INIFAP. Centro de Investigación Regional Norte, Aldama, Chihuahua.

Millenium Ecosystem Assessment. 2005. Ecosystems and Human Well-being: Biodiversity Synthesis. World Resources Institute. Millennium.

Monteiro Junior, J. J., Silva, E. A., De Amorim Reis, A. L., & Mesquita Souza Santos, J. P (2019). Dynamical spatial modeling to simulate the forest scenario in Brazilian dry forest landscapes. Geology, Ecology, and Landscapes, 3(1), 46-52.

Moreno, J.A. Sistemas y Análisis de la Información Geográfica. Manual de Autoaprendizaje con ArcGIS, 2nd ed.; Ra-Ma: Madrid, Spain, 2008; p. 908. ISBN 978-84-7897-838-0.

Naciones Unidas (2018), La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe (LC/G.2681-P/Rev.3), Santiago

Nelson, S. M., & Wydoski, R. (2008). Riparian Butterfly (Papilionoidea and Hesperioidea) Assemblages Associated with Tamarix-Dominated, Native Vegetation–Dominated, and Tamarix Removal Sites along the Arkansas River, Colorado, USA. Restoration Ecology, 16(1), 168-179.

Olmedo, M. T. C., Paegelow, M., Mas, J. F., & Escobar, F. (Eds.). (2018). Geomatic approaches for modeling land change scenarios. Springer International Publishing.

Pearce, H. G., Anderson, W. R., Fogarty, L. G., Todoroki, C. L., & Anderson, S. A. J. (2010). Linear mixed- effects models for estimating biomass and fuel loads in shrublands. Canadian Journal of Forest Research, 40(10), 2015-2026.

Petrolog. Influence of Discount Rate on the Predicted Price of Carbon. Disponible en: https://petrolog.typepad.com/climate_change/2007/08/influence-of-discount-rate-on-the-predicited-price-of-carbon.html

Piao, S., Fang, J., Zhou, L., Tan, K., & Tao, S. (2007). Changes in biomass carbon stock in China's grasslands between 1982 and 1999. Global biogeochemical cycles, 21(2).

Project: Rome, Italy. Available at https://media.readthedocs.org/pdf/semiautomaticclassificationmanual-v3/latest/semiautomaticclassificationmanual-v3.pdf

Reed, M. S., Stringer, L. C., Dougill, A. J., Perkins, J. S., Atlhopheng, J. R., Mulale, K., & Favretto, N. (2015). Reorienting land degradation towards sustainable land management: Linking sustainable livelihoods with ecosystem services in rangeland systems. Journal of environmental management, 151, 472-485.

Renner, I. 2019. Integración de los servicios ecosistémicos en la planificación y gestión urbana. Un enfoque sistemático en pasos para profesionales. SEDATU, Ciudad de México.

Requena-Mullor, J. M., Quintas-Soriano, C., Brandt, J., Cabello, J., & Castro, A. J. (2018). Modeling how land use legacy affects the provision of ecosystem services in Mediterranean southern Spain. Environmental Research Letters, 13(11), 114008.

Rodriguez-Galiano, V. F., Chica-Olmo, M., Abarca-Hernandez, F., Atkinson, P. M., Jeganathan, C. (2012a). Random Forest classification of Mediterranean land cover using multi-seasonal imagery and multi-seasonal texture. Remote Sensing of Environment, 121, 93-107.

Rodriguez-Galiano, V. F., Ghimire, B., Rogan, J., Chica-Olmo, M., & Rigol-Sanchez, J. P. (2012b). An assessment of the effectiveness of a random forest classifier for land-cover classification. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 67, 93-104.

Ruiz Hernandez, I. E., & Shi, W. (2018). A Random Forests classification method for urba land-use mapping integrating spatial metrics and texture analysis. International journal of remote sensing, 39(4), 1175-1198.

Segoli, M., Ungar, E. D., & Shachak, M. (2008). Shrubs enhance resilience of a semi-arid ecosystem by engineering and regrowth. Ecohydrology: Ecosystems, Land and Water Process Interactions, Ecohydrogeomorphology, 1(4), 330-339.

SEMARNAT (Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales). (2020). Agenda de transiciones ambientales de la Cuarta Transformación.

Sharp, R., Tallis, H. T., Ricketts, T., Guerry, A. D., Wood, S. A., Chaplin-Kramer, R., ... & Vigerstol, K. (2018). InVEST 3.4. 4 User's Guide. The Natural Capital Project.

Soares-Filho, B. S., Cerqueira, G. C., & Pennachin, C. L. (2002). DINAMICA—a stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in an Amazonian colonization frontier. Ecological modelling, 154(3), 217-235.

Sousa, S., Caeiro, S., & Painho, M. (2002). Assessment of map similarity of categorical maps using Kappa statistics. ISEGI, Lisbon.

Sulistyawan, B. S., Eichelberger, B. A., Verweij, P., Rene'GA, B., Hardian, O., Adzan, G., & Sukmantoro, W. (2017). Connecting the fragmented habitat of endangered mammals in the landscape of Riau–Jambi–Sumatera Barat (RIMBA), central Sumatra, Indonesia (connecting the fragmented habitat due to road development). Global Ecology and Conservation, 9, 116-130.

Sun, X., Jiang, Z., Liu, F., & Zhang, D. (2019). Monitoring spatio-temporal dynamics of habitat quality in Nansihu Lake basin, eastern China, from 1980 to 2015. Ecological Indicators, 102, 716-723.

Sutton, P. C., Anderson, S. J., Costanza, R., & Kubiszewski, I. (2016). The ecological economics of land degradation: Impacts on ecosystem service values. Ecological Economics, 129, 182-192.

Team, R. C. (2017). R Core Team (2017). R: A language and environment for statistical computing. R Found. Stat. Comput. Vienna, Austria.

Ten Brink, P. (Ed.). (2011). The economics of ecosystems and biodiversity in national and international policy making. Routledge.

Terrado, M., Sabater, S., Chaplin-Kramer, B., Mandle, L., Ziv, G., & Acuña, V. (2016). Model development for the assessment of terrestrial and aquatic habitat quality in conservation planning. Science of the total environment, 540, 63-70.

Turc, L. 1954. Le bilan d'eau des sols: Relations entre les précipitations, l'évaporation et l'écoulement. Annales Agronomiques5:491–595.

USGS (United States Geological Survey). Landsat missions. Disponible en https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat/landsat-8?qt-science_support_page_related_con=0#qt-science_support_page_related_con

USGS. Lansdat Missions, Landsat 8. Disponible en https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat/landsat-8?qt-science_support_page_related_con=0#qt-science_support_page_related_con (Consultado en febrero de 2020)

Wang, J., Zhou, W., Pickett, S. T., Yu, W., & Li, W. (2019). A multiscale analysis of urbanization effects on ecosystem services supply in an urban megaregion. Science of the Total Environment, 662, 824-833.

Willaarts, B. A., Volk, M., & Aguilera, P. A. (2012). Assessing the ecosystem services supplied by freshwater flows in Mediterranean agroecosystems. Agricultural Water Management, 105, 21-31.

Willemen, L., Crossman, N. D., Quatrini, S., Egoh, B., Kalaba, F. K., Mbilinyi, B., & de Groot, R. (2018). Identifying ecosystem service hotspots for targeting land degradation neutrality investments in south-eastern Africa. Journal of arid environments, 159, 75-86.

Wood, S. L., Jones, S. K., Johnson, J. A., Brauman, K. A., Chaplin-Kramer, R., Fremier, A. y Mulligan, M. (2018). Distilling the role of ecosystem services in the Sustainable Development Goals. Ecosystem services, 29, 70-82.

Zhao, S., Peng, C., Jiang, H., Tian, D., Lei, X., & Zhou, X. (2006). Land use change in Asia and the ecological consequences. Ecological Research, 21(6), 890-896.

16. GLOSARIO

Áreas Naturales de Valor Ambiental (ANVA)

Cambio de cobertura de suelo/uso de suelo (CCSUS)

Cobertura de suelo/uso de suelo (CSUS)

Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs (InVEST)

Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA)

Millenium Ecoisystem Assesment (MEA)

Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)

Servicios ecosistemicos (SE)

The Economics of Ecosystems and Biodiversity (TEEB)

Preservación Ecológicas Primaria (PEP)

ANEXO FOTOGRÁFICO



Ilustración 50. Avenida Equs, problema de tenencia de la tierra. Espacios desconectados en el área urbana.



Ilustración 51. Avenida Equs, problema de tenencia de la tierra. Espacios desconectados en el área urbana, focos de inseguridad y desecho de basura.



Ilustración 52. Vista aérea del pasivo ambiental Avalos.



Ilustración 53. Vista aérea del pasivo ambiental Avalos.



Ilustración 54. Modificación de las zonas cerriles de Sierra Azul.



Ilustración 55. Vista de la ciudad de Chihuahua con dirección oeste-este.



Ilustración 56. Modificación de las zonas cerriles de Sierra Azul.



Ilustración 57. Remoción de la cobertura vegetal en zonas cerriles aledañas a la localidad La Haciendita.



Ilustración 58. Remoción de la cobertura vegetal en zonas cerriles aledañas a la localidad La Haciendita.



Ilustración 59. Modificación del terreno en zonas cerriles aledañas la colonia Ladrillera al sur de la ciudad.



Ilustración 60. Contaminación y exposición de la población a cables de alta tensión. Adicionalmente, zona de riesgo por el material de los hogares.



Ilustración 61. Relleno sanitario.



Ilustración 62. Cauce de arroyo en las inmediaciones del relleno sanitario.



Ilustración 63. Acumulación de basura en terrenos desprovistos de vegetación.



Ilustración 64. Crecimiento disperso y con riesgo potencial de desborde de arroyo.



Ilustración 65. Crecimiento disperso al sur de la ciudad.



https://implanchihuahua.org/

C. Victoria No. 14, Col. Centro. C.P. 31000

Chihuahua, Chih. México.