

Estudio: *Evaluación de la vulnerabilidad ambiental que presenta el suelo de conservación por la pérdida de servicios ecosistémicos a consecuencia del cambio de uso de suelo*

INFORME FINAL

PRIMERA SECCION

Noviembre 30, 2010

PRESENTACIÓN

Con la finalidad de facilitar la visualización del contenido y organización del **Informe Final**, la presentación de esta **primera sección** comienza con la tabla del Índice de Contenido:

SECCIÓN	ENTREGABLES
Primera sección	Análisis sobre los sitios de mayor aportación de servicios ambientales en términos de almacén de carbono e infiltración Integración de la información colectada en campo, con la ya existente sobre la cuantificación del almacén de carbono e infiltración.
Segunda sección	Diagnóstico general de las condiciones que se presentan en los sitios analizados. Mapa de zonificación de los sitios con mayor aportación de servicios ambientales
Tercera sección	Modelo utilizado para la evaluación del cambio de uso de suelo (selección de variables o categorías) así como la cartografía resultante (imágenes de satélite clasificadas, procesadas). Mapa de zonas con los cambios de uso de suelo más drásticos.
Cuarta sección	Análisis de la vulnerabilidad ambiental que presentan algunas zonas del suelo de conservación en relación a la pérdida de servicios ecosistémicos. Modelo de ponderación de la vulnerabilidad de los sitios. Mapa de vulnerabilidad ambiental del suelo de conservación en relación a la pérdida de servicios ecosistémicos por cambio de uso de suelo.

Respecto al contenido de los entregables de esta **Primera sección**, se tiene que:

Entregable: *Análisis sobre los sitios de mayor aportación de servicios ambientales en términos de almacén de carbono e infiltración*

Incluye en documentos por separado las metodologías denominadas:

- *Ubicación y análisis de los sitios más relevantes para la infiltración; y*
- *Estudio sobre la dimensión del carbono almacenado en la biomasa aérea.*

También incluye los análisis de los resultados de la aplicación de estas metodologías, en documentos por separado que se denominan:

- *Análisis sobre los sitios de mayor aportación de servicios ambientales en términos de almacén de carbono; y*

- *Análisis sobre los sitios de mayor aportación de servicios ambientales en términos infiltración.*

Y ambos análisis de resultados van acompañados de:

- *La cartografía en digital en materia de carbono e infiltración, respectivamente;*

Cabe destacar la relevancia de esta cartografía por contener los resultados del análisis espacial de los servicios ecosistémicos a *nivel de pixel* que es insumo para su expresión en áreas de captación; y estos resultados son de la mayor relevancia al constituir un instrumento muy útil para la gestión territorial puntual (esencialmente derivada de los procesos de atención a denuncias), ya que brinda información cuantitativa a *nivel de pixel* lo cual permite valorar la afectación en forma consistente.

Entregable: *Integración de la información colectada en campo, con la ya existente sobre la cuantificación del almacén de carbono e infiltración.*

Se presenta un documento bajo el mismo nombre, donde se da cuenta en forma breve de cómo se realizó la integración de esta información, cuyo referente principal es el referido estudio del INIFAP, comentado en la Presentación de este Informe Final.

- *Integración de la información colectada en campo, con la ya existente sobre la cuantificación del almacén de carbono e infiltración.*

Estudio: *Evaluación de la vulnerabilidad ambiental que presenta el suelo de conservación por la pérdida de servicios ecosistémicos a consecuencia del cambio de uso de suelo*

INFORME FINAL: **PRIMERA SECCION**

Integración de la información colectada en campo, con la ya existente sobre la cuantificación del almacén de carbono e infiltración

Noviembre 30, 2010

También de acuerdo a los Términos de Referencia del convenio entre PAOT y CENTRO GEO que ampara el proyecto denominado *“Evaluación de la vulnerabilidad ambiental que presenta el suelo de conservación por la pérdida de servicios ecosistémicos a consecuencia del cambio de uso de suelo”*, y en respuesta al siguiente objetivo específico acordado en los Términos de Referencia:

“Ubicar los sitios que tienen una mayor aportación de servicios ecosistémicos en materia de almacén de carbono e infiltración a partir de la información generada en el “Estudio del estatus del derecho de los habitantes del D.F. a gozar de áreas verdes urbanas”, realizado durante el 2009.”¹

A continuación se presentan en forma sintética este proceso de integración de información, destacando la incorporación de la información generada por el mencionado estudio realizado por INIFAP bajo la conducción de la PAOT.

Para una revisión más detallada ver las metodologías respectivas denominadas *Ubicación y análisis de los sitios más relevantes para la infiltración y Estudio sobre la dimensión del carbono almacenado en la biomasa aérea*, que forman parte del producto final de este proyecto.

¹ En el Plan de Trabajo se precisa el nombre del proyecto que ampara el estudio de INIFAP: *“Estimación de captura de carbono e infiltración como indicadores del estatus del derecho de los habitantes del DF a gozar de áreas verdes adecuadas para su desarrollo, salud y bienestar”*; y también se precisa que este proyecto generó datos de campo levantados por el INIFAP.

INFILTRACIÓN: integración de información²

La información geográfica requerida para definir aptitudes a infiltración consiste de cartografía sobre suelos, precipitación, cobertura terrestre, permeabilidad geología y un modelo digital de elevación (MED) para definir el sistema de conectividad hidrológica superficial y el paisaje topográfico.

El MED disponible proviene de la misión SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) y se reprocesó para obtenerlo a una resolución de 30 m.

El mapa de precipitaciones se genera a partir de una interpolación adecuada de los datos provenientes de las estaciones en campo. Y permite generar una capa de valores de lluvia en promedio diario multianual (30 años) para la época cuando la lluvia se considera bien establecida (junio a septiembre).

En la versión anterior (finales de diciembre de 2007) del modelo de aptitudes a infiltración se consideraron las lluvias diarias en promedio multianual (30 años) para un mes de precipitaciones intensas (septiembre). La razón de este cambio consiste en que se considera que las lluvias promedio y no las intensas son las que pueden generar en mayor medida el proceso de infiltración. Por su parte las muy intensas tienden mayormente a generar escorrentías.

El mapa de permeabilidad de suelos (grupos hidrológicos de suelo) se obtuvo de la digitalización de las cartas del INEGI de acuerdo a la clasificación de la FAO (Food and Agriculture Organization). Esta capa es la que se complementa con las mediciones de permeabilidad de suelos efectuada por INIFAP (ver objetivo específico, antes referido).

El mapa de permeabilidad geológica (ilustración 1) se obtuvo de Mooser (2002).

² Acorde con la metodología para identificar los sitios más importantes por su cualidad para la infiltración.

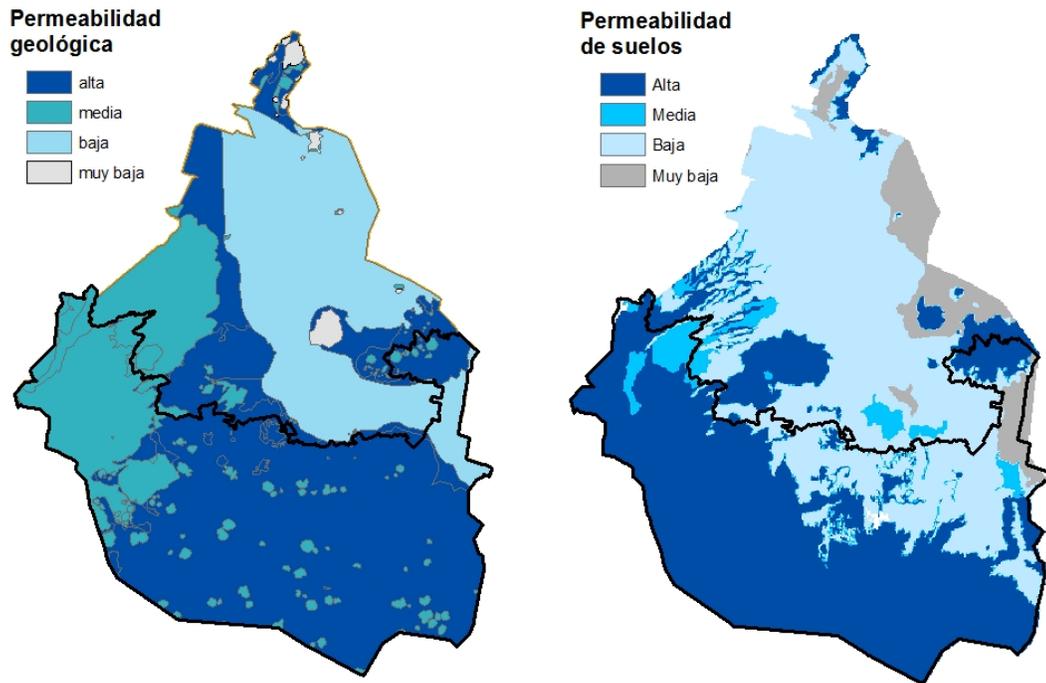


Ilustración 1: Permeabilidad geológica (Mooser 2002, izquierda) y Permeabilidad de suelos de acuerdo a una clasificación de grupos hidrológicos de suelos (obtenida a partir de análisis de la carta de suelos de INEGI, derecha).

El método del número de curva se basa en parte en la definición de coberturas del terreno que se realiza mediante la clasificación de imágenes satelitales de 2010 (Landsat 5 o Spot); el 2010 será el año de referencia para la determinación de las zonas de infiltración.

En cuanto a las mediciones que se hicieron entre INIFAP y PAOT no son precisamente mediciones de infiltración, sino de niveles de permeabilidad de suelos, aunque efectivamente al aparato se le denomina Infiltrómetro, ya que funciona en los términos de la infiltración hortoniana (decrecimiento de la capacidad de infiltración en función del tiempo, Horton 1933).

La explicación de esto radica en que la medición de infiltración como proceso real (no como proceso simulado y con condiciones controladas) requiere de hacerse en condiciones naturales con lluvia y acumulación de escorrentías proveniente de otras superficies, considerando la configuración física de la cuenca y otros factores

como la vegetación presente que constituye el primer obstáculo para que el agua fluya a través del suelo, tomando en cuenta además intercepción y evapotranspiración.

El fenómeno es un tanto más complejo que el solo considerar el paso del agua a través del suelo en condiciones no saturadas. El valor medido es como un valor potencial de infiltración que no siempre es posible alcanzar por eso podría llamársele capacidad máxima de infiltración o permeabilidad de suelos. Por ejemplo si no hay precipitación suficiente o si no se acumula agua proveniente de otras áreas aunque el valor de permeabilidad de suelos sea alto, la infiltración no se producirá.

Lo anterior no quiere decir que no sea un valor importante y una determinación muy valiosa, todo lo contrario es un aspecto muy importante para refinar y enriquecer el modelo cualitativo, que igualmente aunque perfectible, si considera mejor la complejidad del fenómeno.

En este sentido, toda la integración de información también contempló el refinamiento de la capa de permeabilidad de suelos (grupos hidrológicos de suelos) que no solo considerará los tipos de suelos y sus texturas, tal como se tenía antes, sino además los resultados de las 51 mediciones de puntos de infiltración realizadas por la PAOT e INIFAP.

En otras palabras, esta capa no solo considera los tipos de suelos y sus texturas, tal como se tenía antes, sino además los resultados de las 51 mediciones de puntos de infiltración (permeabilidad) realizadas por la INIFAP y PAOT.

Estas mediciones se interpolan mediante kriging ordinario para generar una superficie continua de esta variable en la zona de estudio que se combina con las demás variables espaciales que conforman el modelo cartográfico (ilustración 2).

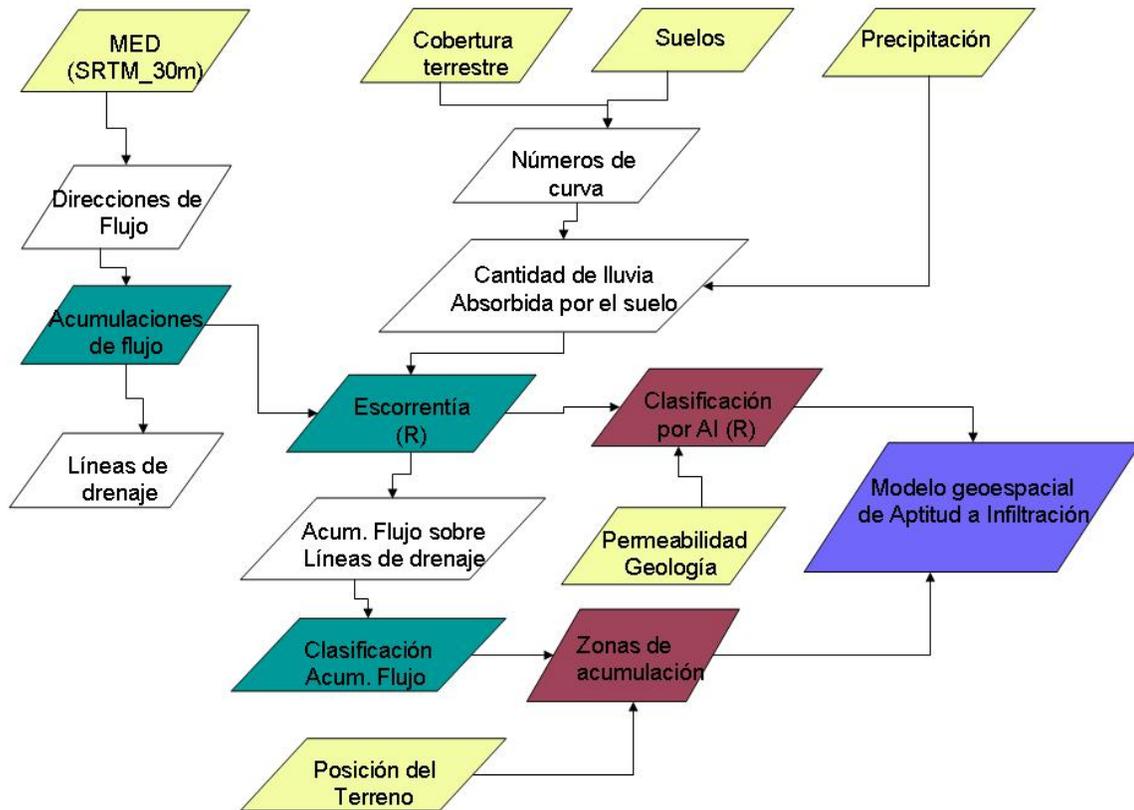


Ilustración 2: Modelo cartográfico para la estimación de aptitudes a infiltración

Otros refinamientos adicionales al modelo anterior son la inclusión de valores de lluvia en promedio diario multianual (30 años) para la época cuando la lluvia se considera bien establecida (junio a septiembre). En la versión anterior (finales de diciembre de 2007) del modelo de aptitudes a infiltración se consideraron las lluvias diarias en promedio multianual (30 años) para un mes de precipitaciones intensas (septiembre). La razón de este cambio consiste en que se considera que las lluvias promedio y no las intensas son las que pueden generar el proceso de infiltración. Por su parte las muy intensas tienden a generar escorrentías en mayor medida.

Actualización de la capa de uso y cobertura de suelos mediante una clasificación supervisada de una imagen satelital de 2010 (Landsat 5 o Spot). De esta forma se considera una excelente actualización de la cobertura terrestre y se toma como año base el mencionado 2010.

ALMACEN DE CARBONO: integración de información

La integración de información se realizó acorde a la *Metodología del estudio sobre la dimensión del carbono almacenado en la biomasa aérea*, misma que forma parte de la entrega final de este proyecto (*“Evaluación de la vulnerabilidad ambiental que presenta el suelo de conservación por la pérdida de servicios ecosistémicos a consecuencia del cambio de uso de suelo”*); esta integración tiene como referente importante el análisis de los aspectos fundamentales (estimación de biomasa, muestreo, unidad de muestreo, intensidad de muestreo, superficies y formas de mapeo) e.g. diseño de muestreo, unidad de muestreo, ecuaciones de carbono y distribución espacial) contenidos en 5 estudios de caso relevantes en materia de almacén de carbono, realizados del 2000 a la fecha en el suelo de conservación, en la metodología ya referida se da pormenorizada cuenta de este análisis.

Uno de la mayor relevancia se refiere al estudio del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) sobre “Estimación de almacenamiento de carbono en el Suelo de Conservación del Distrito Federal”³, que tuvo por objetivo estimar el contenido de carbono en la biomasa aérea de los principales tipos de vegetación forestal del suelo de conservación.

Se levantó un inventario forestal de 50 conglomerados basado en un muestreo sistemático estratificado, estos se complementaron con 249 conglomerados proporcionados por la Procuraría Ambiental y de Ordenamiento Territorial del Distrito Federal (PAOT). La unidad de muestreo empleada es la Y invertida (ver figura) basada en el diseño del Inventario Nacional Forestal y de Suelos de la CONAFOR, que es equivalente a un conglomerado con 4 sitios circulares de superficie de 400m².

³ Componente del proyecto PAOT INIFAP denominado *“Estimación de captura de carbono e infiltración como indicadores del estatus del derecho de los habitantes del DF a gozar de áreas verdes adecuadas para su desarrollo, salud y bienestar”*.

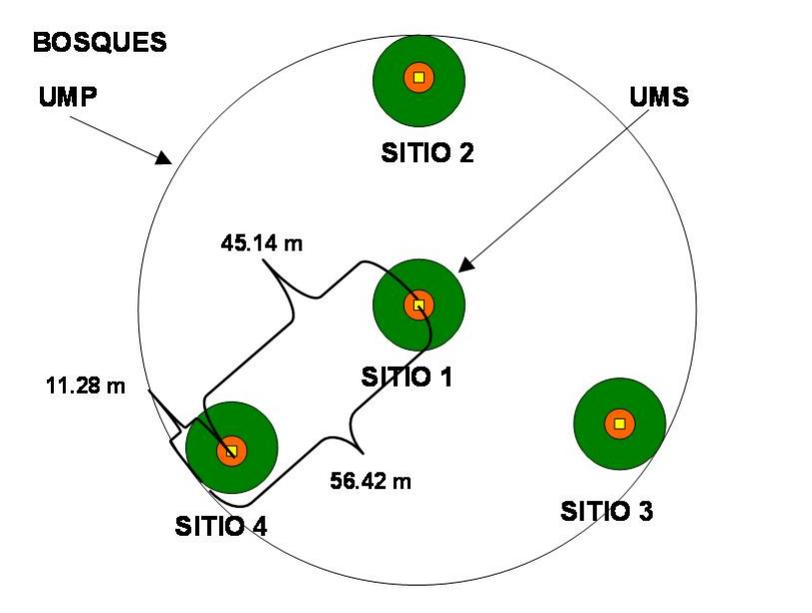


Figura. Conglomerado de "Y invertida" (Velasco *et al.*, 2002)

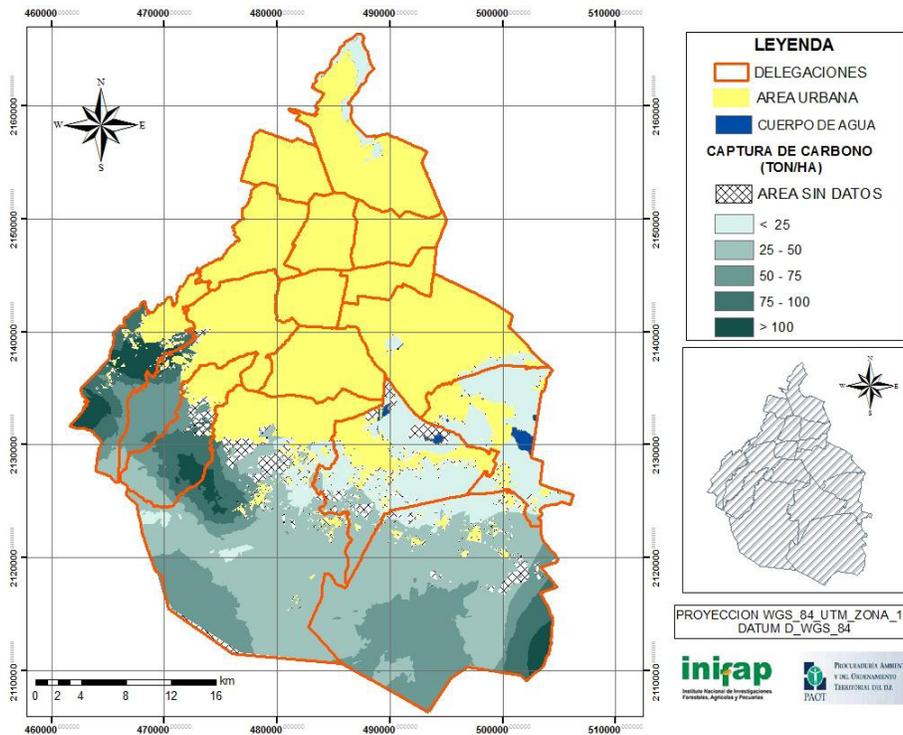
Para el cálculo del contenido de carbono en la biomasa aérea se emplearon ecuaciones de carbono y biomasa según la especie.

Las estimaciones resultantes se describen en el siguiente cuadro:

Tipo de vegetación ⁴	Límite inferior (ton)	Ton C / ha en biomasa aérea (promedio)	Límite superior (ton)
Bosque de Oyamel	83.97	93.41	102.85
Bosque Mixto	39.36	47.92	56.48
Bosque de Pino	41.02	46.95	54.88
Bosque inducido	15.03	28.26	41.50
Matorral	3.95	8.48	13
Pastizal	2.02	6.76	11.50
Agrícola	0.43	1.35	2.27

En este estudio, se elaboró un mapa de contenido de carbono (ver imagen) para conocer la distribución espacial a través del suelo de conservación mediante métodos geoestadísticos. El interpolador seleccionado fue Kriging Ordinario ajustado a un modelo esférico con un error cuadrático medio estandarizado de 0.9429.

⁴ Con base a la información cartográfica proporcionada por la PAOT.



Mapa de toneladas de carbono por hectárea (PAOT-INIFAP).

Para la integración de información se utilizó el mapeo del contenido de carbono realizado por el INIFA, tomando en cuenta todos los conglomerados (299) en el método geoestadístico (ver metodología antes referida). Estos representan las principales coberturas forestales del suelo de conservación, los cuales presentan diferentes almacenes de carbono en función de la estructura y densidad de la cobertura forestal, por lo que al integrar los conglomerados muestreados al interpolador considera no sólo la variabilidad de la cobertura en sí, sino también la generada por los otros tipos de cobertura. Además de estimar en coberturas para las cuales no hay información (e.g. Bosque de Encino) y/o existe poca información puntual para realizar una estimación (e.g. Bosque inducido)

Por lo anterior, en este estudio se realizan 3 estimaciones derivadas de los siguientes métodos geoestadísticos a) univariados (Kriging Ordinario), b) multivariados (Cokriging Ordinario) y c) estocásticos (Conditional simulation) con los datos dasométricos tanto de la CORENA como los resultantes del INIFAP a fin comparar las estimaciones por tipo cobertura forestal que tenga sitios experimentales suficientes (> de 30 conglomerados) como es el caso de Bosque de Oyamel, Pino y Mixto, con tal de generar una capa de carbono con menos incertidumbre. Una vez obtenido las estimaciones con menor incertidumbre por tipo de cobertura forestal, se elabora una capa final que represente de mejor forma

la variabilidad espacial de las densidades de carbono en los bosques del suelo de conservación.

Por lo anterior, en este estudio se elaboraron las estimaciones por tipo de cobertura forestal, además de explorar el uso de otra variable conocida a través del área de estudio (altitud, pendiente, entre otros) que tenga una correlación con el contenido de carbono con tal de reducir la variabilidad espacial y por lo tanto el sesgo asociada a estas estimaciones.

Estudio: *Evaluación de la vulnerabilidad ambiental que presenta el suelo de conservación por la pérdida de servicios ecosistémicos a consecuencia del cambio de uso de suelo*

INFORME FINAL: **PRIMERA SECCION**

Metodología del estudio sobre la dimensión del carbono almacenado en la biomasa aérea

Noviembre 12, 2010

INTRODUCCIÓN

El cambio climático, es la variabilidad termodinámica que está ocurriendo en la atmósfera a una escala planetaria; este fenómeno está siendo causado principalmente por el hombre, ya que la composición química de la atmósfera sufre alteraciones debido al incremento en la emisión de gases de efecto invernadero (GEI; IPCC, 2007). El aumento en la concentración de los GEI, se debe al consumo de combustibles fósiles, la deforestación y el cambio de uso de suelo, lo que resulta en el aumento en la temperatura de la atmósfera.

Para comprender la dinámica de acumulación e intercambio de GEI en la atmósfera, es indispensable conocer el funcionamiento del ciclo global de los elementos que la conforman, tales como el dióxido de carbono (CO₂), identificando sus fuentes, flujos y almacenes.

Uno de los principales sumideros de carbono son las coberturas vegetales, considerándose a los ecosistemas forestales como una opción para atenuar las emisiones de GEI, ya que almacenan CO₂, aparte de participar con 90% del flujo anual de carbono en el sistema atmósfera-tierra.

Lo anterior ha propiciado una atención global sobre el estimar, mapear y monitorear con mayor precisión el carbono almacenado en los bosques [Goetz *et al.*, 2009], permitiendo reconocer el papel que juegan los bosques en el ciclo global del carbono, particularmente en la mitigación de los GEI, siendo la estimación del contenido de carbono, el punto de partida para establecer una línea base de cálculo de la dinámica de este gas cuando no se ejecuta una medida de mitigación. Es decir, generar un caso de referencia con el cual se pueda comparar el cambio en las emisiones de los GEI y verificar los beneficios adicionales posteriores [Brown, 2001; De Jong, 2001].

El presente reporte está conformado de 4 secciones, en la sección 1 se presenta un breve marco conceptual relacionado con el cambio climático, la dinámica del

carbono así como los reservorios del carbono terrestre; en la sección 2 se describen los aspectos fundamentales (e.g. diseño de muestreo, unidad de muestreo, ecuaciones de carbono y distribución espacial) de estudios de caso realizados del 2000 a la actualidad en el suelo de conservación, siendo el inciso f) el estudio del INIFAP; en la sección 3 se realizan cuadros con el análisis comparativo de los aspectos antes mencionados y en la parte 4 se describe la propuesta metodológica así como la primera aproximación obtenida por parte del CentroGeo.

1.-MARCO TEÓRICO

El sistema Tierra-atmósfera, es calentado por radiación solar de onda corta. A esta constante entrada y salida de energía (onda larga) se le conoce como equilibrio radiativo (Figura 1), en donde 19% de la energía es absorbida por la atmósfera (depleción), 51% por la superficie de la tierra (insolación) y el 30% restante es reflejada al espacio exterior (albedo; Magaña, 1994). De este último, los GEI fungen como una capa que remite dicha energía a la superficie terrestre provocando una alteración en el equilibrio energético del sistema climático, lo que se conoce como el efecto invernadero (IPCC, 2007).

Debido a lo anterior, la concentración de estos gases, es la que regula la cantidad de radiación infrarroja que emite nuestro planeta al espacio; por lo tanto, cuando se presentan altas concentraciones de los GEI, se eleva la cantidad de calor en la atmósfera, propiciando un aumento en la temperatura superficial media del planeta aproximadamente 285° K (Magaña, 1994; Ordóñez, 1999).

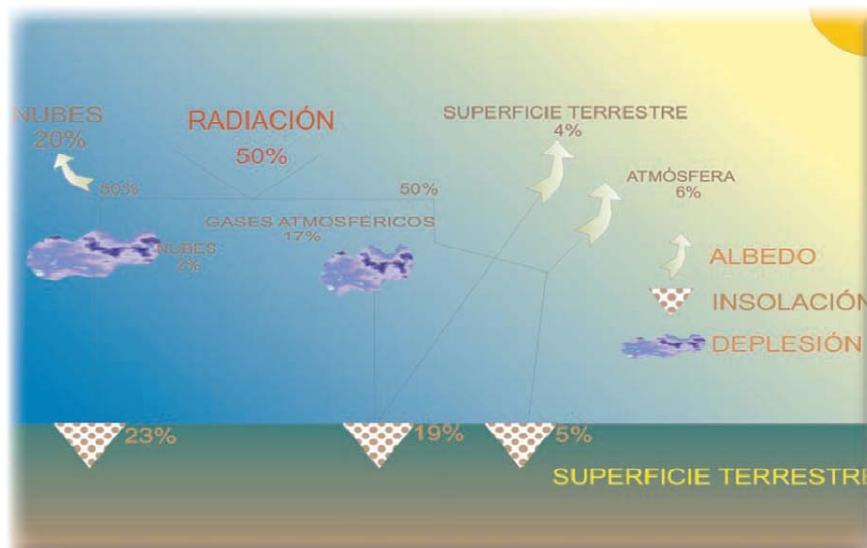


Figura 1. Equilibrio radiativo (Galeana, 2008)

El Dióxido de Carbono es el responsable de 71.5% del efecto invernadero (Lashof y Ahuja, 1990). Las emisiones mundiales de este GEI han aumentado desde la era preindustrial (1750) hasta la fecha, de 280 a 279 partes por millón (IPCC, 2007) principalmente por la utilización de combustibles de origen fósil, el cambio de uso de suelo y la deforestación (IPCC, 2007). Es el principal GEI, en términos de cantidad en la atmósfera y por su potencial de calentamiento, este gas se encuentra en un equilibrado y constante ciclo atmósfera–tierra mediante 2 grandes procesos:

a) Biológico (figura 2) - Por el proceso de fotosíntesis, mediante el cual el CO₂ es retirado de la atmósfera para convertirse en materia vegetal; y por el de respiración -descomposición de las plantas, con el cual el CO₂ contenido en la materia viva vuelve a la atmósfera. En circunstancias normales, dichos procesos están aproximadamente en equilibrio, con un flujo anual de 60 mil millones de toneladas de C ó 60 gigatoneladas (GtonC) en cada dirección. Sin embargo, actualmente la deforestación y la degradación forestal causan un flujo neto adicional de una a dos GtonC de la biósfera hacia la atmósfera. Por otro lado, existe un sumidero transitorio del CO₂ atmosférico y la deposición de nitrógeno por la recuperación de áreas abandonadas y el efecto de la fertilización, que implica un flujo anual de dos GtonC de la atmósfera hacia los ecosistemas terrestres. Este ciclo opera en menos de un año para los procesos de respiración–fotosíntesis y hasta decenas de años para los de descomposición de la materia orgánica (Masera, 2006 Ordóñez *et al.*, 2008).

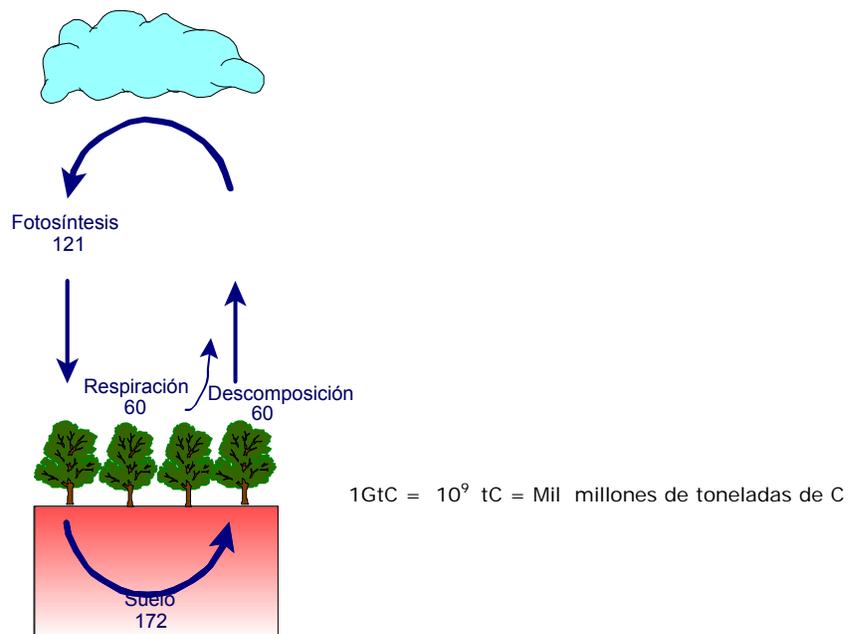


Figura 2. Ciclo del Carbono en el sistema atmósfera - bosques (Ordóñez *et al.*, 2008).

b) Químico (figura 3) – Consiste en el intercambio de CO₂ entre la atmósfera y el océano, por diferencias en las concentraciones del equilibrio del gas en estos dos compartimientos. En este caso, el intercambio neto es de aproximadamente dos GtonC por año hacia el océano, que actúa como un gran sumidero de CO₂.

Este proceso tiene un tiempo característico de uno a diez años para las aguas superficiales del océano, pero implica cientos de años si consideramos el proceso de equilibrio entre las aguas superficiales y las profundas (Masera, 2006; Ordóñez *et al.*, 2008).

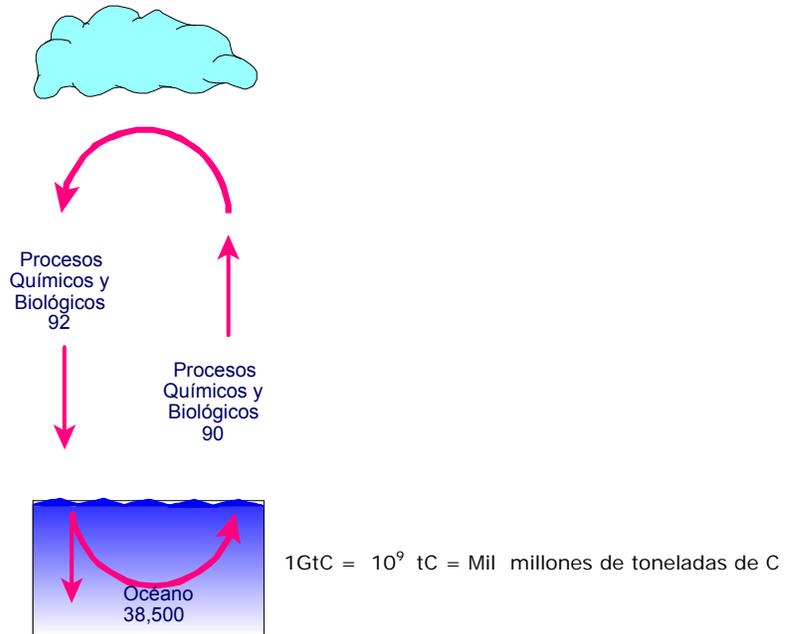


Figura 3. Ciclo del Carbono en el sistema atmósfera – Océano (Ordóñez *et al.*, 2008).

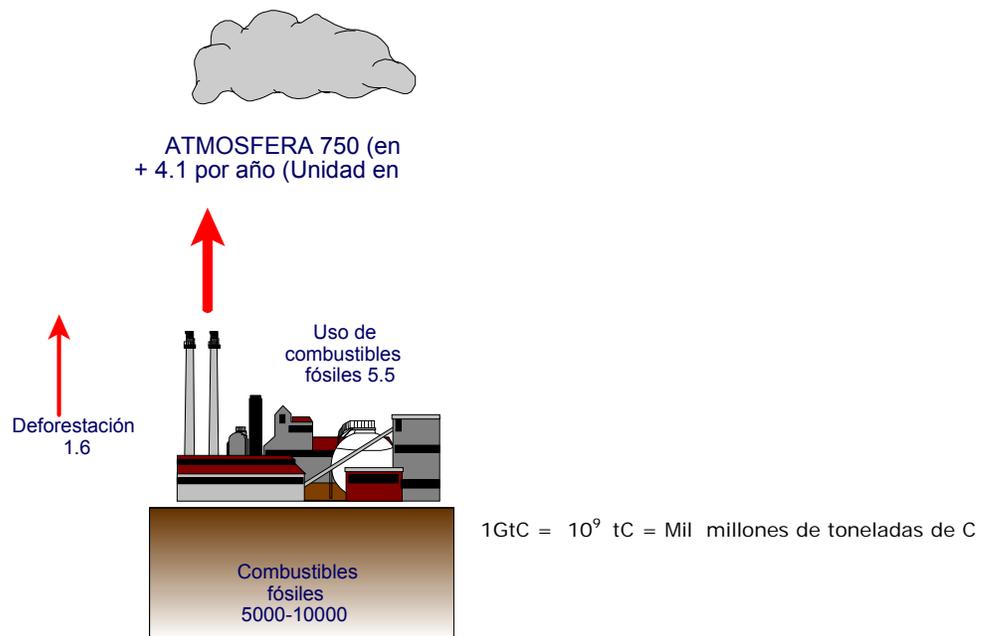


Figura 4. Emisiones anuales de Carbono a la atmósfera (Ordóñez *et al.*, 2008).

Este ciclo se rompe (figura 4) con la quema de combustibles fósiles cuyo principal producto es CO_2 , que proviene de la materia viva fósil almacenada en los yacimientos de petróleo y carbón. Significa un flujo neto de la biosfera hacia la atmósfera de 5.5 GtonC al año. Este flujo es enteramente antropogénico y tiene un crecimiento anual del 1.5%, aunado a 1.6 GtonC al año por la deforestación y el cambio de uso de suelo (Masera, 2006; Ordóñez *et al.*, 2008).

El balance neto de los tres procesos es, para la década de los años noventa, de un flujo neto de 4.1 GtonC al año hacia la atmósfera, que está aumentando las concentraciones de CO_2 y el consecuente peligro de provocar cambio climático (Masera, 2006; Ordóñez *et al.*, 2008).

Históricamente, en una escala global, los cambios en la cobertura forestal han sido aportadores de dióxido de carbono a la atmósfera (Houghton, 1999; Houghton y Hackler, 2001 citado por Brown, 2001). Es por esta razón que en la actualidad se considera a los bosques como una opción para mitigar las emisiones de GEI (Masera *et al.*, 2001; Ordóñez *et al.*, 2001).

Ordóñez (1999) comenta que el CO_2 participa en la composición de las estructuras necesarias para que el árbol pueda desarrollarse (follaje, ramas, raíces y fuste; Figura 5). Al crecer, éste incrementa su follaje, ramas, flores y frutos (en conjunto: copa) así como su altura y el grosor del tronco. Durante el tiempo en que el CO_2 se encuentra constituyendo alguna estructura del árbol hasta que es enviado nuevamente al suelo o la atmósfera, se considera almacenado.

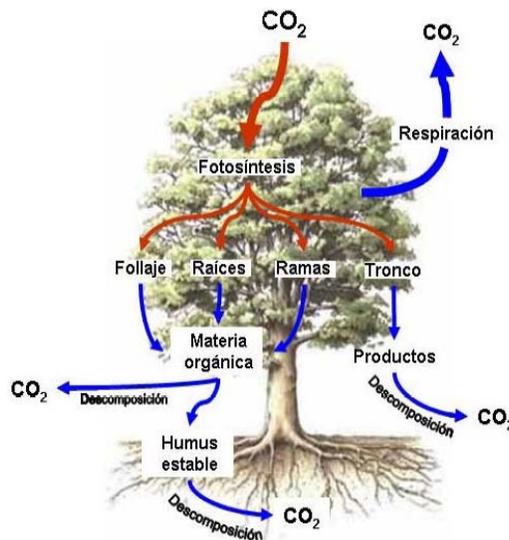


Figura 5. Flujos y almacenes de carbono en un ecosistema forestal (Fragoso, 2003).

Los procesos de captura-emisión son parte de un sistema con cuatro tipos generales de reservorios de carbono (vegetación aérea y subterránea, materia en descomposición, suelos y productos forestales), con tiempos de residencia y flujos asociados muy diferentes (Ordóñez, 1999).

El concepto de contenido de carbono normalmente integra la idea de conservar los inventarios de este elemento que se encuentran en suelos, bosques y otro tipo de vegetación (Tipper *et al.*, 2000).

El IPCC (2007) estima que, combinando estrategias de conservación forestal con proyectos de reforestación en el mundo, los bosques podrían resultar en un sumidero neto de carbono durante los próximos cien años, permitiendo reducir de 20 a 50% las emisiones de CO₂ a la atmósfera. Las opciones de mitigación de los GEI pueden ser agrupados en tres: La primera categoría incluye a las actividades que evitan la liberación del carbono secuestrado (e.g. conservación y protección a los ecosistemas forestales); la segunda contiene actividades que capturan CO₂ (e.g. aforestación, reforestación y agroforestería); y la tercera opción encierra actividades que sustituyan el uso de combustibles fósiles (Sathaye *et al.*, 2001).

2.- ANTECEDENTES

Se han registrado 5 estudios de caso en masas forestales del Suelo de Conservación, donde se han empleado diferentes métodos de estimación de biomasa, muestreo, unidad de muestreo, intensidad de muestreo, superficies y formas de mapeo.

a) En 2001, la Comisión de Recursos Naturales realizó el proyecto nombrado “Estimación del contenido de Carbono en la biomasa en el área del Suelo de Conservación del Distrito Federal” que tuvo por objetivo estimar el carbono total, lo que es equivalente al contenido en la vegetación (biomasa aérea y subterránea) y mantillo (hojarasca).

Se levantó un inventario forestal basado en un muestreo sistemático al azar, con una intensidad de muestreo de 0.019%, lo que fue equivalente a 74 sitios muestreados. La unidad de muestreo empleada fue sitios circulares de 1000 m² (figura 6) para obtener los parámetros dasométricos (diámetro y altura), asimismo, dentro de los mismos sitios se levantaron otros de superficie de 100 m² para

obtener datos de regeneración, reforestación, edad e incremento del arbolado y en el centro de estos círculos se colectó la hojarasca en una superficie de 0.25 m².

Para el cálculo del carbono almacenado en la biomasa aérea y subterránea (raíces) se emplearon las siguientes formulas:

$$C_{ba} = V * VD * BEF * CC$$

Donde:

C_{ba}= Carbono en biomasa aérea

V= Volumen total del árbol

VD= Densidad de la madera

BEF = Factor de expansión

CC= Contenido de carbono

$$C_{br} = C_{ba} * F$$

Donde:

C_{br}= Carbono en biomasa subterránea

F= Factor de expansión

Para el cálculo del carbono contenido en el mantillo se empleó la siguiente fórmula:

$$CM = \text{Peso seco} * 0.5$$

Donde:

CM= Carbono en mantillo

Peso seco= Peso seco obtenido en laboratorio

0.5= Contenido de Carbono en la materia

seca de

La hojarasca

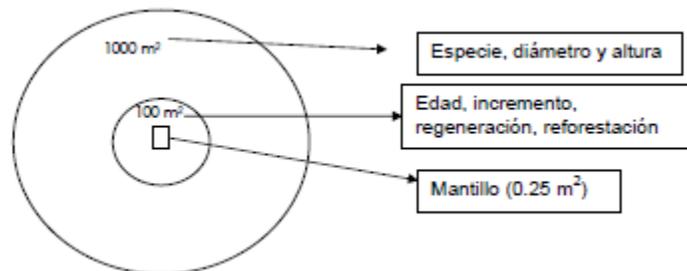


Figura 6. Sitios Corena (Corena, 2001)

Las estimaciones resultantes se describen en el siguiente cuadro:

Tipo de vegetación*	Ha	Ton C / ha en biomasa aérea	Ton C / ha en mantillo	Error
Encino	3545.52	37.40	3.91	Desconocido
Aile	703.41	33.02	3.25	Desconocido
Vegetación introducida	85.32	16.32	1.03	Desconocido
Oyamel	9775.79	144.07	6	Desconocido
Pino	24377	57.61	5.03	Desconocido

b) En 2001, Valenzuela realizó el estudio “Estimación de secuestro de Carbono en bosques naturales de Oyamel (*Abies religiosa*) en el sur del Distrito Federal”, que tuvo por objetivo aplicar un modelo matemático para estimar la cantidad de carbono secuestrado en biomasa aérea en bosques naturales de *Abies religiosa* en los Parques Nacionales del Desierto de los Leones y Cumbres del Ajusco.

Se utilizó un muestreo sistemático estratificado, con una intensidad de muestreo de 0.43% para el caso del Ajusco y 6.4% para el desierto de los Leones. La unidad de muestreo es de forma circular, con un radio 13.81 m y una superficie de 600 m².

Para el cálculo del contenido de carbono en la biomasa aérea se emplearon las siguientes formulas:

$$CT = V * d * F$$

Donde:

CT= Carbono total

d = Densidad específica de la madera

F= Factor de conversión

$$C_d = VFT [F (D+W) - F(D-W)]$$

Donde:

C_d= Carbono secuestrado por clase diamétrica

VFT= Volumen de Fuste total por Ha

2W= Amplitud de la clase

Utilizando la ecuación de Función de Densidad de Probabilidad Weibull acumulativa:

* Con base en una clasificación de imagen de satélite del año 2000.

$$F(x) = 1 - \exp(-((x-a)/b)^c)$$

La estimación resultante se describe en el siguiente cuadro:

Tipo de vegetación	Ha	Ton C / ha en biomasa aérea	Error
<i>Abies religiosa</i>	2500	207.98	Desconocido

c) En 2005, Espinoza realizó el estudio “Estimación del contenido y captura de carbono en el bosque de *Pinus hartwegii* de la cuenca alta del río Magdalena, Magdalena Contreras, D.F.” que tuvo por objetivo conocer el carbono almacenado en la biomasa aérea de los rodales de *Pinus hartwegii*.

Se utilizó un muestreo aleatorio estratificado, con una superficie muestreada de 1.6ha. La unidad de muestreo es de forma circular y tiene una superficie de 625 m².

Para el cálculo del contenido de carbono en la biomasa aérea se emplearon las siguientes formulas:

$$B = V \cdot d$$

Donde:

B=Biomasa

V= Volumen

d=Densidad de la madera

$$CC = B \cdot 1.3 \cdot 0.45$$

Donde:

CC= Contenido de carbono

B= Biomasa

1.3= Factor de expansión para fustes

0.45= Proporción de carbono en la biomasa seca

La estimación resultante se describe en el siguiente cuadro:

Tipo de vegetación [†]	Ha	Ton C / ha en biomasa aérea	Error
<i>Pinus hartwegii</i>	2926	31.61	Desconocido

[†] Se utilizaron 5 ortofotos de escala 1:20000 para la elaboración del mapa de vegetación.

d) En 2006, Nava realizó el estudio “Carbono almacenado como servicio ecosistémico y criterios de restauración, en el bosque de *Abies religiosa* de la cuenca del Río Magdalena, D.F.” que tuvo por objetivo conocer el carbono almacenado en la biomasa aérea de los rodales de *Abies religiosa*.

Se levantó un inventario forestal basado en un muestreo aleatorio estratificado, con una intensidad de muestreo de 0.12%. La unidad de muestreo empleada fueron cuadrantes de 25 x 25 metros con una superficie de 625m².

Para el cálculo del contenido de carbono en la biomasa aérea se emplearon las siguientes formulas:

$$B = V * d$$

Donde:

B= Biomasa

V= Volumen

d= Densidad de la madera

$$CC = B * 1.3 * 0.45$$

Donde:

CC= Contenido de carbono

B= Biomasa

1.3= Factor de expansión para fustes

0.45= Proporción de carbono en la biomasa seca.

La estimación resultante se describe en el siguiente cuadro:

Tipo de vegetación [‡]	Ha	Ton C / ha en biomasa aérea	Error
Abies religiosa	1433	58	Desconocido

e) En 2008, Galeana realizó el estudio “Estimación del contenido y captura potencial de carbono, su valoración económica, en la cuenca del Río Magdalena, D.F.” que tuvo por objetivo cuantificar la biomasa aérea por tipo de cobertura forestal de la cuenca del Río Magdalena.

Se levantó un inventario forestal basado en un muestreo sistemático estratificado, con una intensidad de muestreo de 0.64%. La unidad de muestreo empleada se basó en un diseño anidado (figura 7), que es equivalente a un conglomerado con 3 sitios circulares de radio

[‡] Mediante la fotointerpretación de 14 fotografías aéreas escala 1:20000.

de 17.84m (radio que fue compensado según el porcentaje de pendiente existente en el sitio) con una equidistancia de 30 metros entre sitio.

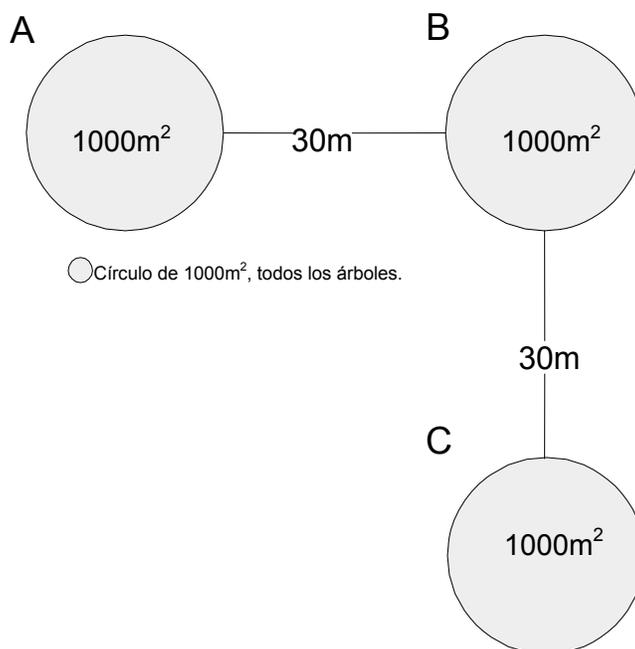


Figura 7. Diseño anidado (Galeana, 2008).

Para el cálculo del contenido de carbono en la biomasa aérea se emplearon las siguientes formulas:

$$B = V \cdot d$$

Donde:

B=Biomasa

V= Volumen

d=Densidad de la madera

Todos los valores de biomasa se pasaron a carbono mediante un factor de 0,5 MgDM / MGC (IPCC, 2001).

Las estimaciones resultantes se describen en el siguiente cuadro:

Tipo de vegetación [§]	Ha	Ton C / ha en biomasa aérea	Error
<i>Abies religiosa</i> abierto	183.08	37.40	24.51
<i>Abies religiosa</i> cerrado	1012.09	162.91	16.69

[§] Mediante la fotointerpretación de 52 fotografías aéreas escala 1:10000.

<i>Abies religiosa</i> – <i>Pinus</i> sp. cerrado	341.70	106.92	25
<i>Pinus</i> sp. – <i>Abies religiosa</i> cerrado	179.98	39.39	14.88
<i>Pinus hartwegii</i> abierto	322.14	21.21	5.62
<i>Pinus hartwegii</i> cerrado	288.56	47.37	5.64

En este caso, se elaboró un mapa de contenido de carbono (figura 8) para conocer la distribución espacial a través de la cuenca mediante métodos geoestadísticos. El interpolador seleccionado fue Kriging Ordinario ajustado a un modelo esférico con un error cuadrático medio de 59.02 tC/ha.

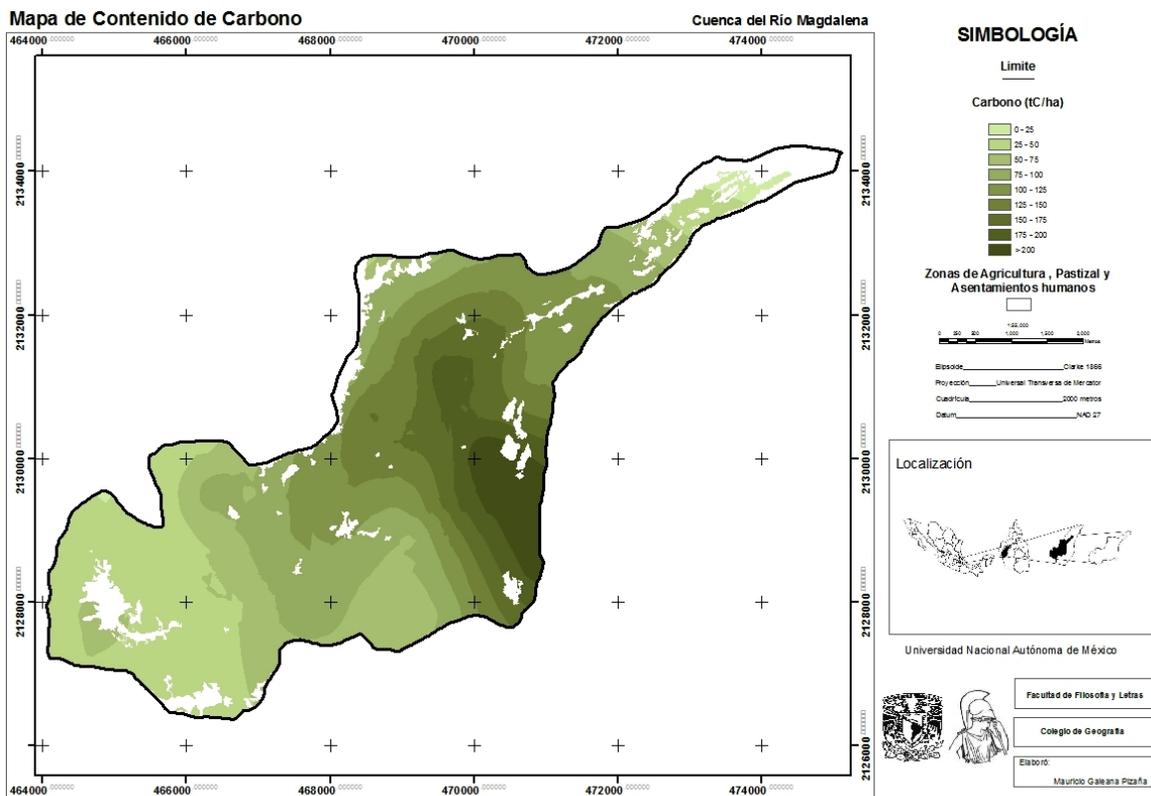


Figura 8. Mapa de contenido de Carbono (Galeana, 2008).

f) En 2010, el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) realizó el proyecto “Estimación de almacenamiento de carbono en el Suelo de Conservación del Distrito Federal”, que tuvo por objetivo estimar el contenido de carbono en la biomasa aérea de los principales tipos de vegetación forestal del suelo de conservación.

Se levantó un inventario forestal de 50 conglomerados basado en un muestreo sistemático estratificado, estos se complementaron con 249 conglomerados proporcionados por la Procuraría Ambiental y de Ordenamiento Territorial del Distrito Federal (PAOT). La unidad de muestreo empleada es la Y invertida (figura 9) basada en el diseño del Inventario Nacional Forestal y de Suelos de la CONAFOR, que es equivalente a un conglomerado con 4 sitios circulares de superficie de 400m².

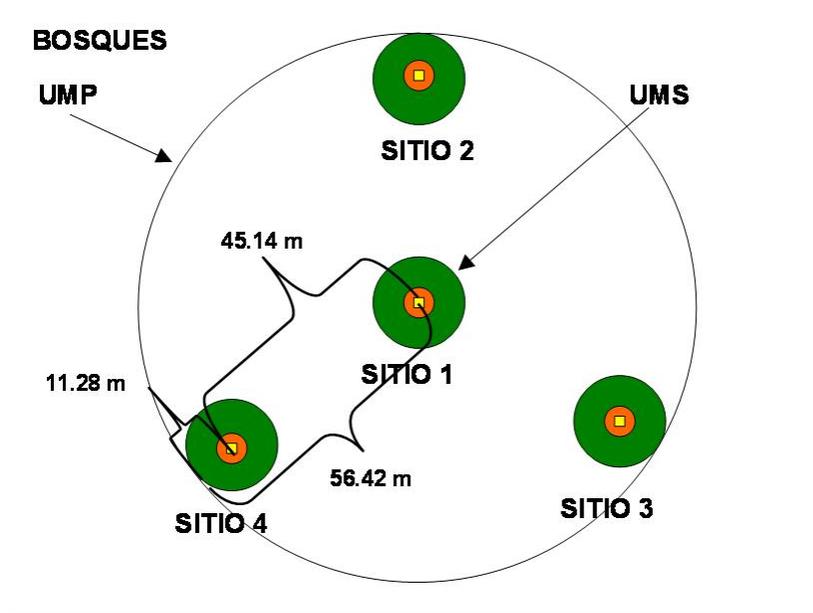


Figura 9. Conglomerado de “Y invertida” (Velasco *et al.*, 2002)

Para el cálculo del contenido de carbono en la biomasa aérea se emplearon ecuaciones de carbono y biomasa según la especie. Las expresiones matemáticas empleadas por especie se indican enseguida:

<i>Pinus montezumae</i>	$C = 0.006 \cdot (DN^{3.038})$
<i>Alnus jorullensis</i>	$C = 0.009 \cdot (DN^{2.75})$
<i>Pinus patula</i>	$C = 0.021 \cdot (DN^{2.645})$
<i>Abies religiosa</i>	$C = 0.033 \cdot (DN^{2.51})$
<i>Clethra mexicana</i>	$C = 0.2249 \cdot (DN^{1.8168})$
<i>Schinus molle</i>	$C = 0.2249 \cdot (DN^{1.8168})$
<i>Alnus acuminata</i>	$C = (EXP(2.14 + 2.23 \cdot LN(DN))) \cdot 0.5$
<i>Alnus cordata</i>	$C = (EXP(-2.14 + 2.23 \cdot LN(DN))) \cdot 0.5$
<i>Alnus filifera</i>	$C = (EXP(-2.14 + 2.23 \cdot LN(DN))) \cdot 0.5$
<i>Alnus sp</i>	$C = (EXP(-2.14 + 2.23 \cdot LN(DN))) \cdot 0.5$
<i>Crataegus mexicana</i>	$C = (EXP(-2.14 + 2.23 \cdot LN(DN))) \cdot 0.5$
<i>Garrya laurifolia</i>	$C = (EXP(-2.14 + 2.23 \cdot LN(DN))) \cdot 0.5$

<i>Prunus serotina</i>	$C=(EXP(-2.14+2.23*LN(DN)))^{*0.5}$
<i>Pyrus malus</i>	$C=(EXP(-2.14+2.23*LN(DN)))^{*0.5}$
<i>Acacia farnesiana</i>	$C=(EXP(-2.27+2.39*LN(DN)))^{*0.5}$
<i>Quercus candicans</i>	$C=(EXP(-2.27+2.39*LN(DN)))^{*0.5}$
<i>Quercus crassifolia</i>	$C=(EXP(-2.27+2.39*LN(DN)))^{*0.5}$
<i>Quercus crassipes</i>	$C=(EXP(-2.27+2.39*LN(DN)))^{*0.5}$
<i>Quercus deserticola</i>	$C=(EXP(-2.27+2.39*LN(DN)))^{*0.5}$
<i>Quercus frutex</i>	$C=(EXP(-2.27+2.39*LN(DN)))^{*0.5}$
<i>Quercus germana</i>	$C=(EXP(-2.27+2.39*LN(DN)))^{*0.5}$
<i>Quercus glaucescens</i>	$C=(EXP(-2.27+2.39*LN(DN)))^{*0.5}$
<i>Quercus glaucooides</i>	$C=(EXP(-2.27+2.39*LN(DN)))^{*0.5}$
<i>Quercus laeta</i>	$C=(EXP(-2.27+2.39*LN(DN)))^{*0.5}$
<i>Quercus laurina</i>	$C=(EXP(-2.27+2.39*LN(DN)))^{*0.5}$
<i>Quercus mexicana</i>	$C=(EXP(-2.27+2.39*LN(DN)))^{*0.5}$
<i>Quercus obtusata</i>	$C=(EXP(-2.27+2.39*LN(DN)))^{*0.5}$
<i>Quercus potosina</i>	$C=(EXP(-2.27+2.39*LN(DN)))^{*0.5}$
<i>Quercus repanda</i>	$C=(EXP(-2.27+2.39*LN(DN)))^{*0.5}$

Las estimaciones resultantes se describen en el siguiente cuadro:

Tipo de vegetación**	Límite inferior (ton)	Ton C / ha en biomasa aérea (promedio)	Límite superior (ton)
Bosque de Oyamel	83.97	93.41	102.85
Bosque Mixto	39.36	47.92	56.48
Bosque de Pino	41.02	46.95	54.88
Bosque inducido	15.03	28.26	41.50
Matorral	3.95	8.48	13
Pastizal	2.02	6.76	11.50
Agrícola	0.43	1.35	2.27

En este caso, se elaboró un mapa de contenido de carbono (figura 10) para conocer la distribución espacial a través del suelo de conservación mediante métodos geoestadísticos. El interpolador seleccionado fue Kriging Ordinario ajustado a un modelo esférico con un error cuadrático medio estandarizado de 0.9429.

** Con base a la información cartográfica proporcionada por la PAOT.

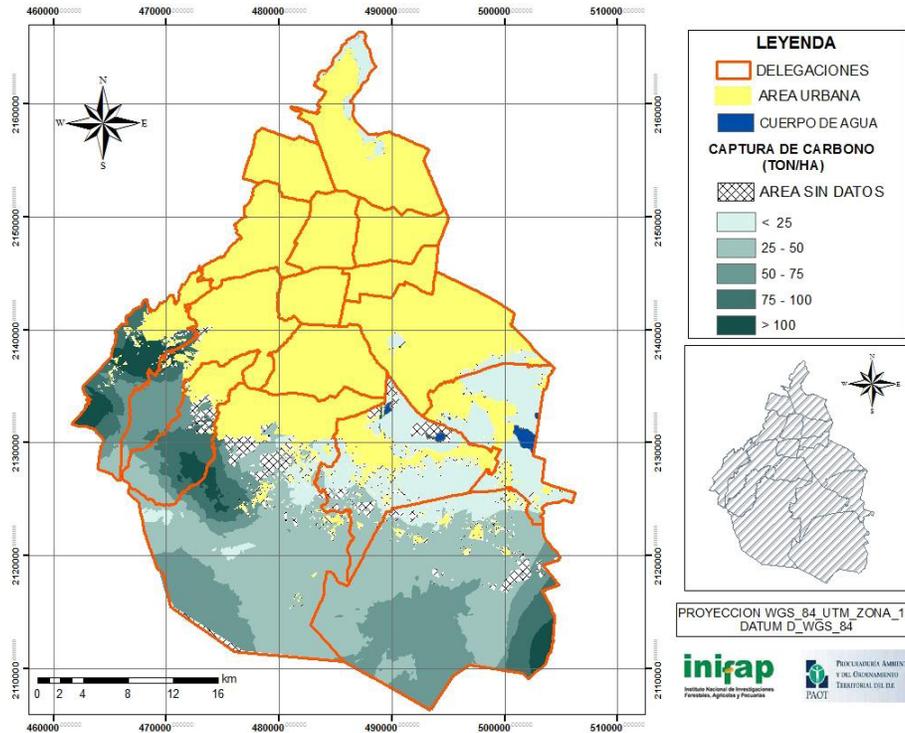


Figura 10. Mapa de toneladas de carbono por hectárea (PAOT-INIFAP, 2010).

3.- ANÁLISIS COMPARATIVO

A continuación se presentan cuadros comparativos de los diversos estudios de caso realizados en el suelo de conservación analizando las ventajas y desventajas de los diversos diseños de muestreo, unidades de muestreo, ecuaciones de carbono y métodos de mapeo

3.1) Diseño de muestreo

Estudio	Diseño de muestreo	Ventajas	Limitantes
Valenzuela, 2001; Galeana, 2008; INIFAP, 2010	Muestreo estratificado con distribución sistemática	<ul style="list-style-type: none"> Se acota el área y objeto de estudio. La estratificación del objeto de estudio permite una cuantificación unitaria y total de la población. Este permite asegurar una cobertura de las unidades de todas las clases que representan al fenómeno y proporciona datos de mayor 	<ul style="list-style-type: none"> Se incrementan los costos por el análisis detallado de los componentes estructurales del objeto de estudio. Si la constante de muestreo está asociada con el fenómeno de interés, las estimaciones obtenidas a partir de la

		<p>calidad que el muestreo aleatorio.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Permite hacer buenas estimaciones de medias y totales poblacionales. • Ha sido el de mayor aplicación en los inventarios forestales. • Disminuye el error en la interpolación espacial. (Velasco et al, 2002; Schreuder et al., 2004; Galeana, 2008) 	<p>muestra pueden contener sesgo de selección.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Aumenta el tiempo en el que se lleva a cabo el muestreo. (Velasco et al, 2002; Schreuder et al., 2004; Galeana, 2008)
Espinoza, 2005; Nava, 2006	Muestreo estratificado con distribución aleatoria	<ul style="list-style-type: none"> • Tiende a asegurar que la muestra represente adecuadamente a la población en función de unas variables seleccionadas. (Velasco et al, 2002; Schreuder et al., 2004; Galeana, 2008) 	<ul style="list-style-type: none"> • Se ha de conocer la distribución en la población de las variables utilizadas para la estratificación. (Velasco et al, 2002; Schreuder et al., 2004; Galeana, 2008)
CORENA, 2001	Muestreo sistemático	<ul style="list-style-type: none"> • Fácil de aplicar. • No siempre es necesario tener un listado de toda la población. (Velasco et al, 2002; Schreuder et al., 2004; Galeana, 2008) 	<ul style="list-style-type: none"> • Sesgar la estimación al no poder asegurar muestreo es todas las clases de interés. (Velasco et al, 2002; Schreuder et al., 2004)

3.2) Unidad de muestreo

Estudio	Unidad de muestreo	Ventajas	Limitantes
INIFAP, 2010	Conglomerado "Y invertida"	<ul style="list-style-type: none"> • Error relativo de muestreo bajo. • Estudios previos que comparan diferentes unidades de muestreo señalan que es el más óptimo. • Ahorra 18% de los costos. • Proporciona la ventaja de cálculo directo por 	

		<p>unidad de superficie, lo que permite la estimación del total casi de manera inmediata.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Es la unidad de muestreo del Inventario Nacional Forestal y de suelos (INFyS) de la CONAFOR. (Velasco et al, 2002) 	
Galeana, 2008	Conglomerado anidado	<ul style="list-style-type: none"> • Permite la comparación entre círculos de 0.1ha compensado con la pendiente, entre sitios y la misma clase de cobertura vegetal, lo cual optimiza el tiempo de la toma de datos. (Galeana, 2008) 	<ul style="list-style-type: none"> • En comparación con la “Y invertida” presenta un error relativo más alto. • No es interoperable con los datos del INFyS. (Velasco et al, 2002)
CORENA, 2001; Valenzuela, 2001; Espinoza, 2005; Nava, 2006	Sitio	<ul style="list-style-type: none"> • Fácil de aplicar. (Velasco et al, 2002) 	<ul style="list-style-type: none"> • Error relativo alto. • No se compensa con la pendiente. • No es interoperable con los datos del INFyS. (Velasco et al, 2002)

3.3) Estimación de Contenido de Carbono

Estudio	Método de cálculo de la biomasa y carbono	Ventajas	Limitantes
Valenzuela, 2001; CORENA, 2001; Espinoza, 2005; Nava, 2006	Ecuaciones alométricas para cálculo de la	<ul style="list-style-type: none"> • Fácil de aplicar (Acosta-Mireles, 2002) 	<ul style="list-style-type: none"> • Presenta estimaciones que sobreestiman la biomasa aérea y por

Galeana, 2008;	biomasa y volumen.		lo tanto, el contenido de carbono, ya que la estimación se hace bajo el supuesto de que la estructura del árbol es un cilindro. (Acosta-Mireles, 2002)
INIFAP, 2010	Ecuaciones directas para el cálculo de la biomasa y el carbono.	<ul style="list-style-type: none"> Realiza estimaciones que consideran la morfología de la estructura del árbol. (Acosta-Mireles, 2002) 	<ul style="list-style-type: none"> Requiere de métodos de extracción de arboles para pesar la biomasa. Mucho equipo de campo y laboratorio. (Acosta-Mireles, 2002)

3.4) Distribución espacial del contenido de Carbono

Estudio	Método de mapeo	Ventajas	Limitantes
CORENA, 2001; Valenzuela, 2001; Espinoza, 2005; Nava, 2006	No realizó		
Galeana, 2008; INIFAP, 2010	Métodos geoestadísticos	<ul style="list-style-type: none"> Permite describir la continuidad espacial de cualquier fenómeno natural, asignación de atributos, indicadores, criterios o valores. Con ello podemos llegar a conocer la forma en que se comporta cualquier variable continua en el espacio, con un nivel de detalle que permite cuantificar la variación espacial de ésta en distintas direcciones del mismo. (Galeana, 2008) 	<ul style="list-style-type: none"> Depende del número de puntos muestreados y de su distribución en el espacio. (Galeana, 2008)

4.-PROPUESTA CENTROGEO

FUNDAMENTOS

La Geoestadística es un término asociado con un grupo de técnicas que trata fenómenos espaciales, su principal objetivo es la estimación, predicción y simulación de los valores de una variable que está distribuida en el espacio (Yarus & Chambers, 1994). Ésta tiene una creciente preferencia porque permite aprovechar la correlación espacial entre las observaciones vecinas, para predecir valores de los atributos en los lugares no muestreados (Maselli & Chiesi, 2006; Websters & Oliver, 2007).

La Geoestadística, tiene como objetivo el caracterizar e interpretar el comportamiento de los datos que están distribuidos espacialmente como variables regionalizadas, donde se considera a una variable regionalizada una medición realizada en el espacio de forma que presente una estructura de correlación. De manera formal se define como un proceso estocástico con un dominio contenido en un espacio euclidiano dimensional R^d , $\{Z(x) : x \in D \subset R^d\}$. Si $d = 2$, $Z(x)$ puede asociarse a una variable medida en un punto x del plano. En términos prácticos $Z(x)$ puede verse como una medición de una variable aleatoria (p.ej. contenido de carbono en la biomasa aérea) en un punto x de una región de estudio (Websters & Oliver, 2007).

Según Isaaks & Srivastava (1989) los pasos principales de un estudio Geoestadístico son:

1. Análisis exploratorio de los datos. Se estudian los datos muestrales sin tener en cuenta su distribución geográfica. Sería una etapa de aplicación de la estadística.
2. Análisis estructural. Estudio de la continuidad espacial de la variable. Se calcula el variograma y se ajusta al mismo un variograma teórico.
3. Predicciones. Estimaciones de la variable en los puntos no muestrales, considerando la estructura de correlación espacial seleccionada e integrando la información obtenida de forma directa en los puntos muestrales, así como la conseguida indirectamente en forma de tendencias conocidas.

4. Análisis de los errores estadísticos. Se realiza un análisis de validación cruzada y se calculan algunos parámetros como el error cuadrático medio para conocer los errores en la predicción.

ANÁLISIS EXPLORATORIO DE LOS DATOS

Aquí se trata de describir la muestra, de forma tal que se explore las características mediante la obtención de los estadísticos básicos de la distribución, como son: la media, mediana, varianza, desviación estándar, simetría, curtosis, valor máximo y valor mínimo. Es necesario que la muestra cumpla una serie de requisitos como son: a) que su distribución de probabilidad sea normal, b) que no exista tendencia, es decir que sea estacionaria al menos la media, c) que no se vea afectada por valores atípicos, distribucionales y espaciales, d) que tenga una distribución espacial homogénea (Moral, 2004; Mejía *et al.*, 2007).

ANÁLISIS ESTRUCTURAL

La descripción de la estructura espacial de una variable se realiza por medio de la función semivariograma. La función del semivariograma se define como:

$$\gamma(x_i, x_j) = \frac{1}{2} \text{Var} [Z(x_i) - Z(x_j)]$$

Para el caso donde la función $Z(x)$ sea débilmente estacionaria, donde $E[Z(x_i) - Z(x_j)] = 0$, se tiene que:

$$\gamma(x_i, x_j) = \frac{1}{2} \text{Var} [Z(x_i) - Z(x_j)] = \frac{1}{2} E \{ [Z(x_i) - Z(x_j)]^2 \}$$

Y además se considera que el semivariograma no depende de los puntos particulares x_i y x_j sino de la distancia entre ellos $|x_i - x_j| = h$ en el caso de que la variable $Z(x)$ sea isotrópica o del vector $(x_i - x_j)$ en el caso de anisotropía.

La función semivariograma es estimada a partir de los datos medidos usando la siguiente ecuación:

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2N_h} \sum_{\alpha=1}^{N_h} [z(x_{\alpha} + h) - z(x_{\alpha})]^2$$

Donde $z(x_{\alpha})$ son los valores muestrales en los puntos x_{α} , $z(x_{\alpha}+h)$ son los datos muestrales a una distancia h y N_h representa el número de pares de puntos separados por una distancia h .

Este semivariograma experimental es necesario ajustarlo a modelos que generalicen lo observado a cualquier distancia. Existen diversos modelos teóricos de semivarianza que pueden ajustarse al semivariograma experimental. En Isaaks & Srivastava (1989) se presenta una discusión respecto a las características y condiciones que éstos deben cumplir. En general dichos modelos pueden dividirse en no acotados (lineal, logarítmico, potencial) y acotados (esférico, exponencial, gaussiano). Los del segundo grupo garantizan que la covarianza de los incrementos es finita, por lo cual son ampliamente usados cuando hay evidencia de que presentan buen ajuste. Todos estos modelos tienen tres parámetros comunes (Fig. X) que son descritos a continuación:

1) EFECTO PEPITA

Se denota por C_0 y representa una discontinuidad puntual del semivariograma en el origen (Fig. X). Puede ser debido a errores de medición en la variable o a la escala de la misma. En algunas ocasiones puede ser indicativo de que parte de la estructura espacial se concentra a distancias inferiores a las observadas (Isaaks & Srivastava 1989; Websters & Oliver, 2007).

2) MESETA

Es la cota superior del semivariograma. También puede definirse como el límite del semivariograma cuando la distancia h tiende a infinito. La meseta puede ser o no finita. Los semivariogramas que tienen meseta finita cumplen con la hipótesis de estacionariedad fuerte; mientras que cuando ocurre lo contrario, el semivariograma define un fenómeno natural que cumple sólo con la hipótesis intrínseca. La meseta se denota por C_1 o por $(C_0 + C_1)$ cuando la pepita es diferente de cero (Isaaks & Srivastava 1989; Websters & Oliver, 2007).

3) RANGO

En términos prácticos corresponde a la distancia a partir de la cual dos observaciones son independientes. El rango se interpreta como la zona de influencia. Existen algunos modelos de semivariograma en los que no existe una distancia finita para la cual dos observaciones sean independientes; por ello se llama rango efectivo a la distancia para la cual el semivariograma alcanza el 95% de la meseta (*op. cit.*).

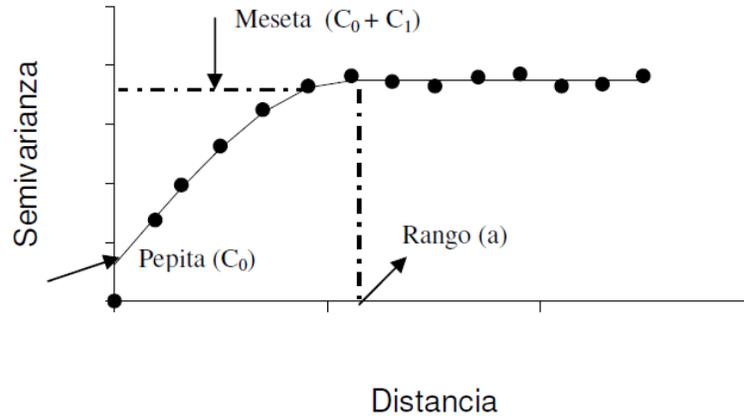


Figura 11. Parámetros del variograma (Mejia *et al.*, 2007)

PREDICCIONES

Las predicciones en los métodos geoestadísticos están basados en la regresión lineal que estiman los valores de un atributo en sitios no muestreados usando funciones de peso que reflejan la correlación de la variable Z entre sitios muestreados (x_α) y el sitio para ser estimado (x_0). La variable muestrada de interés en cada sitio x_α de la región, se considera una variable aleatoria $Z(x_\alpha)$ (Isaaks & Srivastava 1989; Websters & Oliver, 2007).

Con el fin de estimar $Z_0=Z(x^\alpha)$ se considera un estimador lineal

$$Z_0^* = \sum_{\alpha} \lambda_{\alpha} Z(x_{\alpha})$$

Los pesos λ_i son determinados usando las dos condiciones siguientes:

- 1) El estimador Z_0^* no debe ser sesgado,

$$E[Z_0^*-Z_0] = 0$$

- 2) La varianza del error de estimación debe ser mínima:

$$Var [Z_0^*-Z_0]$$

Donde Z_0 representa el valor exacto pero desconocido de Z en x_α .

Para obtener los pesos se debe resolver el sistema de ecuaciones:

$$A\lambda=b$$

En donde;

$$A = \begin{vmatrix} \gamma(x_1, x_1) & \gamma(x_1, x_2) & \dots & \gamma(x_1, x_n) & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & 1 \\ \gamma(x_n, x_1) & \gamma(x_n, x_2) & \dots & \gamma(x_n, x_n) & \dots \\ 1 & 1 & 1 & \dots & 0 \end{vmatrix}$$

$$\lambda = \begin{vmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \dots \\ \lambda_n \\ \psi(x_0) \end{vmatrix}$$

$$b = \begin{vmatrix} \gamma(x_1, x_0) \\ \gamma(x_2, x_0) \\ \dots \\ \gamma(x_n, x_0) \\ 1 \end{vmatrix}$$

Siendo $\gamma(x_i, x_j)$ el valor del variograma entre los puntos i y j , λ_i el peso i , y $\gamma(x_i, x_0)$ el variograma entre el punto i y el punto a interpolar (x_0).

ANÁLISIS DE LOS ERRORES ESTADÍSTICOS

Existe una forma de comprobar la fiabilidad en los métodos de estimación geoestadísticos, el método se conoce como validación cruzada y consiste en un proceso iterativo que elimina un valor de la variable, calcula el semivariograma correspondiente y estima el valor eliminado a partir de dicho semivariograma. Si esto lo hacemos uno por uno con todos los valores de las variables, finalmente podremos representar todos los valores interpolados frente a sus valores reales. Para evaluar estas diferencias se calcula el error cuadrático medio. Cuanto más pequeño sea, mejores serán las predicciones (Goovaerts, 2000). Su expresión matemática es:

$$\sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{\{Z(s_i) - z((s_i))\}^2}{n}}$$

ANTECEDENTES DE APLICACIÓN EN MÉTODOS GEOESTADÍSTICOS Y CARBONO

Hay una serie de estudios que emplean la Geoestadística en el mapeo de la biomasa aérea, por ejemplo en un bosque Toscana, Italia mediante Kriging ordinario ajustado a un modelo exponencial y asumiendo un efecto pepita de cero se predijo el volumen de la madera derivado de información obtenida de los sitios de muestreo del inventario forestal, resultando en estimaciones con un error cuadrático medio de 99.4m³/ha y una correlación entre el volumen estimado y el medido de 0.56, concluyendo que este método es limitado en la estimación de parámetros cuyo valores varían abruptamente (Maselli, 2006). En la Amazona Brasileña, se mapeó la distribución espacial de la biomasa forestal usando Kriging con deriva externa, el cual es un estimador multivariado porque se auxilia de variables externas relacionadas con la variables de interés para una mejor estimación; para este estudio se consideró la textura del suelo, el tipo de bosque y la altitud, resultando en una predicción con un error cuadrático medio de 35.4 tC/ha, concluyendo que la geoestadística es más apropiada para estimar la distribución de la biomasa aérea que el usar un promedio simple ó técnicas estadísticas que no contemplan la correlación espacial (Sales, 2007).

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El mapeo del contenido de carbono realizado por el INIFAP se realizó tomando en cuenta todos los conglomerados (299) en el método geoestadístico (Sección 2 inciso f). Estos representan las principales coberturas forestales y uso de suelo del suelo de conservación, los cuales presentan diferentes almacenes de carbono en función de la estructura y densidad de la cobertura forestal, por lo que al integrar los conglomerados muestreados al interpolador considera no sólo la variabilidad de la cobertura en sí, sino también la generada por los otros tipos de cobertura. Además de estimar en coberturas para las cuales no hay información (e.g. Bosque de Encino) y/o existe poca información puntual para realizar una estimación (e.g. Bosque inducido)

Por lo anterior, en este estudio se plantea realizar 3 estimaciones derivadas de los siguientes métodos geoestadísticos a) univariados (Kriging Ordinario), b) multivariados (Cokriging Ordinario) y c) estocásticos (Conditional simulation) con los datos dasométricos tanto de la CORENA como los resultantes del INIFAP a fin comparar las estimaciones por tipo cobertura forestal que tenga sitios experimentales suficientes (> de 30 conglomerados) como es el caso de Bosque de Oyamel, Pino y Mixto, con tal de generar una capa de carbono con menos incertidumbre. Una vez obtenido las estimaciones con menor incertidumbre por

tipo de cobertura forestal, se elaborará una capa final que represente de mejor forma la variabilidad espacial de las densidades de carbono en los bosques del suelo de conservación.

OBJETIVOS

General

- Elaborar un mapa de la distribución espacial de los almacenes de carbono en las principales coberturas forestales del suelo de conservación.

Particulares

- Probar métodos geoestadísticos univariados (Kriging ordinario) , multivariados (Co-kriging ordinario) y estocásticos (Conditional simulation) por tipo de cobertura forestal.
- Evaluar el error cuadrático medio de la interpolación por tipo de cobertura forestal.

DIAGRAMA METODOLÓGICO

MÉTODO

Método de estimación kriging ordinario (KO)

Si la función aleatoria $Z(x)$ se asume débilmente estacionaria, y además se supone una media constante m para alguna vecindad cuyo valor es desconocido, se tiene que:

$$E\{Z(x)\}=m$$

Esta condición conduce al modelo denominado kriging ordinario (KO). La forma del estimador Kriging y las condiciones que determinan los pesos anteriormente descritas conducen para al caso de media desconocida y constante, al sistema de $N+1$ ecuaciones denominado sistema de Kriging Ordinario para los coeficientes λ_j y el parámetro de Lagrange μ .

$$\sum_{j=1}^N \lambda_j \gamma(x_i, x_j) - \mu = \gamma(x_i, x_0)$$
$$\sum_{j=1}^N \lambda_j = 1$$

$i = 1, \dots, N$

Los coeficientes λ_j son las soluciones de este sistema de ecuaciones. El variograma entre los datos medidos $Z(x_i)$ y $Z(x_j)$ se denota por $\gamma(x_i, x_j)$ y $\gamma(x_i, x_0)$ es el variograma entre los valores medidos y el punto a evaluar.

Método de estimación Cokriging Ordinario (CKO)

El método de cokriging considera dos variables aleatorias estacionarias y correlacionadas $Z_1(x)$ y $Z_2(x)$ con medias constantes pero desconocidas m_1 y m_2 que son medidas en un dominio dado, pero no necesariamente en los mismos sitios de muestreo. La situación de mayor importancia para el método de cokriging ocurre cuando los sitios de muestreo de la variable de interés $Z_i(x)$ están incluidos en los sitios de muestreo de la variable secundaria $Z_j(x)$, es decir cuando la variable auxiliar está disponible en más sitios que la variable primaria.

El estimador del método cokriging ordinario (CKO), es una combinación lineal de todos los datos disponibles para las dos variables aleatorias $Z_1(x)$ y $Z_2(x)$ con pesos w_i apropiados, representa el valor estimado para la variable Z_1 en el punto x_0 del dominio de interés :

$$Z_1^*(x_0) = \sum_{i=1}^{n_i} w_{1i} Z_1(x_i) + \sum_{j=1}^{n_j} w_{2j} Z_2(x_j)$$

Los pesos ω_{1i} y ω_{2j} son los pesos CKO que debemos determinar.

El error de estimación es $R = \sum_i \omega_{1i} Z_1(x_i) + \sum_j \omega_{2j} Z_2(x_j) - Z_1(x_0)$ ó en forma matricial

$$R = W^T Z$$

Donde

$$W^T = [\omega_{11}, \dots, \omega_{1n1}, \omega_{21}, \dots, \omega_{2n2}, -1]$$

$$Z^T = [Z_{11}, \dots, Z_{1n1}, Z_{21}, \dots, Z_{2n2}, Z_1(x_0)]$$

Los pesos deben satisfacer dos condiciones:

1.- El estimador CKO no debe ser sesgado.

2.- La varianza de R debe ser mínima.

Para considerar la segunda condición, varianza mínima (R), junto con las dos condiciones para los pesos, se usa el método de multiplicadores de Lagrange.

La varianza CKO se puede expresar como:

$$\text{Var}\{R\} = \text{Cov}(Z_1(x_0), Z_1(x_0)) + \lambda_1 - \sum_i \omega_{1i} \text{Cov}(Z_1(x_i), Z_1(x_0)) - \sum_j \omega_{2j} \text{Cov}(Z_2(x_j), Z_1(x_0))$$

La ecuación CKO se puede escribir en términos de las funciones de semivariograma si se hace la suposición de que las covarianzas cruzadas de los incrementos son simétricas, es decir si:

$$\text{Cov}[Z_1(x_i), Z_2(x_j)] = \text{Cov}[Z_2(x_i), Z_1(x_j)]$$

Para este caso se obtiene:

$$\sum_i \omega_{1i} \gamma(Z_1(x_j), Z_1(x_i)) + \sum_i \omega_{2i} \gamma(Z_1(x_j), Z_2(x_i)) - \lambda_1 = \gamma(Z_1(x_j), Z_1(x_0)) \quad j=1, \dots, n1$$

$$\sum_i \omega_{1i} \gamma(Z_2(x_j), Z_1(x_i)) + \sum_i \omega_{2i} \gamma(Z_2(x_j), Z_2(x_i)) - \lambda_2 = \gamma(Z_2(x_j), Z_1(x_0)) \quad j=1, \dots, n2$$

$$\sum_i \omega_{1i} = 1$$

$$\sum_i \omega_{2i} = 0$$

Donde

$$\gamma(Z_1(x_j), Z_1(x_i)) = \gamma_{11}(x_j - x_i)$$

$$\gamma(Z_1(x_j), Z_2(x_i)) = \gamma_{12}(x_j - x_i)$$

Para la estimación del semivariograma cruzado se considera la expresión:

$$\gamma_{ij}^*(h) = \frac{1}{2N_h} \sum_{\alpha=1}^{N_h} [z_i(x_\alpha + h) - z_i(x_\alpha)][z_j(x_\alpha + h) - z_j(x_\alpha)]$$

Método de estimación Conditional Simulation

Conditional simulation^{††} también conocido como interpolación estocástica es un método geoestadístico donde el valor de $Z(x)$ está basado en simulaciones estocásticas basadas técnicas de simulación Monte Carlo y Secuencial Gaussiano. Este método a comparación de los de la serie de Kriging está enfocado en la variabilidad local, disminuye los efectos de suavizado y la creación de artefactos (Stein and Van Der Meer, 2002).

Conditional simulation es la generación de realizaciones sintéticas de una función aleatoria que poseen la misma estadística espacial de las muestras. Por lo que se le considera un algoritmo apropiado ya que enfatiza los atributos globales del espacio, su histograma y patrón espacial. Se considera este método como exacto, dado que la condición en la simulación es la estimación de los $z(x_i)$, $i=1,2,\dots,N$ y valores simulados $Z_c(x_j)$, $j=1,2,\dots,T$. donde los valores estimados tengan el mismo valor que los de la muestra (Webster & Oliver, 2007).

$$Z_c(x_j) = z(x_i) \quad \text{para todo } i = 1,2,\dots,N.$$

Donde $Z_c(x_j)$ se obtiene de los valores verdaderos pero desconocidos acorde al modelo de dependencia espacial adoptado.

Considerando lo que sucede cuando estimamos Z en la localización z_0 con el método Kriging donde no se tiene un punto de muestreo; el verdadero valor $z(x_0)$ es estimado por $Z(x_0)$ con un error $z(x_0) - Z(x_0)$ el cual es desconocido:

$$z(x_0) = Z(x_0) + \{z(x_0) - Z(x_0)\}$$

Una característica de Kriging es que el error es independiente del estimado.

$$E\{Z(y)\{z(x) - Z(x)\}\} = 0 \quad \text{para toda } x, y$$

Esta condición es usada en la simulación.

^{††} En geoestadística el término simulación es usado en la creación de valores de una variable que emule las características generales de aquellos valores observados en el mundo real.

Se crea un campo simulado a partir de la misma función de covarianzas o el variograma con datos condicionados a los valores dados $Z_s(x_j), j=1,2,\dots,T$. que incluyen los puntos muestreados $z(x_i), i=1,2,\dots,N$. Después se estima en la localización de x_0 a partir de los valores simulados en los puntos de la muestra para obtener una estimación $Z_s(x_0)$. Su error, $z_s(x_0)-Z_s(x_0)$, viene de la misma distribución como en el caso de Kriging. Por lo que se reemplaza en la ecuación de error de Kriging para obtener nuestro valor simulado como:

$$Z_C(x_0) = Z(x_0) + \{z_s(x_0) - Z_s(x_0)\}$$

El resultado tiene las siguientes propiedades descritas a continuación:

- 1) Los valores simulados son realizaciones de un proceso aleatorio con la misma expectación como los datos originales:

$$E[Z_s(y)] = E[Z(x)] = \mu \quad \text{para todas las } x$$

Donde μ es la media.

- 2) Los valores simulados deberían tener el mismo variograma que el original.
- 3) Son estimaciones exactas

$$Z_C(x_0) = z(x_i)$$

El proceso de la simulación en este estudio se realizó con el método de secuencia Gaussiana (Gaussian simulation). Donde cada valor es simulado secuencialmente acorde a su función de distribución acumulada, la cual es determinada en cada localización a ser simulada. Los datos condicionados abarcan todos los datos muestreados y los valores simulados dentro del vecindario al punto a ser simulado. Los pasos de este algoritmo son similares a los de Kriging Ordinario, este se basa en los siguientes pasos principales:

- 1) Realiza el análisis de normalidad de los datos, en caso de que los datos no la presenten realiza transformaciones para obtener una distribución normal estándar.
- 2) Calcula el variograma experimental y el variograma teórico.
- 3) Especifica las coordenadas de los puntos donde se quiere realizar la simulación (matriz espacial ó rejilla)
- 4) Determina la secuencia en la cual los puntos $x_j, j=1,2,\dots, N$ serán obtenidos por la simulación. Selecciona los puntos de forma aleatoria para maximizar la diversidad de las realizaciones.

5) Simula en cada punto:

- a. Usa Kriging simple con el variograma modelo obtenido $Z(x_i)$ y $\sigma_k^2(x_i)$.
- b. Extraer un valor de forma aleatoria de la distribución normal $N\{Z(x_i), \sigma_k^2(x_i)\}$.
- c. Inserta este valor en la matriz espacial ó rejilla (grid) en x_i , y lo agrega dentro de los datos.
- d. Procede al siguiente nodo y simula el valor en este punto en la matriz.
- e. Repite a) y c) hasta que todos los nodos han sido simulados.

Este proceso se repite n veces (iteracciones) hasta obtener mejores estimaciones en la media del área de estudio y una menor incertidumbre definida por intervalos de confianza.

El cálculo de los variogramas experimentales, variogramas teóricos y predicciones por tipo de cobertura se realizó mediante el software GS+9.

Bibliografía

Acosta-Mireles, M., Vargas-Hernández, J., Velásquez-Martínez, A. Y Etchevers-Barra, J. D. 2002. Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca, México. *Agrociencia* 36(6):725-736.

Brown, Sandra (2001) Measuring carbon in forest: current status and future challenges, *Environmental Pollution* 116: 363-372.

De Jong, Bernardust, (2001) Uncertainties in estimating the potential for carbon mitigation of forest management, *Forest Ecology and Management*, 154:2, 85-104.

Espinoza Mónica, 2005, "Estimación del contenido y captura de carbono en el bosque de *Pinus hartwegii* de la cuenca alta del río Magdalena, Magdalena Contreras, D.F., Tesis de licenciatura, Facultad de Ciencias, UNAM, México, 72p.

Fragoso, L. P. 2003. Estimación del contenido y captura de carbono en biomasa aérea del predio "Cerro Grande" municipio de Tancítaro Michoacán, México. Tesis de Licenciatura. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Facultad de Agrobiología "Presidente Juárez", México. 65p.

Galeana Pizaña, José Mauricio. 2008. Estimación del contenido y captura potencial de carbono, su valor económico; en la cuenca del Río Magdalena, D.F. México, Tesis de Licenciatura, Lic. en Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM.

Goetz, S., Baccini, A., Laporte, N., Johns, T., Walker, W., Kellndorfer, J., Houghton, R., and Sun, M. (2009) Mapping and monitoring carbon stocks with satellite observations: a comparison review. *Carbon Balance and Management* 2009, 4:2.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2001. Cambio Climático 2001; Informe de síntesis. Resumen para responsables de políticas. Una evaluación del grupo intergubernamental de expertos sobre el Cambio climático. 94 pp.

IPCC. 2007. Cambio Climático 2007; Informe de síntesis. Resumen para responsables de políticas. Una evaluación del grupo intergubernamental de expertos sobre el Cambio climático. 114 pp.

Lashof, D.A y D.R. Ahuja. 1990. Relative Contributions of Greenhouse Gas Emissions to Global Warming. *Nature*, 344:5, pp.529-531.

Magaña, V. 1994. El pronóstico del tiempo para los próximos días, meses, años.... En: *Ciencias*, No 35. pp. 15 – 22.

Masera, O. Cerón A. D. y Ordóñez D. J.A.B., 2001, “Forestry mitigation options for Mexico: Finding synergies between nacional sustainable development priorities and global concerns”, En: *Mitigation and adaptation Strategies for Global Change*, p. 291-312.

Masera, O. 2006. La ecología global desde la perspectiva del cambio climático. En: *Ciencias*, No 81. pp. 6 – 15.

Nava Mariana, 2005, “Carbono almacenado como servicio ecosistémico y criterios de restauración en el Bosque de *Abies religiosa* de la Cuenca del Río Magdalena, D.F., México, Tesis de Maestría, Facultad de Ciencias, UNAM, 70p.

Ordóñez J.A.B., 1999, “Captura de carbono en un bosque templado: el caso de San Juan Nuevo, Michoacán”, Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias, UNAM, D.F., p. 7-9.

Ordóñez, J.A.B., B. H.J. de Jong y O. Masera, 2001, “Almacenamiento de Carbono en un bosque de *Pinus pseudostrobus* en Nuevo San Juan, Michoacán”, *Madera y Bosques* 7(2), 27-47.

Ordóñez, J.A.B., de Jong B.H.J., García-Oliva, F., Aviña, F.L., Pérez, J.V., Guerrero, G., Martínez, R. y Masera, O. 2008. Carbon content in vegetation litter, and soil under 10 different land-use and land-cover classes in the Central highlands of Michoacán, Mexico. *Forest Ecology and Management*.

Sathaye J.A., Makundi W.R., Andrasko K., Boer R., Ravindranath N.H., Sudha P., Rao S., Lasco R., Pulhin F., Masera O., Cerón A., Ordóñez J.A.B, Deying X., Zhang X. y Zuomin S., 2001, “Carbon mitigation potential and costs of forestry options in Brazil, China, India, Indonesia, México, Philippines and Tanzania”, En: *Mitigation and adaptation Strategies for Global Change*, p 185-211.

Schreuder, H. T., R. Ernst and H. Ramírez M. 2004. Statistical techniques for sampling and monitoring natural resources. Forest Service-USDA. General Technical Report RMRS-GTR-126. USA. 111 p.

Tipper, R., Jong, B., y Taylor, J., 1996. The economics of carbon sequestration by community forestry in Chiapas, southern Mexico. En Edición.

Valenzuela, H.T., 2001, "Estimación de secuestro de Carbono en Bosques Naturales de Oyamel en el sur del Distrito Federal", Tesis Profesional, Chapingo, Edo. De México, p 59-60.

Estudio: *Evaluación de la vulnerabilidad ambiental que presenta el suelo de conservación por la pérdida de servicios ecosistémicos a consecuencia del cambio de uso de suelo*

INFORME FINAL: PRIMERA SECCION

Ubicación y análisis de los sitios más relevantes para la infiltración

Noviembre 12, 2010

Presentación

Este documento se inicia con una introducción en la que se plantean las particularidades para implementar una metodología para establecer categorías de aptitudes para la infiltración en el suelo de conservación del Distrito Federal. Posteriormente, se aborda el modelo cartográfico y la metodología para la estimación de aptitudes para la infiltración. En un siguiente apartado se presentan los recursos de información que se utilizarán, y se concluye con un inciso en el que se plantea la Refinación del Modelo propuesto.

Introducción

Recarga es el proceso de alimentación del acuífero con agua proveniente de cualquier dirección. La infiltración puede definirse como el movimiento del agua desde la superficie hacia la sub superficie¹. Estos autores igualmente indican que en algunas ocasiones la infiltración puede ser considerada equivalente a la recarga. Considerando las dificultades para estimar recarga mediante un modelo cuantitativo (basado por ejemplo en las ley de Darcy, Green Ampt o Richards) y parametrizarlo (varias de ellas mencionadas claramente por Beven 2002) una aproximación para estimar la capacidad de infiltración consiste en la definición de áreas de aptitudes para la infiltración a través de la implementación de un modelo geo espacial basado en determinaciones cuantitativas y cualitativas que permiten establecer categorías de aptitudes para la infiltración, a fin de evaluar áreas potenciales de recarga de acuífero. El modelo cualitativo puede ser complementado con un rango de valores que permitan ofrecer una idea del significado en términos cuantitativos de las categorías cualitativas.

¹ Scanlon et al., 2002

Los suelos y la geología de la parte sur del Distrito Federal poseen la propiedad de ser muy permeables (ver ilustración 1). Sin embargo, zonificar las áreas que aportan a la recarga de acuífero considerando sólo esta información nos limita puesto que la capacidad de infiltración no sólo es dependiente de la permeabilidad geológica y de la misma permeabilidad de los suelos, sino también de otros factores como la acción de la precipitación sobre el suelo, el proceso de conectividad hidrológica que produce acumulaciones de flujo que en ciertos puntos supera con creces la cantidad de precipitación registrada, la cubierta terrestre, los procesos de interceptación y evapotranspiración, la acción del hombre y los animales, el grado de humedad antecedente del suelo y la pendiente.

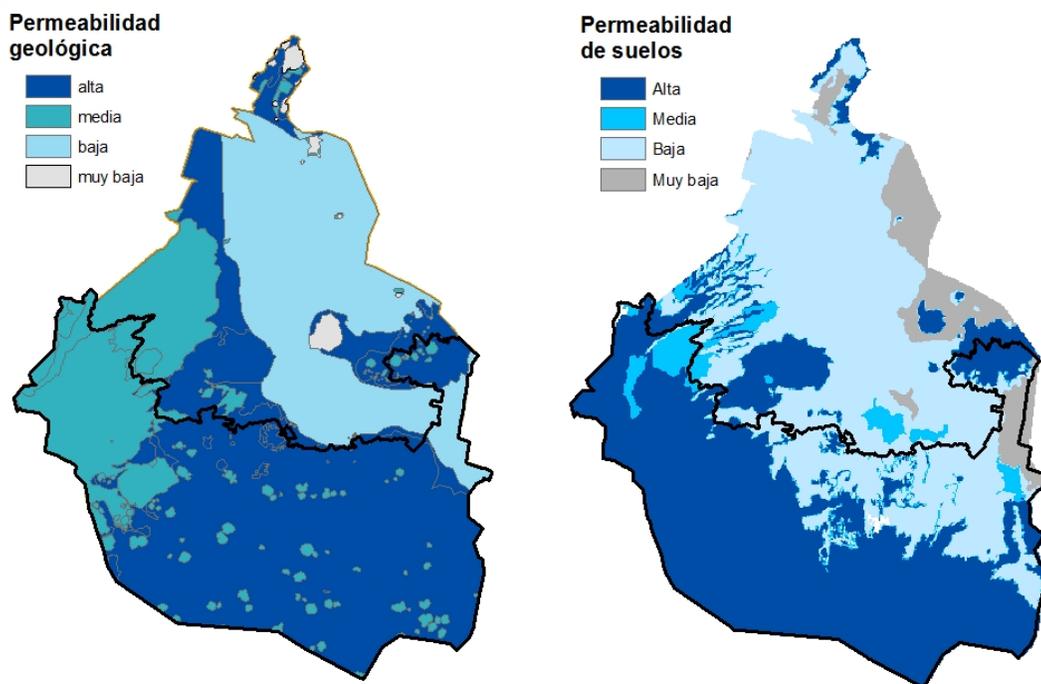


Ilustración 1: Permeabilidad geológica (Mooser 2002, izquierda) y Permeabilidad de suelos de acuerdo a una clasificación de grupos hidrológicos de suelos (obtenida a partir de análisis de la carta de suelos de INEGI, derecha).

Modelo Cartográfico y Metodología

En la ilustración 2 se presenta el modelo cartográfico de aptitudes para la infiltración que se implementó y que se actualiza y refina para establecer dichas áreas. A través

de este modelo se obtendrá un mapa indicador de las áreas de recarga de acuífero mediante la determinación de áreas con bajo, moderado, alto y muy alto potencial de infiltración. El diagrama muestra la secuencia de los procesos para determinar estas áreas y así poder zonificar y valorar las áreas que aportan a la recarga de acuífero. La primera etapa del modelo consiste en definir el sistema de conectividad hidrológica superficial expresado como direcciones de flujo del agua que se precipita en cada una de las celdas en las que se discretiza el territorio de estudio y como acumulaciones de precipitación provenientes de otras celdas que fluyen a una celda específica (acumulaciones de flujo). Esto es realizado de acuerdo con lo propuesto por Jenson & Domingue (1998) utilizando un MED (ilustración 2). El primer paso de la definición del sistema de conectividad hidrológica superficial consiste en la remoción de profundidades artificiales, conocido como llenado de huecos (*fill sinks*), mediante un proceso de interpolación el cual se realiza antes de crear el *grid* de direcciones de flujo. Esto se hace debido a que las depresiones artificiales generadas por imprecisiones del MED pueden alterar significativamente la dirección de flujo. Posteriormente, se hace el cálculo de las direcciones de flujo. A partir de esta capa geográfica se crea la capa de acumulaciones de flujo. La definición de la red de drenaje se hace definiendo un valor límite de las acumulaciones de flujo, que indica el valor mínimo de acumulaciones de flujo que una celda debe contener para considerarla dentro de la red de drenaje.

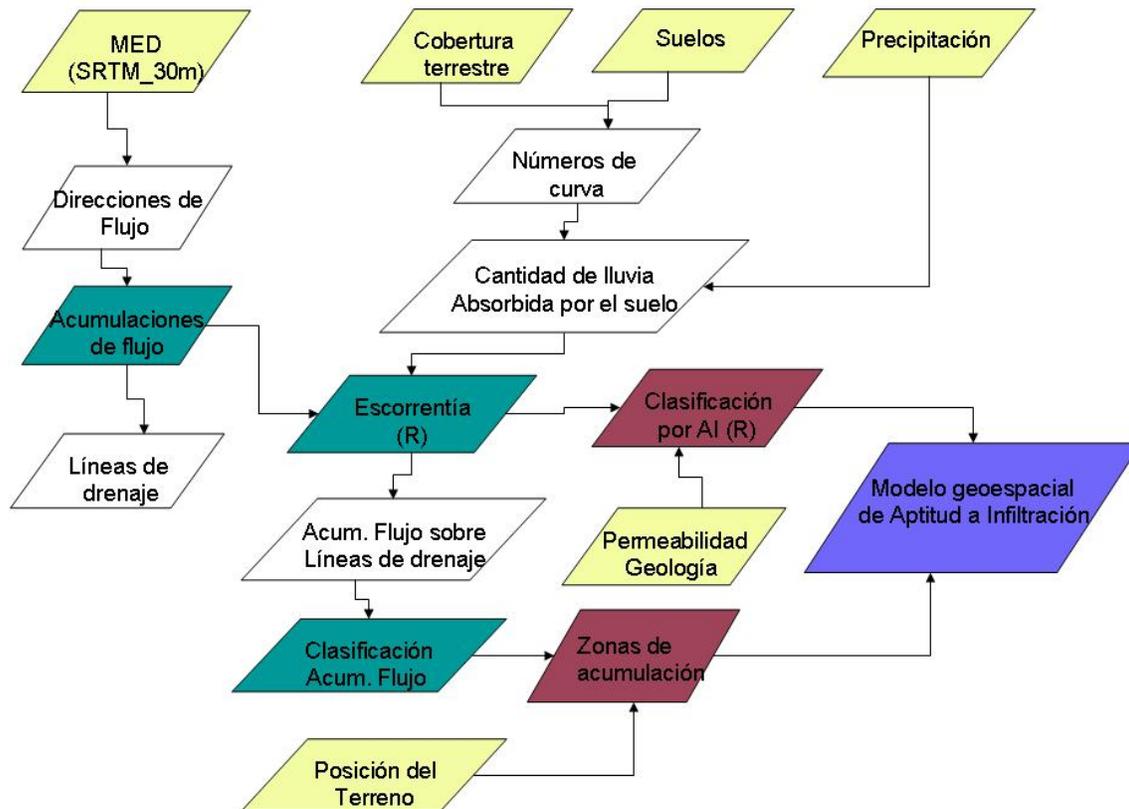


Ilustración 2: Modelo cartográfico para la estimación de aptitudes a infiltración

Otra etapa importante dentro del modelo es la estimación de escorrentía y del agua absorbida por el suelo mediante el método de número de curva del SCS². Aunque normalmente este método es considerado como una opción para la estimación de escorrentías como lo indican Mishra and Singh (2003) el método también puede ser leído como una ecuación de infiltración. No obstante las críticas en cuanto a su formulación teórica (como los indicados por Beven 2001) y a sus desviaciones con respecto a mediciones, el método continua siendo utilizado para una variedad de propósitos de investigación debido a que proporciona resultados muy útiles que pueden ser obtenidos en poco tiempo y con costos reducidos y que además es muy apropiado para su implementación en un ambiente de SIG.³ Igualmente continua siendo investigado y mejorado como lo muestra el estudio de Sahu et al. (2010).

El método es un conjunto empírico de relaciones para definir el número de curva o tipo de respuesta de una superficie determinada a la precipitación registrada, cuyos

² Soil Conservation Service, 1985

³ Rao et al. 1996; Sharma et al. 2001; Sharma and Kumar, 2002; Coskun 2005

valores caen en el intervalo de 1 a 100. Es una función del grupo de suelo, de la clasificación de las coberturas terrestres y del estado antecedente de humedad de los suelos. El método es una forma para estimar la cantidad de agua de lluvia que escurre a partir de datos de precipitación que puede ser por ejemplo un evento promedio multianual o un evento aislado de precipitación, o precipitaciones semanales, mensuales o anuales. Las condiciones del sitio determinadas por la cobertura del terreno y las propiedades hidrológicas del grupo de suelo son factores determinantes para este método utilizado para reconocer pérdidas que varían en función de la intensidad de la precipitación y de las acumulaciones de flujo y que están definidas en buena medida por la cantidad de humedad que pueda absorber el suelo. Entre las pérdidas o abstracciones iniciales consideradas en el método se cuentan a la interceptación y la evapotranspiración. De esta forma, las propiedades hidrológicas del suelo y la cobertura del terreno se combinan para calcular el número de curva para un sitio que es usado para estimar la magnitud del escurrimiento para una cantidad específica de lluvia y la cantidad de lluvia absorbida por el suelo. Para ello se usa la siguiente expresión:

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{(P + 0.8S)} \quad \text{y} \quad S = 1000/CN - 10$$

Donde:

Q: Escorrentía (mm.)

P: Precipitación (mm.)

S: cantidad de lluvia que puede absorber el suelo durante la tormenta (mm.)

En cuanto a grupos hidrológicos de suelos estos se definen de acuerdo a las siguientes especificaciones. El grupo A se conforma por suelos caracterizados por tener un bajo potencial de escorrentía. Estos suelos tienen una alta tasa de infiltración incluso cuando están húmedos. Los suelos del grupo B tienen una tasa de infiltración moderada cuando están húmedos, mientras que los suelos del grupo C son los que tienen tasas de infiltración lentas cuando están húmedos. Los suelos del grupo D son los que se consideran tener un alto potencial para escorrentía, debido a que tienen tasas de infiltración muy lentas cuando están húmedos. El mapa resultante de grupos hidrológicos de suelo se combina con el mapa de cobertura del terreno y de ahí se asignan los números de curva correspondientes a cada pixel de acuerdo a lo indicado en la Tabla 1. Con la cartografía de números de curva, grupo hidrológico de suelos y de precipitación se obtiene la cantidad de agua que escurre en cada celda o sea la denominada precipitación efectiva. Posteriormente se obtiene la cantidad de lluvia que puede absorber el suelo (S) para la magnitud de precipitación considerada, misma que puede ser considerada como infiltración. Como siguiente procedimiento se clasifica cada celda en función de la cantidad que se absorbe en el suelo (S) o que se infiltra en cinco intervalos de igual amplitud: muy bajo, bajo, moderado, alto y muy alto.

Tabla 1: Número de curva para las combinaciones de cobertura y grupo hidrológico de suelo

COBERTURA	GRUPO HIDROLÓGICO			
	A	B	C	D
Agua/humedales	100	100	100	100
Pastizal/Matorral	39	61	74	80
Suelo Desnudo	59	74	82	89
Bosque	30	55	70	77
Agrícola	67	77	83	87
Urbano	57	72	81	86

El mapa de aptitudes a infiltración que se puede obtener de acuerdo a los procedimientos indicados hasta el momento es uno que considera solo una única entrada de agua: la precipitación. En realidad existe otra entrada muy considerable: el agua que escurre proveniente de otras celdas (acumulaciones de flujo, ver ejemplo en ilustración 4). Considerando esta observación el mapa de aptitudes a infiltración se refina mediante la inclusión de las cantidades de precipitación (escorrentías) provenientes de celdas vecinas a cada celda de análisis. Para ello, se determinan las acumulaciones de flujo sobre las líneas de drenaje que constituyen un aporte externo de agua adicional a la precipitación y que en ocasiones puede superar ampliamente su magnitud.

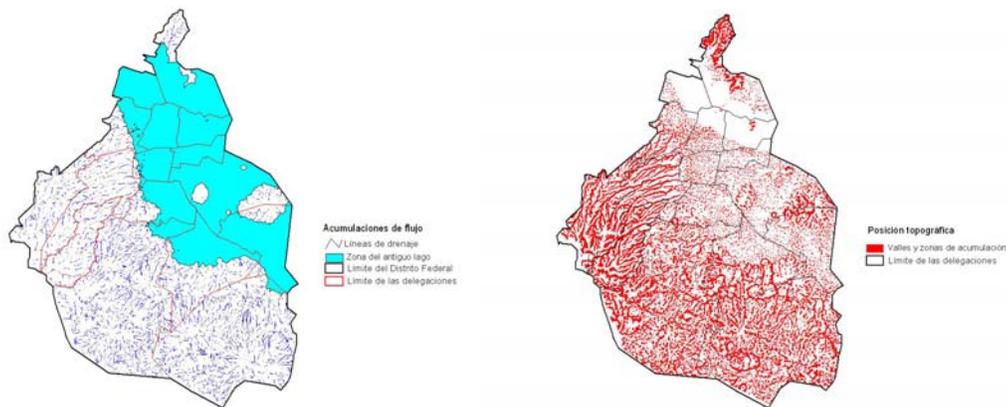


Ilustración 3: Ejemplo de capas geográficas con acumulaciones de flujo (izquierda) y posición topográfica (derecha)

Una vez obtenida la clasificación de las superficies del área de estudio en función de la cantidad de lluvia que se infiltra, se efectúa una validación del mismo utilizando información de geología (permeabilidad geológica). De esta forma, es posible establecer cinco categorías de aptitud para infiltración: muy baja, baja, moderada, alta y muy alta. Las categorías serán resultado de la combinación de la información de agua absorbida por el suelo y el de permeabilidad geológica.

Para definir la extensión geográfica de cada una de las líneas de drenaje con acumulaciones de flujo considerables (indicadas en el mapa anterior), es decir las superficies que conducen agua proveniente predominantemente de escorrentías originadas en otras celdas diferentes a la celda de análisis, se utiliza el mapa de posición topográfica (ilustración 4) de acuerdo a lo indicado a continuación. Mediante la sobreposición de los mapas de acumulaciones de flujo sobre líneas de drenaje y el

de posición topográfica se obtiene la extensión geográfica de las áreas referidas como de acumulación de flujos. Este procedimiento significa una refinación de las cinco categorías hasta ahora definidas. Así cada una de ellas se subdividirá en dos subcategorías. Como ejemplo de lo anterior incluimos el mapa de aptitudes a infiltración de diciembre de 2007 (ilustración 4) mismo que será refinado y actualizado. El mapa que se obtendrá utilizará (al igual que el de la versión anterior indicada en la ilustración 7) para ambas subcategorías el mismo color en dos diferentes tonalidades, de forma que el tono más oscuro refiere a las zonas ubicadas en zonas de acumulación de flujos, de acuerdo a su definición mediante el mapa de paisaje topográfico (tono oscuro del azul en el mapa, tienen mayor valor ambiental por su potencial de infiltración que las áreas que también son de alta de infiltración (color azul) pero que no están ubicadas sobre zonas de escurrimiento (azul más claro).

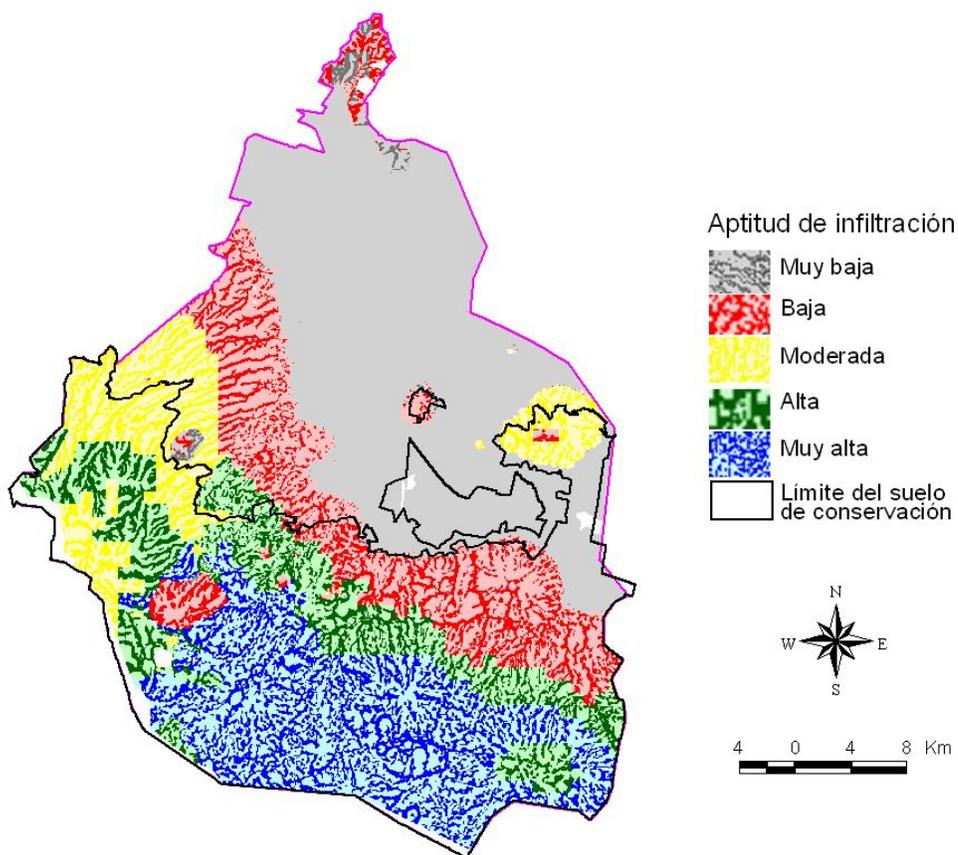


Ilustración 4: Mapa final de aptitudes a infiltración obtenido en diciembre de 2007 y que será actualizado y refinado

Recursos de información

De lo anterior se puede desprender que la información geográfica requerida para definir aptitudes a infiltración consiste de cartografía sobre suelos, precipitación, cobertura terrestre, permeabilidad geológica y un modelo digital de elevación (MED) para definir el sistema de conectividad hidrológica superficial y el paisaje topográfico. El MED disponible proviene de la misión SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) y se reprocesó para obtenerlo a una resolución de 30 m. El mapa de precipitaciones se generará a partir de una interpolación adecuada de los datos provenientes de las estaciones en campo. Se tiene planeado generar una capa de valores de lluvia en promedio diario multianual (30 años) para la época cuando la lluvia se considera bien establecida (junio a septiembre). En la versión anterior (finales de diciembre de 2007) del modelo de aptitudes a infiltración se consideraron las lluvias diarias en promedio multianual (30 años) para un mes de precipitaciones intensas (septiembre). La razón de este cambio consiste en que se considera que las lluvias promedio y no las intensas son las que pueden generar en mayor medida el proceso de infiltración. Por su parte las muy intensas tienden mayormente a generar escorrentías. El mapa de permeabilidad de suelos (grupos hidrológicos de suelo) se obtuvo de la digitalización de las cartas del INEGI de acuerdo a la clasificación de la FAO (Food and Agriculture Organization). Esta capa es la que se complementará con las mediciones de permeabilidad de suelos efectuada por INIFAP. El mapa de permeabilidad geológica (ilustración 1) se obtuvo de Mooser (2002).

Como se mencionó el método del número de curva se basa en parte en la definición de coberturas del terreno que será efectuada mediante la clasificación de imágenes satelitales de 2010 (Landsat 5 o Spot) a ser definidas de acuerdo a su disponibilidad y su estado de calidad principalmente en cuanto a cobertura de nubes. De esta manera el 2010 será el año de referencia para la determinación de la zonas de infiltración.

En cuanto a las mediciones que se hicieron entre INIFAP y PAOT no son precisamente mediciones de Infiltración, sino de niveles de permeabilidad de suelos, aunque efectivamente al aparato se le denomina Infiltrómetro, ya que funciona en los términos de la infiltración hortoniana (decrecimiento de la capacidad de infiltración en función del tiempo, Horton 1933).

La explicación de esto radica en que la medición de infiltración como proceso real (no como proceso simulado y con condiciones controladas) requiere de hacerse en

condiciones naturales con lluvia y acumulación de escorrentías proveniente de otras superficies, considerando la configuración física de la cuenca y otros factores como la vegetación presente que constituye el primer obstáculo para que el agua fluya a través del suelo, tomando en cuenta además intercepción y evapotranspiración.

El fenómeno es un tanto más complejo que el solo considerar el paso del agua a través del suelo en condiciones no saturadas. El valor medido es como un valor potencial de infiltración que no siempre es posible alcanzar por eso podría llamársele capacidad máxima de infiltración o permeabilidad de suelos. Por ejemplo si no hay precipitación suficiente o si no se acumula agua proveniente de otras áreas aunque el valor de permeabilidad de suelos sea alto, la infiltración no se producirá.

Lo anterior no quiere decir que no sea un valor importante y una determinación muy valiosa, todo lo contrario será un aspecto importante para refinar nuestro modelo cualitativo, que igualmente aunque perfectible, si considera mejor la complejidad del fenómeno. La forma como se incluirá en el modelo de infiltración se indica en el apartado siguiente.

Refinación del Modelo Propuesto

En resumen, como es posible notar de lo anteriormente expuesto el modelo propuesto es básicamente una refinación del modelo generado anteriormente para PAOT (finales de 2006) con tres principales variantes:

- i) Refinamiento de la capa de permeabilidad de suelos (grupos hidrológicos de suelos) que no solo considerará los tipos de suelos y sus texturas, tal como se tenía antes, sino además los resultados de las 51 mediciones de puntos de infiltración realizadas por la PAOT e INIFAP.

En otras palabras, esta capa no solo considerará los tipos de suelos y sus texturas, tal como se tenía antes, sino además los resultados de las 51 mediciones de puntos de infiltración (permeabilidad) realizadas por la INIFAP y PAOT.

Estas mediciones serán interpoladas mediante kriging ordinario para generar una superficie continua de esta variable en la zona de estudio que después será combinada con las demás variables espaciales que conforman el modelo cartográfico (ilustración 2).

- ii) Otros refinamientos adicionales al modelo anterior son la inclusión de valores de lluvia en promedio diario multianual (30 años) para la época cuando la lluvia se considera bien establecida (junio a septiembre). En la versión anterior (finales de diciembre de 2007) del modelo de aptitudes a infiltración se consideraron las lluvias diarias en promedio multianual (30 años) para un mes de precipitaciones intensas (septiembre). La razón de este cambio consiste en que se considera que las lluvias promedio y no las intensas son las que pueden generar el proceso de infiltración. Por su parte las muy intensas tienden a generar escorrentías en mayor medida.

- iii) Actualización de la capa de uso y cobertura de suelos mediante una clasificación supervisada de una imagen satelital de 2010 (Landsat 5 o Spot). De esta forma se considera una excelente actualización de la cobertura terrestre y se toma como año base el mencionado 2010.

Referencias

- Beven K (2002) Towards an alternative blueprint for a physically based digitally simulated hydrologic response modelling system. *Hydrolog Process* 16:189–206
- Coskun M, Musaoglu N, Hýzal A (2005) Prediction of Hydrological Model of Yuvacik Catchment by using Remote Sensing and GIS Integration. *Proceedings of the 31st International Symposium on Remote Sensing of Environment*. Saint Petersburg, June 20-24. Available via: <http://www.isprs.org/publications/related/ISRSE/html/papers/756.pdf>. Accessed 19 Aug 2008
- Jenson S.K. y Domingue O. 1988. Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. Vol. 54 No. 11 November pp. 1593-1600
- Mooser, com. personal, 2002. Programa de Manejo Integral del suelo. Gobierno del Distrito Federal, Secretaría del Medio Ambiente, Dirección General de regulación y gestión ambiental del agua, suelo y residuos.
- R.K. Saha, S.K. Mishra, and T.I. Eldhoc, 2010. Comparative evaluation of SCS-CN-inspired models in applications to classified datasets. *Agricultural Water Management*, Volume 97, Issue 5, Pages 749-756
- Rao KV, Bhattacharya AK, Mishra K (1996) Runoff estimation by curve number method- case studies. *J Soil W Conserv* 40:1-7
- Scanlon BR, Healy RW, Cook PG (2002) Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeol J* 10:18–39
- Sharma D, Kumar V (2002) Application of SCS model with GIS data base for estimation of runoff in an arid watershed. *J Soil W Conserv* 30(2):141-145
- Sharma T, Satya Kiran PV, Singh TP, Trivedi AV and Navalgund RR (2001) Hydrologic response of a watershed to landuse changes: A remote sensing and GIS approach. *Int J Remote Sens* 22(11):2095-2108
- Soil Conservation Service (SCS): National engineering handbook. (1985) Section 4- Hydrology. Washington, DC.

INTRODUCCIÓN

El cambio climático, es la variabilidad termodinámica que está ocurriendo en la atmósfera a una escala planetaria; este fenómeno está siendo causado principalmente por el hombre, ya que la composición química de la atmósfera sufre alteraciones debido al incremento en la emisión de gases de efecto invernadero (GEI; IPCC, 2007). El aumento en la concentración de los GEI, se debe al consumo de combustibles fósiles, la deforestación y el cambio de uso de suelo, lo que resulta en el aumento en la temperatura de la atmósfera.

Para comprender la dinámica de acumulación e intercambio de GEI en la atmósfera, es indispensable conocer el funcionamiento del ciclo global de los elementos que la conforman, tales como el dióxido de carbono (CO_2), identificando sus fuentes, flujos y almacenes.

Uno de los principales sumideros de carbono son las coberturas vegetales, considerándose a los ecosistemas forestales como una opción para atenuar las emisiones de GEI, ya que almacenan CO_2 , aparte de participar con 90% del flujo anual de carbono en el sistema atmósfera-tierra.

Lo anterior ha propiciado una atención global sobre el estimar, mapear y monitorear con mayor precisión el carbono almacenado en los bosques [Goetz *et al.*, 2009], permitiendo reconocer el papel que juegan los bosques en el ciclo global del carbono, particularmente en la mitigación de los GEI, siendo la estimación del contenido de carbono, el punto de partida para establecer una línea base de cálculo de la dinámica de este gas cuando no se ejecuta una medida de mitigación. Es decir, generar un caso de referencia con el cual se pueda comparar el cambio en las emisiones de los GEI y verificar los beneficios adicionales posteriores [Brown, 2001; De Jong, 2001].

El presente reporte esta conformado de 4 secciones, en la sección 1 se presenta un breve marco conceptual relacionado con el cambio climático, la dinámica del carbono así como los reservorios del carbono terrestre; en la sección 2 se describen los aspectos fundamentales (e.g. diseño de muestreo, unidad de muestreo, ecuaciones de carbono y distribución espacial) de estudios de caso realizados del 2000 a la actualidad en el suelo de conservación, siendo el inciso f) el estudio del INIFAP; en la sección 3 se realizan cuadros con el análisis comparativo de los aspectos antes mencionados y en la parte 4 se describe la propuesta metodológica así como la primera aproximación obtenida por parte del CentroGeo.

1.-MARCO TEÓRICO

El sistema Tierra-atmósfera, es calentado por radiación solar de onda corta. A esta constante entrada y salida de energía (onda larga) se le conoce como equilibrio radiactivo (Figura 1), en donde 19% de la energía es absorbida por la atmósfera (depleción), 51% por la superficie de la tierra (insolación) y el 30% restante es reflejada al espacio exterior (albedo; Magaña, 1994). De este último, los GEI funcionan como una capa que reemite dicha energía a la superficie terrestre

provocando una alteración en el equilibrio energético del sistema climático, lo que se conoce como el efecto invernadero (IPCC, 2007).

Debido a lo anterior, la concentración de estos gases, es la que regula la cantidad de radiación infrarroja que emite nuestro planeta al espacio; por lo tanto, cuando se presentan altas concentraciones de los GEI, se eleva la cantidad de calor en la atmósfera, propiciando un aumento en la temperatura superficial media del planeta aproximadamente 285° K (Magaña, 1994; Ordóñez, 1999).

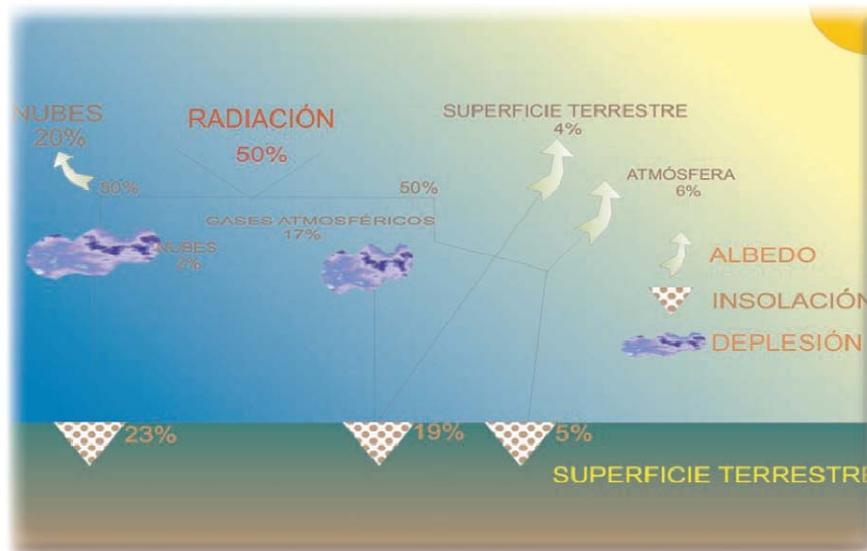


Figura 1. Equilibrio radiativo (Galeana, 2008)

El Dióxido de Carbono es el responsable de 71.5% del efecto invernadero (Lashof y Ahuja, 1990). Las emisiones mundiales de este GEI han aumentado desde la era preindustrial (1750) hasta la fecha, de 280 a 279 partes por millón (IPCC, 2007) principalmente por la utilización de combustibles de origen fósil, el cambio de uso de suelo y la deforestación (IPCC, 2007). Es el principal GEI, en términos de cantidad en la atmósfera y por su potencial de calentamiento, este gas se encuentra en un equilibrado y constante ciclo atmósfera – tierra mediante 2 grandes procesos:

a) Biológico (figura 2) - Por el proceso de fotosíntesis, mediante el cual el CO_2 es retirado de la atmósfera para convertirse en materia vegetal; y por el de respiración -descomposición de las plantas, con el cual el CO_2 contenido en la materia viva vuelve a la atmósfera. En circunstancias normales, dichos procesos están aproximadamente en equilibrio, con un flujo anual de 60 mil millones de toneladas de C ó 60 gigatoneladas (GtonC) en cada dirección. Sin embargo, actualmente la deforestación y la degradación forestal causan un flujo neto adicional de una a dos GtonC de la biósfera hacia la atmósfera. Por otro lado, existe un sumidero transitorio del CO_2 atmosférico y la deposición de nitrógeno por la recuperación de áreas abandonadas y el efecto de la fertilización, que implica un flujo anual de dos GtonC de la atmósfera hacia los ecosistemas terrestres. Este ciclo opera en menos de un año para los procesos de respiración – fotosíntesis y

hasta decenas de años para los de descomposición de la materia orgánica (Masera, 2006 Ordóñez *et al.*, 2008).

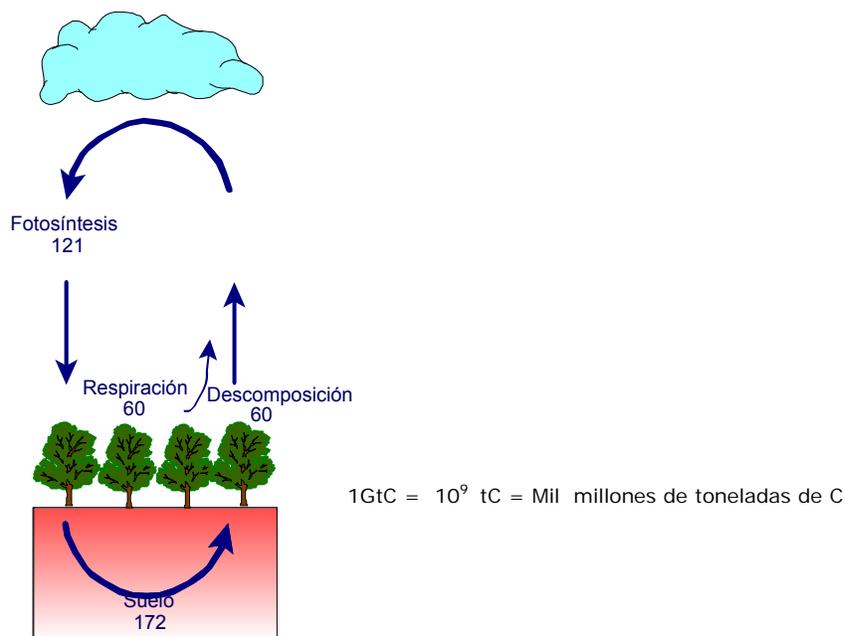


Figura 2. Ciclo del Carbono en el sistema atmósfera - bosques (Ordóñez *et al.*, 2008).

b) Químico (figura 3) – Consiste en el intercambio de CO₂ entre la atmósfera y el océano, por diferencias en las concentraciones del equilibrio del gas en estos dos compartimientos. En este caso, el intercambio neto es de aproximadamente dos GtonC por año hacia el océano, que actúa como un gran sumidero de CO₂. Este proceso tiene un tiempo característico de uno a diez años para las aguas superficiales del océano, pero implica cientos de años si consideramos el proceso de equilibrio entre las aguas superficiales y las profundas (Masera, 2006; Ordóñez *et al.*, 2008).

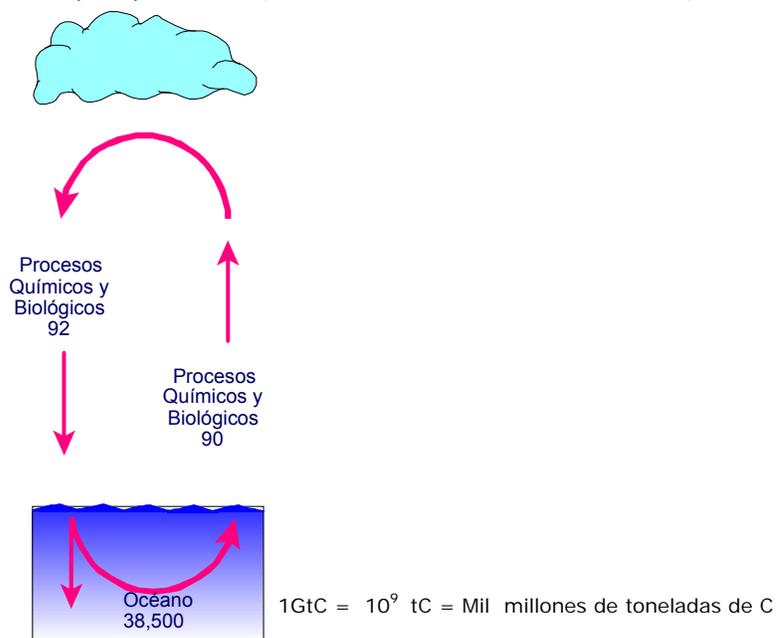


Figura 3. Ciclo del Carbono en el sistema atmósfera – Océano (Ordóñez *et al.*, 2008).

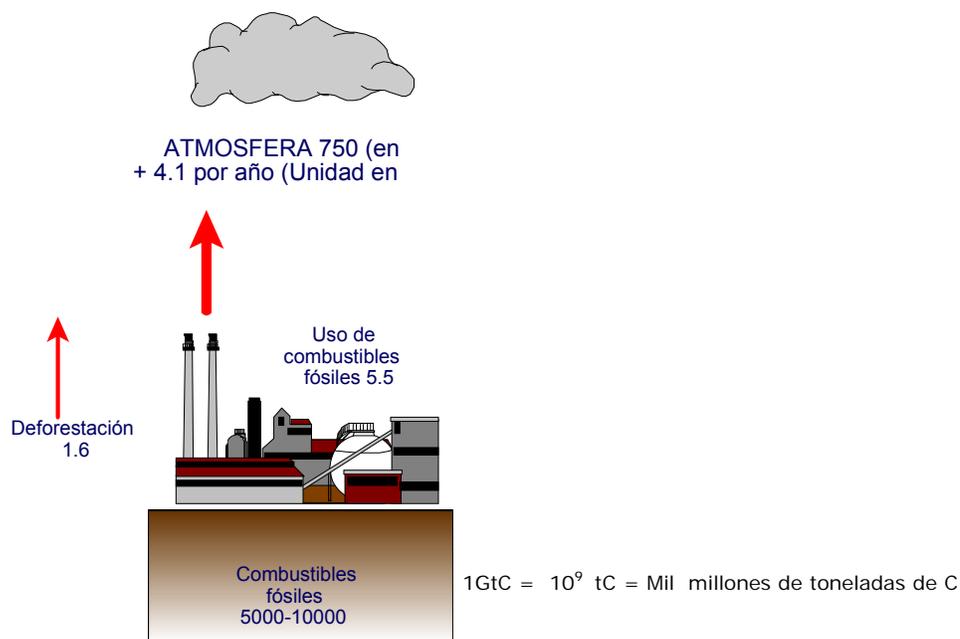


Figura 4. Emisiones anuales de Carbono a la atmósfera (Ordóñez *et al.*, 2008).

Este ciclo se rompe (figura 4) con la quema de combustibles fósiles cuyo principal producto es CO₂, que proviene de la materia viva fósil almacenada en los yacimientos de petróleo y carbón. Significa un flujo neto de la biosfera hacia la atmósfera de 5.5 GtonC al año. Este flujo es enteramente antropogénico y tiene un crecimiento anual del 1.5%, aunado a 1.6 GtonC al año por la deforestación y el cambio de uso de suelo (Masera, 2006; Ordóñez *et al.*, 2008).

El balance neto de los tres procesos es, para la década de los años noventa, de un flujo neto de 4.1 GtonC al año hacia la atmósfera, que está aumentando las concentraciones de CO₂ y el consecuente peligro de provocar cambio climático (Masera, 2006; Ordóñez *et al.*, 2008).

Históricamente, en una escala global, los cambios en la cobertura forestal han sido aportadores de dióxido de carbono a la atmósfera (Houghton, 1999; Houghton y Hackler, 2001 citado por Brown, 2001). Es por esta razón que en la actualidad se considera a los bosques como una opción para mitigar las emisiones de GEI (Masera *et al.*, 2001; Ordóñez *et al.*, 2001).

Ordóñez (1999) comenta que el CO₂ participa en la composición de las estructuras necesarias para que el árbol pueda desarrollarse (follaje, ramas, raíces y fuste; Figura 5). Al crecer, éste incrementa su follaje, ramas, flores y frutos (en conjunto: copa) así como su altura y el grosor del tronco. Durante el tiempo en que el CO₂ se encuentra constituyendo alguna estructura del árbol hasta que es enviado nuevamente al suelo o la atmósfera, se considera almacenado.

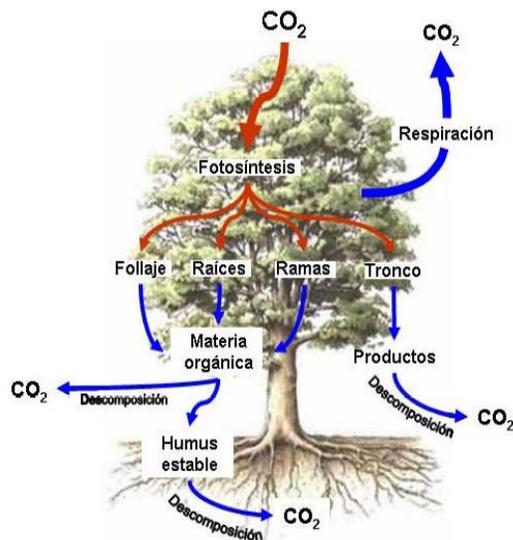


Figura 5. Flujos y almacenes de carbono en un ecosistema forestal (Fragoso, 2003).

Los procesos de captura-emisión son parte de un sistema con cuatro tipos generales de reservorios de carbono (vegetación aérea y subterránea, materia en descomposición, suelos y productos forestales), con tiempos de residencia y flujos asociados muy diferentes (Ordóñez, 1999).

El concepto de contenido de carbono normalmente integra la idea de conservar los inventarios de este elemento que se encuentran en suelos, bosques y otro tipo de vegetación (Tipper *et al.*, 2000).

El IPCC (2007) estima que, combinando estrategias de conservación forestal con proyectos de reforestación en el mundo, los bosques podrían resultar en un sumidero neto de carbono durante los próximos cien años, permitiendo reducir de 20 a 50% las emisiones de CO₂ a la atmósfera. Las opciones de mitigación de los GEI pueden ser agrupados en tres: La primera categoría incluye a las actividades que evitan la liberación del carbono secuestrado (e.g. conservación y protección a los ecosistemas forestales); la segunda contiene actividades que capturan CO₂ (e.g. aforestación, reforestación y agroforestería); y la tercera opción encierra actividades que sustituyan el uso de combustibles fósiles (Sathaye *et al.*, 2001).

2.- ANTECEDENTES

Se han registrado 5 estudios de caso en masas forestales del Suelo de Conservación, donde se han empleado diferentes métodos de estimación de biomasa, muestreo, unidad de muestreo, intensidad de muestreo, superficies y formas de mapeo.

a) En 2001, la Comisión de Recursos Naturales realizó el proyecto nombrado “Estimación del contenido de Carbono en la biomasa en el área del Suelo de Conservación del Distrito Federal” que tuvo por objetivo estimar el carbono total, lo que es equivalente al contenido en la vegetación (biomasa aérea y subterránea) y mantillo (hojarasca).

Se levantó un inventario forestal basado en un muestreo sistemático al azar, con una intensidad de muestreo de 0.019%, lo que fue equivalente a 74 sitios muestreados. La unidad de muestreo empleada fue sitios circulares de 1000 m² (figura 6) para obtener los parámetros dasométricos (diámetro y altura), asimismo, dentro de los mismos sitios se levantaron otros de superficie de 100 m² para obtener datos de regeneración, reforestación, edad e incremento del arbolado y en el centro de estos círculos se colectó la hojarasca en una superficie de 0.25 m².

Para el cálculo del carbono almacenado en la biomasa aérea y subterránea (raíces) se emplearon las siguientes formulas:

$$C_{ba} = V * VD * BEF * CC$$

Donde:

C_{ba} = Carbono en biomasa aérea

V= Volumen total del árbol

WD= Densidad de la madera

BEF = Factor de expansión

CC= Contenido de carbono

$$C_{br} = C_{ba} * F$$

Donde:

C_{br} = Carbono en biomasa subterránea

F= Factor de expansión

Para el cálculo del carbono contenido en el mantillo se empleó la siguiente fórmula:

$$CM = \text{Peso seco} * 0.5$$

Donde:

CM= Carbono en mantillo

Peso seco= Peso seco obtenido en laboratorio

0.5= Contenido de Carbono en la materia seca de
La hojarasca

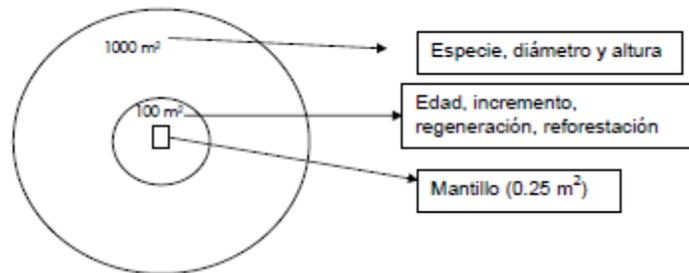


Figura 6. Sitios Corena (Corena, 2001)

Las estimaciones resultantes se describen en el siguiente cuadro:

Tipo de vegetación*	Ha	Ton C / ha en biomasa aérea	Ton C / ha en mantillo	Error
Encino	3545.52	37.40	3.91	Desconocido
Aile	703.41	33.02	3.25	Desconocido
Vegetación introducida	85.32	16.32	1.03	Desconocido
Oyamel	9775.79	144.07	6	Desconocido
Pino	24377	57.61	5.03	Desconocido

b) En 2001, Valenzuela realizó el estudio “Estimación de secuestro de Carbono en bosques naturales de Oyamel (*Abies religiosa*) en el sur del Distrito Federal”, que tuvo por objetivo aplicar un modelo matemático para estimar la cantidad de carbono secuestrado en biomasa aérea en bosques naturales de *Abies religiosa* en los Parques Nacionales del Desierto de los Leones y Cumbres del Ajusco.

Se utilizó un muestreo sistemático estratificado, con una intensidad de muestreo de 0.43% para el caso del Ajusco y 6.4% para el desierto de los Leones. La unidad de muestreo es de forma circular, con un radio 13.81 m y una superficie de 600 m².

Para el cálculo del contenido de carbono en la biomasa aérea se emplearon las siguientes formulas:

$$CT = V * d * F$$

Donde:

CT= Carbono total

d = Densidad específica de la madera

F= Factor de conversión

$$C_d = VFT [F (D+W) - F(D-W)]$$

* Con base en una clasificación de imagen de satélite del año 2000.

Donde:

C_d = Carbono secuestrado por clase diamétrica

VFT= Volumen de Fuste total por Ha

2W= Amplitud de la clase

Utilizando la ecuación de Función de Densidad de Probabilidad Weibull acumulativa:

$$F(x) = 1 - \exp(-((x-a)/b)^c)$$

La estimación resultante se describe en el siguiente cuadro:

Tipo de vegetación	Ha	Ton C / ha en biomasa aérea	Error
<i>Abies religiosa</i>	2500	207.98	Desconocido

c) En 2005, Espinoza realizó el estudio “Estimación del contenido y captura de carbono en el bosque de *Pinus hartwegii* de la cuenca alta del río Magdalena, Magdalena Contreras, D.F.” que tuvo por objetivo conocer el carbono almacenado en la biomasa aérea de los rodales de *Pinus hartwegii*.

Se utilizó un muestreo aleatorio estratificado, con una superficie muestreada de 1.6ha. La unidad de muestreo es de forma circular y tiene una superficie de 625 m².

Para el cálculo del contenido de carbono en la biomasa aérea se emplearon las siguientes formulas:

$$B = V * d$$

Donde:

B=Biomasa

V= Volumen

d=Densidad de la madera

$$CC = B * 1.3 * 0.45$$

Donde:

CC= Contenido de carbono

B= Biomasa

1.3= Factor de expansión para fustes

0.45= Proporción de carbono en la biomasa seca

La estimación resultante se describe en el siguiente cuadro:

Tipo de vegetación [†]	Ha	Ton C / ha en biomasa aérea	Error
<i>Pinus hartwegii</i>	2926	31.61	Desconocido

d) En 2006, Nava realizó el estudio “Carbono almacenado como servicio ecosistémico y criterios de restauración, en el bosque de *Abies religiosa* de la cuenca del Río Magdalena, D.F.” que tuvo por objetivo conocer el carbono almacenado en la biomasa aérea de los rodales de *Abies religiosa*.

Se levantó un inventario forestal basado en un muestreo aleatorio estratificado, con una intensidad de muestreo de 0.12%. La unidad de muestreo empleada fueron cuadrantes de 25 x 25 metros con una superficie de 625m².

Para el cálculo del contenido de carbono en la biomasa aérea se emplearon las siguientes formulas:

$$B = V * d$$

Donde:

B= Biomasa

V= Volumen

d= Densidad de la madera

$$CC = B * 1.3 * 0.45$$

Donde:

CC= Contenido de carbono

B= Biomasa

1.3= Factor de expansión para fustes

0.45= Proporción de carbono en la biomasa seca.

La estimación resultante se describe en el siguiente cuadro:

Tipo de vegetación [‡]	Ha	Ton C / ha en biomasa aérea	Error
<i>Abies religiosa</i>	1433	58	Desconocido

e) En 2008, Galeana realizó el estudio “Estimación del contenido y captura potencial de carbono, su valoración económica, en la cuenca del Río Magdalena, D.F.” que tuvo por objetivo cuantificar la biomasa aérea por tipo de cobertura forestal de la cuenca del Río Magdalena.

[†] Se utilizaron 5 ortofotos de escala 1:20000 para la elaboración del mapa de vegetación.

[‡] Mediante la fotointerpretación de 14 fotografías aéreas escala 1:20000.

Se levantó un inventario forestal basado en un muestreo sistemático estratificado, con una intensidad de muestreo de 0.64%. La unidad de muestreo empleada se baso en un diseño anidado (figura 7), que es equivalente a un conglomerado con 3 sitios circulares de radio de 17.84m (radio que fue compensado según el porcentaje de pendiente existente en el sitio) con una equidistancia de 30 metros entre sitio.

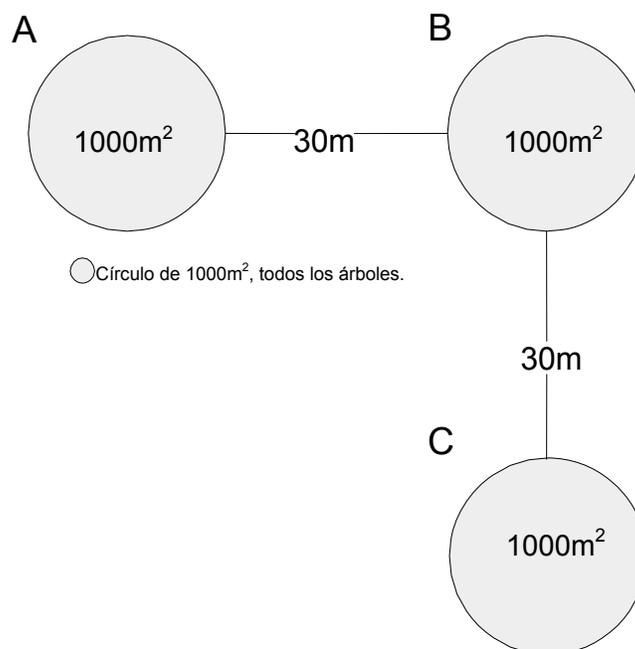


Figura 7. Diseño anidado (Galeana, 2008).

Para el cálculo del contenido de carbono en la biomasa aérea se emplearon las siguientes formulas:

$$B = V * d$$

Donde:

B=Biomasa

V= Volumen

d=Densidad de la madera

Todos los valores de biomasa se pasaron a carbono mediante un factor de 0,5 MgDM / MGC (IPCC, 2001).

Las estimaciones resultantes se describen en el siguiente cuadro:

Tipo de vegetación [§]	Ha	Ton C / ha en biomasa aérea	Error
<i>Abies religiosa</i> abierto	183.08	37.40	24.51
<i>Abies religiosa</i> cerrado	1012.09	162.91	16.69

[§] Mediante la fotointerpretación de 52 fotografías aéreas escala 1:10000.

<i>Abies religiosa</i> – <i>Pinus sp.</i> cerrado	341.70	106.92	25
<i>Pinus sp.</i> – <i>Abies religiosa</i> cerrado	179.98	39.39	14.88
<i>Pinus hartwegii</i> abierto	322.14	21.21	5.62
<i>Pinus hartwegii</i> cerrado	288.56	47.37	5.64

En este caso, se elaboró un mapa de contenido de carbono (figura 8) para conocer la distribución espacial a través de la cuenca mediante métodos geoestadísticos. El interpolador seleccionado fue Kriging Ordinario ajustado a un modelo esférico con un error cuadrático medio de 59.02 tC/ha.

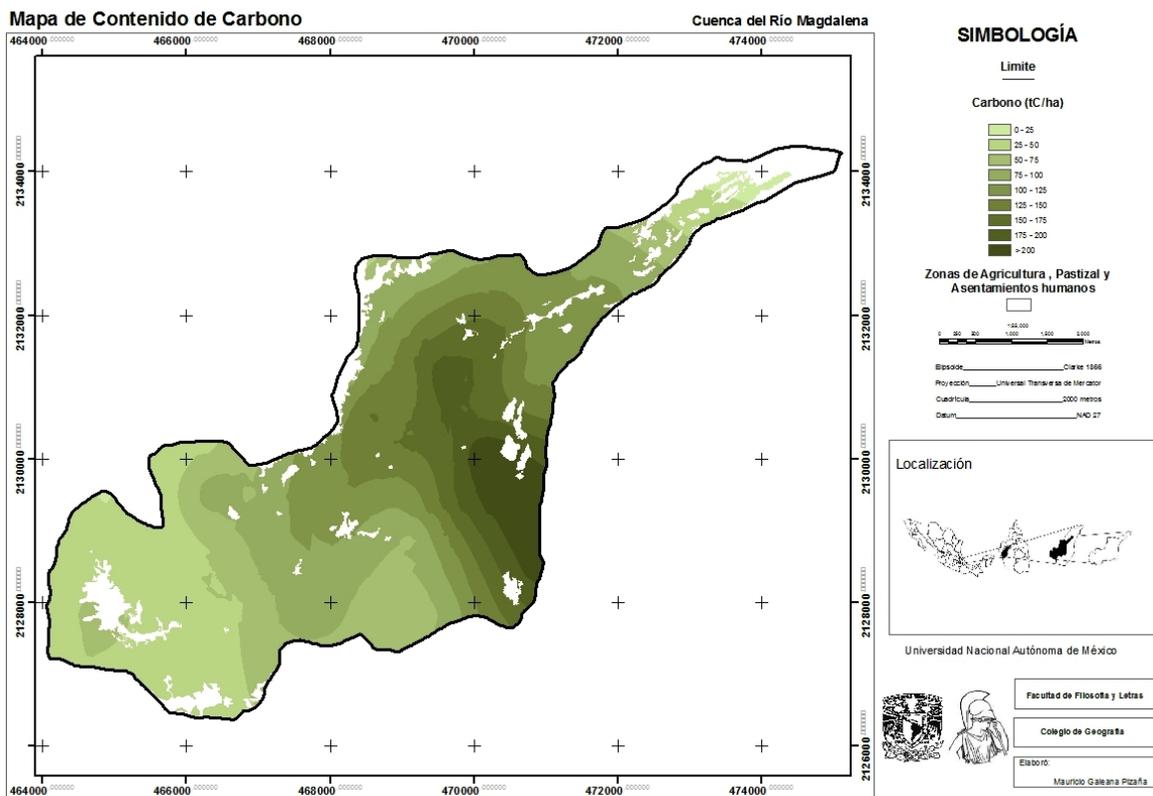


Figura 8. Mapa de contenido de Carbono (Galeana, 2008).

f) En 2010, el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) realizó el proyecto “Estimación de almacenamiento de carbono en el Suelo de Conservación del Distrito Federal”, que tuvo por objetivo estimar el contenido de carbono en la biomasa aérea de los principales tipos de vegetación forestal del suelo de conservación.

Se levantó un inventario forestal de 50 conglomerados basado en un muestreo sistemático estratificado, estos se complementaron con 249 conglomerados proporcionados por la Procuraría Ambiental y de Ordenamiento Territorial del Distrito Federal (PAOT). La unidad de muestreo empleada es la Y invertida (figura 9) basada en el diseño del Inventario Nacional Forestal y de

Suelos de la CONAFOR, que es equivalente a un conglomerado con 4 sitios circulares de superficie de 400m².

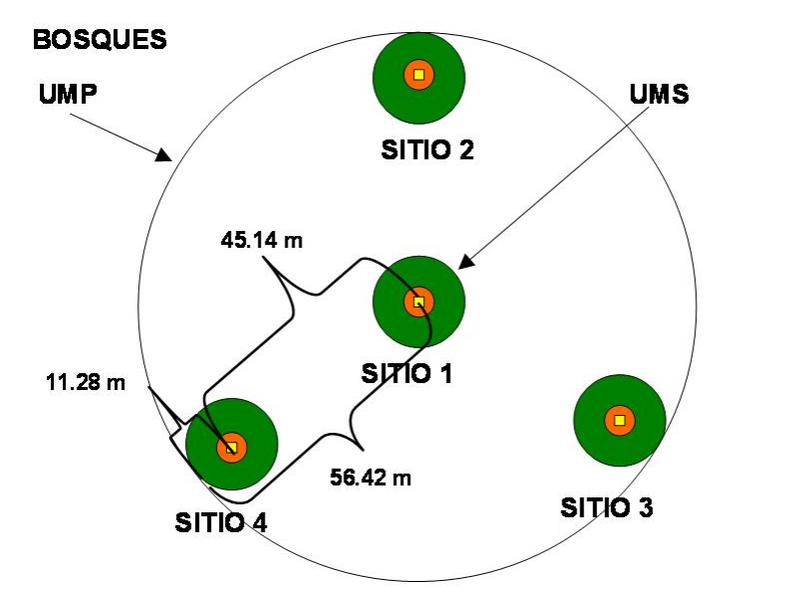


Figura 9. Conglomerado de "Y invertida" (Velasco *et al.*, 2002)

Para el cálculo del contenido de carbono en la biomasa aérea se emplearon ecuaciones de carbono y biomasa según la especie. Las expresiones matemáticas empleadas por especie se indican enseguida:

<i>Pinus montezumae</i>	$C = 0.006 * (DN^{3.038})$
<i>Alnus jorullensis</i>	$C = 0.009 * (DN^{2.75})$
<i>Pinus patula</i>	$C = 0.021 * (DN^{2.645})$
<i>Abies religiosa</i>	$C = 0.033 * (DN^{2.51})$
<i>Clethra mexicana</i>	$C = 0.2249 * (DN^{1.8168})$
<i>Schinus molle</i>	$C = 0.2249 * (DN^{1.8168})$
<i>Alnus acuminata</i>	$C = (EXP (2.14 + 2.23 * LN(DN))) * 0.5$
<i>Alnus cordata</i>	$C = (EXP (-2.14 + 2.23 * LN(DN))) * 0.5$
<i>Alnus filifera</i>	$C = (EXP (-2.14 + 2.23 * LN(DN))) * 0.5$
<i>Alnus sp</i>	$C = (EXP (-2.14 + 2.23 * LN(DN))) * 0.5$
<i>Crataegus mexicana</i>	$C = (EXP (-2.14 + 2.23 * LN(DN))) * 0.5$
<i>Garrya laurifolia</i>	$C = (EXP (-2.14 + 2.23 * LN(DN))) * 0.5$
<i>Prunus serotina</i>	$C = (EXP (-2.14 + 2.23 * LN(DN))) * 0.5$
<i>Pyrus malus</i>	$C = (EXP (-2.14 + 2.23 * LN(DN))) * 0.5$
<i>Acacia farnesiana</i>	$C = (EXP (-2.27 + 2.39 * LN(DN))) * 0.5$
<i>Quercus candicans</i>	$C = (EXP (-2.27 + 2.39 * LN(DN))) * 0.5$
<i>Quercus crassifolia</i>	$C = (EXP (-2.27 + 2.39 * LN(DN))) * 0.5$
<i>Quercus crassipes</i>	$C = (EXP (-2.27 + 2.39 * LN(DN))) * 0.5$

<i>Quercus deserticola</i>	$C=(EXP (-2.27+2.39*LN(DN))) *0.5$
<i>Quercus frutex</i>	$C=(EXP (-2.27+2.39*LN(DN))) *0.5$
<i>Quercus germana</i>	$C=(EXP (-2.27+2.39*LN(DN))) *0.5$
<i>Quercus glaucescens</i>	$C=(EXP (-2.27+2.39*LN(DN))) *0.5$
<i>Quercus glaucoides</i>	$C=(EXP (-2.27+2.39*LN(DN))) *0.5$
<i>Quercus laeta</i>	$C=(EXP (-2.27+2.39*LN(DN))) *0.5$
<i>Quercus laurina</i>	$C=(EXP (-2.27+2.39*LN(DN))) *0.5$
<i>Quercus mexicana</i>	$C=(EXP (-2.27+2.39*LN(DN))) *0.5$
<i>Quercus obtusata</i>	$C=(EXP (-2.27+2.39*LN(DN))) *0.5$
<i>Quercus potosina</i>	$C=(EXP (-2.27+2.39*LN(DN))) *0.5$
<i>Quercus repanda</i>	$C=(EXP (-2.27+2.39*LN(DN))) *0.5$

Las estimaciones resultantes se describen en el siguiente cuadro:

Tipo de vegetación**	Límite inferior (ton)	Ton C / ha en biomasa aérea (promedio)	Límite superior (ton)
Bosque de Oyamel	83.97	93.41	102.85
Bosque Mixto	39.36	47.92	56.48
Bosque de Pino	41.02	46.95	54.88
Bosque inducido	15.03	28.26	41.50
Matorral	3.95	8.48	13
Pastizal	2.02	6.76	11.50
Agrícola	0.43	1.35	2.27

En este caso, se elaboró un mapa de contenido de carbono (figura 10) para conocer la distribución espacial a través del suelo de conservación mediante métodos geoestadísticos. El interpolador seleccionado fue Kriging Ordinario ajustado a un modelo esférico con un error cuadrático medio estandarizado de 0.9429.

** Con base a la información cartográfica proporcionada por la PAOT.

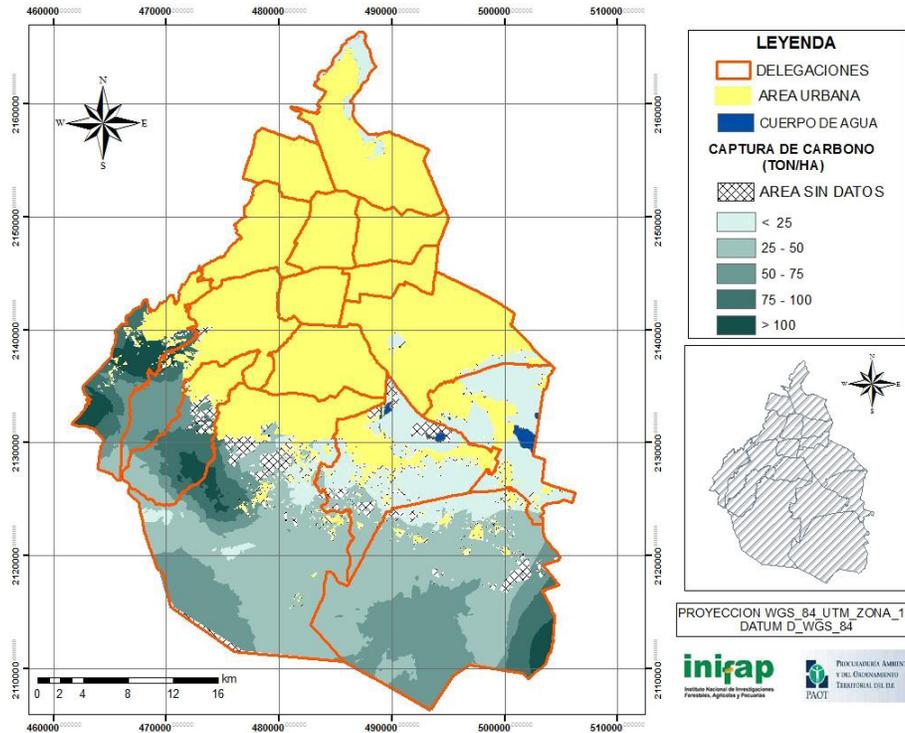


Figura 10. Mapa de toneladas de carbono por hectárea (PAOT-INIFAP, 2010).

3.- ANÁLISIS COMPARATIVO

A continuación se presentan cuadros comparativos de los diversos estudios de caso realizados en el suelo de conservación analizando las ventajas y desventajas de los diversos diseños de muestreo, unidades de muestreo, ecuaciones de carbono y métodos de mapeo

3.1) Diseño de muestreo

Estudio	Diseño de muestreo	Ventajas	Limitantes
Valenzuela, 2001; Galeana, 2008; INIFAP, 2010	Muestreo estratificado con distribución sistemática	<ul style="list-style-type: none"> Se acota el área y objeto de estudio. La estratificación del objeto de estudio permite una cuantificación unitaria y total de la población. Este permite asegurar una cobertura de las unidades de todas las clases que representan al fenómeno y proporciona datos de mayor calidad que el muestreo 	<ul style="list-style-type: none"> Se incrementan los costos por el análisis detallado de los componentes estructurales del objeto de estudio. Si la constante de muestreo está asociada con el fenómeno de interés, las estimaciones obtenidas a partir de la muestra pueden contener sesgo de

		<p>aleatorio.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Permite hacer buenas estimaciones de medias y totales poblacionales. • Ha sido el de mayor aplicación en los inventarios forestales. • Disminuye el error en la interpolación espacial. (Velasco et al, 2002; Schreuder <i>et al.</i>, 2004; Galeana, 2008) 	<p>selección.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Aumenta el tiempo en el que se lleva a cabo el muestreo. (Velasco et al, 2002; Schreuder <i>et al.</i>, 2004; Galeana, 2008)
Espinoza, 2005; Nava, 2006	Muestreo estratificado con distribución aleatoria	<ul style="list-style-type: none"> • Tiende a asegurar que la muestra represente adecuadamente a la población en función de unas variables seleccionadas. (Velasco et al, 2002; Schreuder <i>et al.</i>, 2004; Galeana, 2008) 	<ul style="list-style-type: none"> • Se ha de conocer la distribución en la población de las variables utilizadas para la estratificación. (Velasco et al, 2002; Schreuder <i>et al.</i>, 2004; Galeana, 2008)
CORENA, 2001	Muestreo sistemático	<ul style="list-style-type: none"> • Fácil de aplicar. • No siempre es necesario tener un listado de toda la población. (Velasco et al, 2002; Schreuder <i>et al.</i>, 2004; Galeana, 2008) 	<ul style="list-style-type: none"> • Sesgar la estimación al no poder asegurar muestreo es todas las clases de interés. (Velasco et al, 2002; Schreuder <i>et al.</i>, 2004)

3.2) Unidad de muestreo

Estudio	Unidad de muestreo	Ventajas	Limitantes
INIFAP, 2010	Conglomerado "Y invertida"	<ul style="list-style-type: none"> • Error relativo de muestreo bajo. • Estudios previos que comparan diferentes unidades de muestreo señalan que es el más óptimo. • Ahorra 18% de los costos. • Proporciona la ventaja de cálculo directo por unidad de superficie, lo que permite la estimación del total casi de manera inmediata. 	

		<ul style="list-style-type: none"> Es la unidad de muestreo del Inventario Nacional Forestal y de suelos (INFyS) de la CONAFOR. (Velasco et al, 2002) 	
Galeana, 2008	Conglomerado anidado	<ul style="list-style-type: none"> Permite la comparación entre círculos de 0.1ha compensado con la pendiente, entre sitios y la misma clase de cobertura vegetal, lo cual optimiza el tiempo de la toma de datos. (Galeana, 2008) 	<ul style="list-style-type: none"> En comparación con la “Y invertida” presenta un error relativo más alto. No es interoperable con los datos del INFyS. (Velasco et al, 2002)
CORENA, 2001; Valenzuela, 2001; Espinoza, 2005; Nava, 2006	Sitio	<ul style="list-style-type: none"> Fácil de aplicar. (Velasco et al, 2002) 	<ul style="list-style-type: none"> Error relativo alto. No se compensa con la pendiente. No es interoperable con los datos del INFyS. (Velasco et al, 2002)

3.3) Estimación de Contenido de Carbono

Estudio	Método de cálculo de la biomasa y carbono	Ventajas	Limitantes
Valenzuela, 2001; CORENA, 2001; Espinoza, 2005; Nava, 2006 Galeana, 2008;	Ecuaciones alométricas para cálculo de la biomasa y volumen.	<ul style="list-style-type: none"> Fácil de aplicar (Acosta-Mireles, 2002) 	<ul style="list-style-type: none"> Presenta estimaciones que sobreestiman la biomasa aérea y por lo tanto, el contenido de carbono, ya que la estimación se hace bajo el supuesto de que la estructura del árbol es un cilindro. (Acosta-Mireles, 2002)

INIFAP, 2010	Ecuaciones directas para el cálculo de la biomasa y el carbono.	<ul style="list-style-type: none"> Realiza estimaciones que consideran la morfología de la estructura del árbol. (Acosta-Mireles, 2002) 	<ul style="list-style-type: none"> Requiere de métodos de extracción de arboles para pesar la biomasa. Mucho equipo de campo y laboratorio. (Acosta-Mireles, 2002)
--------------	---	--	--

3.4) Distribución espacial del contenido de Carbono

Estudio	Método de mapeo	Ventajas	Limitantes
CORENA, 2001; Valenzuela, 2001; Espinoza, 2005; Nava, 2006	No se realizó		
Galeana, 2008; INIFAP, 2010	Métodos geostatísticos	<ul style="list-style-type: none"> Permite describir la continuidad espacial de cualquier fenómeno natural, asignación de atributos, indicadores, criterios o valores. Con ello podemos llegar a conocer la forma en que se comporta cualquier variable continua en el espacio, con un nivel de detalle que permite cuantificar la variación espacial de ésta en distintas direcciones del mismo. (Galeana, 2008) 	<ul style="list-style-type: none"> Depende del número de puntos muestreados y de su distribución en el espacio. (Galeana, 2008)

Bibliografía

Acosta-Mireles, M., Vargas-Hernández, J., Velásquez-Martínez, A. Y Etchevers-Barra, J. D. 2002. Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca, México. *Agrociencia* 36(6):725-736.

Brown, Sandra (2001) Measuring carbon in forest: current status and future challenges, *Environmental Pollution* 116: 363-372.

De Jong, Bernardust, (2001) Uncertainties in estimating the potential for carbon mitigation of forest management, *Forest Ecology and Management*, 154:2, 85-104.

Espinoza Mónica, 2005, "Estimación del contenido y captura de carbono en el bosque de *Pinus hartwegii* de la cuenca alta del río Magdalena, Magdalena Contreras, D.F., Tesis de licenciatura, Facultad de Ciencias, UNAM, México, 72p.

Fragoso, L. P. 2003. Estimación del contenido y captura de carbono en biomasa aérea del predio "Cerro Grande" municipio de Tancítaro Michoacán, México. Tesis de Licenciatura. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Facultad de Agrobiología "Presidente Juárez", México. 65p.

Galeana Pizaña, José Mauricio. 2008. Estimación del contenido y captura potencial de carbono, su valor económico; en la cuenca del Río Magdalena, D.F. México, Tesis de Licenciatura, Lic. en Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM.

Goetz, S., Baccini, A., Laporte, N., Johns, T., Walker, W., Kellndorfer, J., Houghton, R., and Sun, M. (2009) Mapping and monitoring carbon stocks with satellite observations: a comparison review. *Carbon Balance and Management* 2009, 4:2.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2001. Cambio Climático 2001; Informe de síntesis. Resumen para responsables de políticas. Una evaluación del grupo intergubernamental de expertos sobre el Cambio climático. 94 pp.

IPCC. 2007. Cambio Climático 2007; Informe de síntesis. Resumen para responsables de políticas. Una evaluación del grupo intergubernamental de expertos sobre el Cambio climático. 114 pp.

Lashof, D.A y D.R. Ahuja. 1990. Relative Contributions of Greenhouse Gas Emissions to Global Warming. *Nature*, 344:5, pp.529-531.

Magaña, V. 1994. El pronóstico del tiempo para los próximos días, meses, años.... En: *Ciencias*, No 35. pp. 15 – 22.

Masera, O. Cerón A. D. y Ordóñez D. J.A.B., 2001, "Forestry mitigation options for Mexico: Finding synergies between nacional sustainable development priorities and global concerns", En: *Mitigation and adaptation Strategies for Global Change*, p. 291-312.

Masera, O. 2006. La ecología global desde la perspectiva del cambio climático. En: *Ciencias*, No 81. pp. 6 – 15.

Nava Mariana, 2005, "Carbono almacenado como servicio ecosistémico y criterios de restauración en el Bosque de *Abies religiosa* de la Cuenca del Río Magdalena, D.F., México, Tesis de Maestría, Facultad de Ciencias, UNAM, 70p.

Ordóñez J.A.B., 1999, "Captura de carbono en un bosque templado: el caso de San Juan Nuevo, Michoacán", Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias, UNAM, D.F., p. 7-9.

Ordóñez, J.A.B., B. H.J. de Jong y O. Maser, 2001, "Almacenamiento de Carbono en un bosque de *Pinus pseudostrobus* en Nuevo San Juan, Michoacán", *Madera y Bosques* 7(2), 27-47.

Ordóñez, J.A.B., de Jong B.H.J., García-Oliva, F., Aviña, F.L., Pérez, J.V., Guerrero, G., Martínez, R. y Maser, O. 2008. Carbon content in vegetation litter, and soil under 10 different land-use and land-cover classes in the Central highlands of Michoacán, Mexico. *Forest Ecology and Management*.

Sathaye J.A., Makundi W.R., Andrasko K., Boer R., Ravindranath N.H., Sudha P., Rao S., Lasco R., Pulhin F., Maser O., Cerón A., Ordóñez J.A.B., Deying X., Zhang X. y Zuomin S., 2001, "Carbon mitigation potential and costs of forestry options in Brazil, China, India, Indonesia, México, Philippines and Tanzania", En: *Mitigation and adaptation Strategies for Global Change*, p 185-211.

Schreuder, H. T., R. Ernst and H. Ramírez M. 2004. Statistical techniques for sampling and monitoring natural resources. Forest Service-USDA. General Technical Report RMRS-GTR-126. USA. 111 p.

Tipper, R., Jong, B., y Taylor, J., 1996. The economics of carbon sequestration by community forestry in Chiapas, southern Mexico. En Edición.

Valenzuela, H.T., 2001, "Estimación de secuestro de Carbono en Bosques Naturales de Oyamel en el sur del Distrito Federal", Tesis Profesional, Chapingo, Edo. De México, p 59-60.

4.-PROPUESTA CENTROGEO

FUNDAMENTOS

La Geoestadística es un término asociado con un grupo de técnicas que trata fenómenos espaciales, su principal objetivo es la estimación, predicción y simulación de los valores de una variable que está distribuida en el espacio (Yarus & Chambers, 1994). Ésta tiene una creciente preferencia porque permite aprovechar la correlación espacial entre las observaciones vecinas, para predecir valores de los atributos en los lugares no muestreados (Maselli & Chiesi, 2006; Websters & Oliver, 2007).

La Geoestadística, tiene como objetivo el caracterizar e interpretar el comportamiento de los datos que están distribuidos espacialmente como variables regionalizadas, donde se considera a

una variable regionalizada una medición realizada en el espacio de forma que presente una estructura de correlación. De manera formal se define como un proceso estocástico con un dominio contenido en un espacio euclidiano dimensional R^d , $\{Z(x) : x \in D \subset R^d\}$. Si $d = 2$, $Z(x)$ puede asociarse a una variable medida en un punto x del plano. En términos prácticos $Z(x)$ puede verse como una medición de una variable aleatoria (p.ej. contenido de carbono en la biomasa aérea) en un punto x de una región de estudio (Websters & Oliver, 2007).

Según Isaaks & Srivastava (1989) los pasos principales de un estudio Geoestadístico son:

1. Análisis exploratorio de los datos. Se estudian los datos muestrales sin tener en cuenta su distribución geográfica. Sería una etapa de aplicación de la estadística.
2. Análisis estructural. Estudio de la continuidad espacial de la variable. Se calcula el variograma y se ajusta al mismo un variograma teórico.
3. Predicciones. Estimaciones de la variable en los puntos no muestrales, considerando la estructura de correlación espacial seleccionada e integrando la información obtenida de forma directa en los puntos muestrales, así como la conseguida indirectamente en forma de tendencias conocidas.
4. Análisis de los errores estadísticos. Se realiza un análisis de validación cruzada y se calculan algunos parámetros como el error cuadrático medio para conocer los errores en la predicción.

ANÁLISIS EXPLORATORIO DE LOS DATOS

Aquí se trata de describir la muestra, de forma tal que se explore las características mediante la obtención de los estadísticos básicos de la distribución, como son: la media, mediana, varianza, desviación estándar, simetría, curtosis, valor máximo y valor mínimo. Es necesario que la muestra cumpla una serie de requisitos como son: a) que su distribución de probabilidad sea normal, b) que no exista tendencia, es decir que sea estacionaria al menos la media, c) que no se vea afectada por valores atípicos, distribucionales y espaciales, d) que tenga una distribución espacial homogénea (Moral, 2004; Mejía *et al.*, 2007).

ANÁLISIS ESTRUCTURAL

La descripción de la estructura espacial de una variable se realiza por medio de la función semivariograma. La función del semivariograma se define como:

$$\gamma(x_i, x_j) = \frac{1}{2} \text{Var} [Z(x_i) - Z(x_j)]$$

Para el caso donde la función $Z(x)$ sea débilmente estacionaria, donde $E[Z(x_i) - Z(x_j)] = 0$, se tiene que:

$$\gamma(x_i, x_j) = \frac{1}{2} \text{Var} [Z(x_i) - Z(x_j)] = \frac{1}{2} E [\{Z(x_i) - Z(x_j)\}^2]$$

Y además se considera que el semivariograma no depende de los puntos particulares x_i y x_j sino de la distancia entre ellos $|x_i - x_j| = h$ en el caso de que la variable $Z(x)$ sea isotrópica o del vector $(x_i - x_j)$ en el caso de anisotropía.

La función semivariograma es estimada a partir de los datos medidos usando la siguiente ecuación:

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2N_h} \sum_{\alpha=1}^{N_h} [z(x_{\alpha} + h) - z(x_{\alpha})]^2$$

Donde $z(x_{\alpha})$ son los valores muestrales en los puntos x_{α} , $z(x_{\alpha}+h)$ son los datos muestrales a una distancia h y N_h representa el número de pares de puntos separados por una distancia h .

Este semivariograma experimental es necesario ajustarlo a modelos que generalicen lo observado a cualquier distancia. Existen diversos modelos teóricos de semivarianza que pueden ajustarse al semivariograma experimental. En Isaaks & Srivastava (1989) se presenta una discusión respecto a las características y condiciones que éstos deben cumplir. En general dichos modelos pueden dividirse en no acotados (lineal, logarítmico, potencial) y acotados (esférico, exponencial, gaussiano). Los del segundo grupo garantizan que la covarianza de los incrementos es finita, por lo cual son ampliamente usados cuando hay evidencia de que presentan buen ajuste. Todos estos modelos tienen tres parámetros comunes (Fig. 11) que son descritos a continuación:

1) EFECTO PEPITA

Se denota por C_0 y representa una discontinuidad puntual del semivariograma en el origen (Fig. X). Puede ser debido a errores de medición en la variable o a la escala de la misma. En algunas ocasiones puede ser indicativo de que parte de la estructura espacial se concentra a distancias inferiores a las observadas (Isaaks & Srivastava 1989; Websters & Oliver, 2007).

2) MESETA

Es la cota superior del semivariograma. También puede definirse como el límite del semivariograma cuando la distancia h tiende a infinito. La meseta puede ser o no finita. Los semivariogramas que tienen meseta finita cumplen con la hipótesis de estacionariedad fuerte; mientras que cuando ocurre lo contrario, el semivariograma define un fenómeno natural que cumple sólo con la hipótesis intrínseca. La meseta se denota por C_1 o por $(C_0 + C_1)$ cuando la pepita es diferente de cero (Isaaks & Srivastava 1989; Websters & Oliver, 2007).

3) RANGO

En términos prácticos corresponde a la distancia a partir de la cual dos observaciones son independientes. El rango se interpreta como la zona de influencia. Existen algunos modelos de semivariograma en los que no existe una distancia finita para la cual dos observaciones sean independientes; por ello se llama rango efectivo a la distancia para la cual el semivariograma alcanza el 95% de la meseta (*op. cit.*).

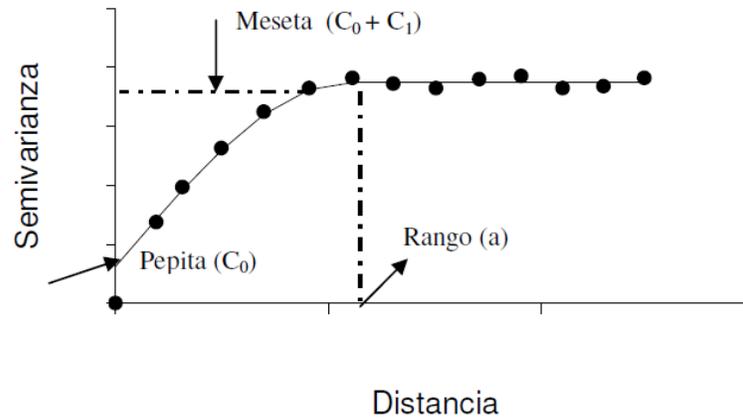


Figura 11. Parámetros del variograma (Mejia *et al.*, 2007)

PREDICCIONES

Las predicciones en los métodos geoestadísticos están basados en la regresión lineal que estiman los valores de un atributo en sitios no muestreados usando funciones de peso que reflejan la correlación de la variable Z entre sitios muestreados (x_α) y el sitio para ser estimado (x_0). La variable mustrada de interés en cada sitio x_α de la región, se considera una variable aleatoria $Z(x_\alpha)$ (Isaaks & Srivastava 1989; Websters & Oliver, 2007).

Con el fin de estimar $Z_0 = Z(x_0)$ se considera un estimador lineal

$$Z_0^* = \sum_{\alpha} \lambda_{\alpha} Z(x_{\alpha})$$

Los pesos λ_i son determinados usando las dos condiciones siguientes:

- 1) El estimador Z_0^* no debe ser sesgado,

$$E[Z_0^* - Z_0] = 0$$

- 2) La varianza del error de estimación debe ser mínima:

$$Var [Z_0^* - Z_0]$$

Donde Z_0 representa el valor exacto pero desconocido de Z en x_α .

Para obtener los pesos se debe resolver el sistema de ecuaciones:

$$A\lambda = b$$

En donde;

$$A = \begin{vmatrix} \gamma(x_1, x_1) & \gamma(x_1, x_2) & \dots & \gamma(x_1, x_n) & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & 1 \\ \gamma(x_n, x_1) & \gamma(x_n, x_2) & \dots & \gamma(x_n, x_n) & \dots \\ 1 & 1 & 1 & \dots & 0 \end{vmatrix}$$

$$\lambda = \begin{vmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \dots \\ \lambda_n \\ \psi(x_0) \end{vmatrix}$$

$$b = \begin{vmatrix} \gamma(x_1, x_0) \\ \gamma(x_2, x_0) \\ \dots \\ \gamma(x_n, x_0) \\ 1 \end{vmatrix}$$

Siendo $\gamma(x_i, x_j)$ el valor del variograma entre los puntos i y j , λ_i el peso i , y $\gamma(x_i, x_0)$ el variograma entre el punto i y el punto a interpolar (x_0).

ANÁLISIS DE LOS ERRORES ESTADÍSTICOS

Existe una forma de comprobar la fiabilidad en los métodos de estimación geoestadísticos, el método se conoce como validación cruzada y consiste en un proceso iterativo que elimina un valor de la variable, calcula el semivariograma correspondiente y estima el valor eliminado a partir de dicho semivariograma. Si esto lo hacemos uno por uno con todos los valores de las variables, finalmente podremos representar todos los valores interpolados frente a sus valores reales. Para evaluar estas diferencias se calcula el error cuadrático medio. Cuanto más pequeño sea, mejores serán las predicciones (Goovaerts, 2000). Su expresión matemática es:

$$\sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{\{Z(s_i) - z((s_i))\}^2}{n}}$$

ANTECEDENTES DE APLICACIÓN EN MÉTODOS GEOESTADÍSTICOS Y CARBONO

Hay una serie de estudios que emplean la Geoestadística en el mapeo de la biomasa aérea, por ejemplo en un bosque Toscana, Italia mediante Kriging ordinario ajustado a un modelo exponencial y asumiendo un efecto pepita de cero se predijo el volumen de la madera derivado de información obtenida de los sitios de muestreo del inventario forestal, resultando en estimaciones con un error cuadrático medio de 99.4m³/ha y una correlación entre el volumen estimado y el

medido de 0.56, concluyendo que este método es limitado en la estimación de parámetros cuyo valores varían abruptamente (Maselli, 2006). En la Amazona Brasileña, se mapeó la distribución espacial de la biomasa forestal usando Kriging con deriva externa, el cual es un estimador multivariado porque se auxilia de variables externas relacionadas con la variables de interés para una mejor estimación; para este estudio se consideró la textura del suelo, el tipo de bosque y la altitud, resultando en una predicción con un error cuadrático medio de 35.4 tC/ha, concluyendo que la geoestadística es más apropiada para estimar la distribución de la biomasa aérea que el usar un promedio simple ó técnicas estadísticas que no contemplan la correlación espacial (Sales, 2007).

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El mapeo del contenido de carbono realizado por el INIFAP se realizó tomando en cuenta todos los conglomerados (299) en el método geoestadístico (Sección 2 inciso f). Estos representan las principales coberturas forestales y uso de suelo del suelo de conservación, los cuales presentan diferentes almacenes de carbono en función de la estructura y densidad de la cobertura forestal, por lo que al integrar los conglomerados muestreados al interpolador considera no sólo la variabilidad de la cobertura en sí, sino también la generada por los otros tipos de cobertura. Además de estimar en coberturas para las cuales no hay información (e.g. Bosque de Encino) y/o existe poca información puntual para realizar una estimación (e.g. Bosque inducido)

Por lo anterior, en este estudio se plantea realizar 3 estimaciones derivadas de los siguientes métodos geoestadísticos a) univariados (Kriging Ordinario), b) multivariados (Cokriging Ordinario) y c) estocásticos (Conditional simulation) con los datos dasométricos tanto de la CORENA como los resultantes del INIFAP a fin comparar las estimaciones por tipo cobertura forestal que tenga sitios experimentales suficientes (> de 30 conglomerados) como es el caso de Bosque de Oyamel, Pino y Mixto, con tal de generar una capa de carbono con menos incertidumbre. Una vez obtenido las estimaciones con menor incertidumbre por tipo de cobertura forestal, se elaborará una capa final que represente de mejor forma la variabilidad espacial de las densidades de carbono en los bosques del suelo de conservación.

OBJETIVOS

General

- Elaborar un mapa de la distribución espacial de los almacenes de carbono en las principales coberturas forestales del suelo de conservación.

Particulares

- Probar métodos geoestadísticos univariados (Kriging ordinario) , multivariados (Co-kriging ordinario) y estocásticos (Conditional simulation) por tipo de cobertura forestal.
- Evaluar el error cuadrático medio de la interpolación por tipo de cobertura forestal.

DIAGRAMA METODOLÓGICO

MÉTODO

Método de estimación kriging ordinario (KO)

Si la función aleatoria $Z(x)$ se asume débilmente estacionaria, y además se supone una media constante m para alguna vecindad cuyo valor es desconocido, se tiene que:

$$E\{Z(x)\}=m$$

Esta condición conduce al modelo denominado kriging ordinario (KO).

La forma del estimador Kriging y las condiciones que determinan los pesos anteriormente descritas conducen para al caso de media desconocida y constante, al sistema de $N+1$ ecuaciones denominado sistema de Kriging Ordinario para los coeficientes λ_j y el parámetro de Lagrange μ .

$$\sum_{j=1}^N \lambda_j \gamma(x_i, x_j) - \mu = \gamma(x_i, x_0)$$

$$\sum_{j=1}^N \lambda_j = 1$$

$i = 1, \dots, N$

Los coeficientes λ_j son las soluciones de este sistema de ecuaciones. El variograma entre los datos medidos $Z(x_i)$ y $Z(x_j)$ se denota por $\gamma(x_i, x_j)$ y $\gamma(x_i, x_0)$ es el variograma entre los valores medidos y el punto a evaluar.

Método de estimación Cokriging Ordinario (CKO)

El método de cokriging considera dos variables aleatorias estacionarias y correlacionadas $Z_1(x)$ y $Z_2(x)$ con medias constantes pero desconocidas m_1 y m_2 que son medidas en un dominio dado, pero no necesariamente en los mismos sitios de muestreo. La situación de mayor importancia para el método de cokriging ocurre cuando los sitios de muestreo de la variable de interés $Z_1(x)$ están incluidos en los sitios de muestreo de la variable secundaria $Z_2(x)$, es decir cuando la variable auxiliar está disponible en más sitios que la variable primaria.

El estimador del método cokriging ordinario (CKO), es una combinación lineal de todos los datos disponibles para las dos variables aleatorias $Z_1(x)$ y $Z_2(x)$ con pesos w_i apropiados, representa el valor estimado para la variable Z_1 en el punto x_0 del dominio de interés :

$$Z_1^*(x_0) = \sum_{i=1}^{n_1} w_{1i} Z_1(x_i) + \sum_{j=1}^{n_2} w_{2j} Z_2(x_j)$$

Los pesos w_{1i} y w_{2j} son los pesos CKO que debemos determinar.

El error de estimación es $R = \sum_i w_{1i} Z_1(x_i) + \sum_j w_{2j} Z_2(x_j) - Z_1(x_0)$ ó en forma matricial

$$R = W^T Z$$

Donde

$$W^T = [w_{11}, \dots, w_{1n_1}, w_{21}, \dots, w_{2n_2}, -1]$$

$$Z^T = [Z_{11}, \dots, Z_{1n_1}, Z_{21}, \dots, Z_{2n_2}, Z_1(x_0)]$$

Los pesos deben satisfacer dos condiciones:

- 1.- El estimador CKO no debe ser sesgado.
- 2.- La varianza de R debe ser mínima.

Para considerar la segunda condición, varianza mínima (R), junto con las dos condiciones para los pesos, se usa el método de multiplicadores de Lagrange.

La varianza CKO se puede expresar como:

$$\text{Var}\{R\} = \text{Cov}(Z_1(x_0), Z_1(x_0)) + \lambda_1 - \sum_i w_{1i} \text{Cov}(Z_1(x_i), Z_1(x_0)) - \sum_j w_{2j} \text{Cov}(Z_2(x_j), Z_1(x_0))$$

La ecuación CKO se puede escribir en términos de las funciones de semivariograma si se hace la suposición de que las covarianzas cruzadas de los incrementos son simétricas, es decir si:

$$\text{Cov}[Z_1(x_i), Z_2(x_j)] = \text{Cov}[Z_2(x_i), Z_1(x_j)]$$

Para este caso se obtiene:

$$\sum_i w_{1i} \gamma(Z_1(x_j), Z_1(x_i)) + \sum_i w_{2i} \gamma(Z_1(x_j), Z_2(x_i)) - \lambda_1 = \gamma(Z_1(x_j), Z_1(x_0)) \quad j=1, \dots, n_1$$

$$\sum_i w_{1i} \gamma(Z_2(x_j), Z_1(x_i)) + \sum_i w_{2i} \gamma(Z_2(x_j), Z_2(x_i)) - \lambda_2 = \gamma(Z_2(x_j), Z_1(x_0)) \quad j=1, \dots, n_2$$

$$\sum_i w_{1i} = 1$$

$$\sum_i w_{2i} = 0$$

Donde $\gamma(Z_1(x_j), Z_1(x_i)) = \gamma_{11}(x_j - x_i)$

$$\gamma(Z_1(x_j), Z_2(x_i)) = \gamma_{12}(x_j - x_i)$$

Para la estimación del semivariograma cruzado se considera la expresión:

$$\gamma_{ij}^*(h) = \frac{1}{2N_h} \sum_{\alpha=1}^{N_h} [z_i(x_\alpha + h) - z_i(x_\alpha)] [z_j(x_\alpha + h) - z_j(x_\alpha)]$$

Método de estimación Conditional Simulation

Conditional simulation^{††} también conocido como interpolación estocástica es un método geoestadístico donde el valor de $Z(x)$ está basado en simulaciones estocásticas basadas técnicas de simulación Monte Carlo y Secuencial Gaussiano. Este método a comparación de los de la serie de Kriging está enfocado en la variabilidad local, disminuye los efectos de suavizado y la creación de artefactos (Stein and Van Der Meer, 2002).

Conditional simulation es la generación de realizaciones sintéticas de una función aleatoria que poseen la misma estadística espacial de las muestras. Por lo que se le considera un algoritmo apropiado ya que enfatiza los atributos globales del espacio, su histograma y patrón espacial. Se considera este método como exacto, dado que la condición en la simulación es la estimación de los $z(x_i)$, $i=1,2,\dots,N$ y valores simulados $Z_c(x_j)$, $j=1,2,\dots,T$. donde los valores estimados tengan el mismo valor que los de la muestra (Webster & Oliver, 2007).

$$Z_c(x_j) = z(x_i) \quad \text{para todo } i = 1,2,\dots,N.$$

Donde $Z_c(x_j)$ se obtiene de los valores verdaderos pero desconocidos acorde al modelo de dependencia espacial adoptado.

Considerando lo que sucede cuando estimamos Z en la localización z_0 con el método Kriging donde no se tiene un punto de muestreo; el verdadero valor $z(x_0)$ es estimado por $Z(x_0)$ con un error $z(x_0) - Z(x_0)$ el cual es desconocido:

$$z(x_0) = Z(x_0) + \{z(x_0) - Z(x_0)\}$$

Una característica de Kriging es que el error es independiente del estimado.

$$E\{Z(y)\{z(x) - Z(x)\}\} = 0 \quad \text{para toda } x, y$$

Esta condición es usada en la simulación.

Se crea un campo simulado a partir de la misma función de covarianzas o el variograma con datos condicionados a los valores dados $Z_s(x_j)$, $j=1,2,\dots,T$. que incluyen los puntos muestreados $z(x_i)$, $i=1,2,\dots,N$. Después se estima en la localización de x_0 a partir de los valores simulados en los puntos de la muestra para obtener una estimación $Z_s(x_0)$. Su error, $z_s(x_0) - Z_s(x_0)$, viene de la misma distribución como en el caso de Kriging. Por lo que se reemplaza en la ecuación de error de Kriging para obtener nuestro valor simulado como:

$$Z_c(x_0) = Z(x_0) + \{z_s(x_0) - Z_s(x_0)\}$$

El resultado tiene las siguientes propiedades descritas a continuación:

- 1) Los valores simulados son realizaciones de un proceso aleatorio con la misma expectación como los datos originales:

^{††} En geoestadística el término simulación es usado en la creación de valores de una variable que emule las características generales de aquellos valores observados en el mundo real.

$$E[Z_s(y)] = E[Z(x)] = \mu \quad \text{para todas las } x$$

Donde μ es la media.

- 2) Los valores simulados deberían tener el mismo variograma que el original.
- 3) Son estimaciones exactas

$$Z_c(x_0) = z(x_i)$$

El proceso de la simulación en este estudio se realizó con el método de secuencia Gaussiana (Gaussian sequential). Donde cada valor es simulado secuencialmente acorde a su función de distribución acumulada, la cual es determinada en cada localización a ser simulada. Los datos condicionados abarcan todos los datos muestreados y los valores simulados dentro del vecindario al punto a ser simulado. Los pasos de este algoritmo son similares a los de Kriging Ordinario, este se basa en los siguientes pasos principales:

- 1) Realiza el análisis de normalidad de los datos, en caso de que los datos no la presenten realiza transformaciones para obtener una distribución normal estándar.
- 2) Calcula el variograma experimental y el variograma teórico.
- 3) Especifica las coordenadas de los puntos donde se quiere realizar la simulación (matriz espacial ó rejilla)
- 4) Determina la secuencia en la cual los puntos x_j , $j=1,2,\dots, N$ serán obtenidos por la simulación. Selecciona los puntos de forma aleatoria para maximizar la diversidad de las realizaciones.
- 5) Simula en cada punto:
 - a. Usa Kriging simple con el variograma modelo obtenido $Z(x_i)$ y $\sigma_k^2(x_i)$.
 - b. Extraer un valor de forma aleatoria de la distribución normal $N\{Z(x_i), \sigma_k^2(x_i)\}$.
 - c. Inserta este valor en la matriz espacial ó rejilla (grid) en x_i , y lo agrega dentro de los datos.
 - d. Procede al siguiente nodo y simula el valor en este punto en la matriz.
 - e. Repite a) y c) hasta que todos los nodos han sido simulados.

Este proceso se repite n veces (iteraciones) hasta obtener mejores estimaciones en la media del área de estudio y una menor incertidumbre definida por intervalos de confianza.

El cálculo de los variogramas experimentales, variogramas teóricos y predicciones por tipo de cobertura se realizó mediante el software GS+9.

RESULTADOS

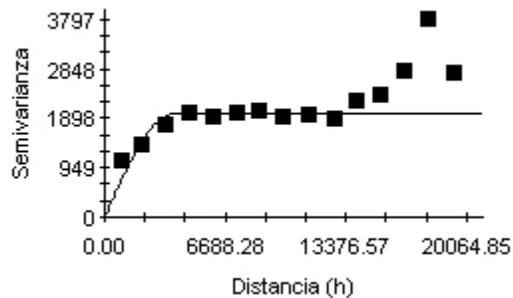
Modelación de los Variogramas experimentales y teóricos

KRIGING ORDINARIO

Para la cobertura de Oyamel se determinó un comportamiento isotrópico (omnidireccional) ajustado con un modelo esférico, modelo que mejor ajusta con los valores del variograma experimental.

A) OYAMEL

Conglomerados = 86



Variograma isotrópico

Abies religiosa (Oyamel)

Modelo esférico

$$r^2 = 0.705$$

Parámetros del Variograma isotrópico

Meseta: 2155

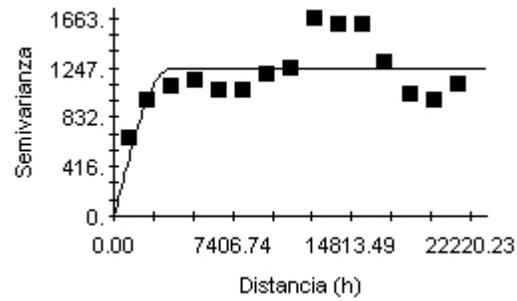
Rango: 5438

Efecto Pepita: 0

B) PINO

Para la cobertura de Pino se determinó un comportamiento isotrópico ajustado con un modelo esférico, modelo que ajusta con los valores del variograma experimental.

Conglomerados = 160



Variograma isotrópico

Bosque Pinos

Modelo esférico

$$r^2 = 0.4$$

Parámetros del Variograma isotrópico

Meseta: 1237

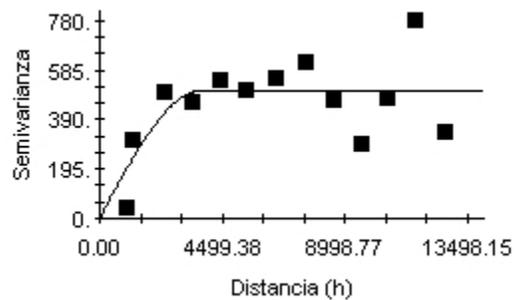
Rango: 3406

Efecto Pepita: 0

C) BOSQUE MIXTO

Para la cobertura de Bosque Mixto se determinó un comportamiento isotrópico ajustado con un modelo esférico, modelo que mejor ajusta con los valores del variograma experimental.

Conglomerados = 30



Variograma isotrópico

Bosque Mixto

Modelo esférico

$$r^2 = 0.61$$

Parámetros del Variograma isotrópico

Meseta: 504.1

Rango: 3710

Efecto Pepita: 0

Cokriging Ordinario

Para determinar el uso de este método se realizó un análisis de correlación entre los valores de carbono almacenado en biomasa aérea de los datos de campo y la altitud, la pendiente e índice de vegetación normalizado (NDVI) derivado de imágenes SPOT 2010. Para el caso de la altitud se utilizó el modelo digital del elevación de la Shuttle Radar Topography Mission (SRTM por sus siglas en ingles), también se derivó de este las pendientes. En el siguiente cuadro se presentan los valores resultantes del cuadro de correlación.

Tipo de Bosque	Altitud	Pendiente	NDVI
<i>Pinus spp.</i>	-0.32	0.05	0.40
<i>Abies religiosa</i>	0.19	-0.43	0.23
Bosque Mixto	0.05	0.48	0.19

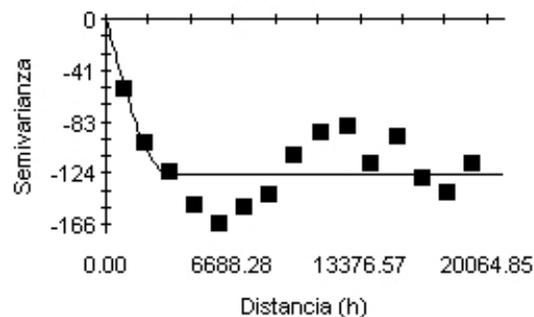
Una vez realizado el análisis de correlación se determinó como variables secundarias, el uso del NDVI para el caso de los bosques de Pino y la pendiente para el de los bosques mixtos y de oyamel, en la función semivariograma cruzado (función empleada en el método Cokriging).

VARIOGRAMAS CRUZADOS

Para la cobertura de Oyamel se determinó un comportamiento isotrópico (omnidireccional) ajustado con un modelo esférico, modelo que mejor ajusta con los valores del variograma experimental.

A) OYAMEL

Conglomerados = 86



Variograma isotrópico
Abies religiosa (Oyamel)
Modelo esférico
 $r^2 = 0.38$

Parámetros del Variograma isotrópico

Meseta: -124

Rango:3227

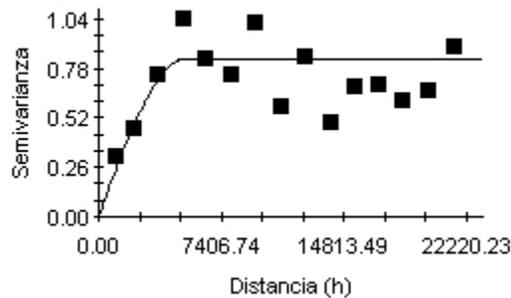
Efecto Pepita:0

Cabe señalar que los valores negativos de este variograma se deben a la relación inversa que existe entre el carbono almacenado y la pendiente (ver cuadro anterior).

B) PINO

Para la cobertura de Pino se determinó un comportamiento isotrópico ajustado con un modelo esférico, modelo que ajusta con los valores del variograma experimental.

Conglomerados = 160



Variograma isotrópico

Bosque Pinos

Modelo esférico

$r^2 = 0.42$

Parámetros del Variograma isotrópico

Meseta: 0.82

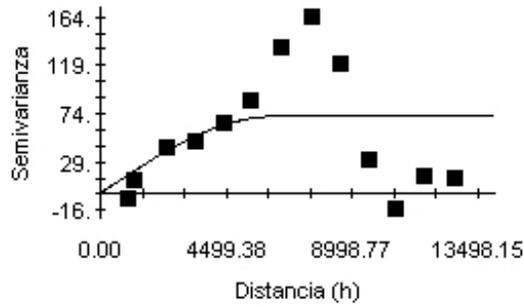
Rango: 5082

Efecto Pepita: 0

C) BOSQUE MIXTO

Para la cobertura de Bosque Mixto se determinó un comportamiento isotrópico ajustado con un modelo esférico, modelo que mejor ajusta con los valores del variograma experimental.

Conglomerados = 30



Variograma isotrópico

Bosque Mixto

Modelo esférico

$r^2 = 0.28$

Parámetros del Variograma isotrópico

Meseta: 71.31

Rango: 6220

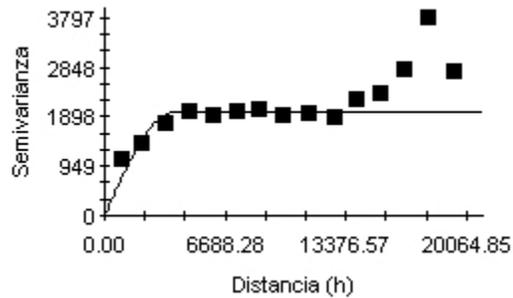
Efecto Pepita: 0

Conditional Simulation

Para la cobertura de Oyamel se determinó un comportamiento isotrópico (omnidireccional) ajustado con un modelo esférico, modelo que mejor ajusta con los valores del variograma experimental.

A) OYAMEL

Conglomerados = 86



Variograma isotrópico

Abies religiosa (Oyamel)

Modelo esférico

$r^2 = 0.705$

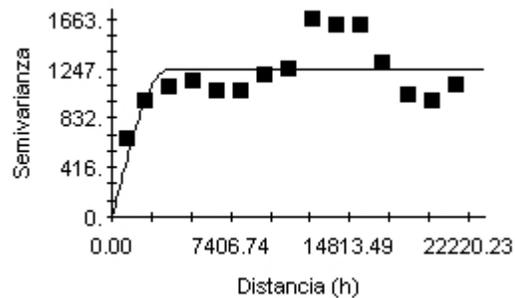
Parámetros del Variograma isotrópico

Meseta: 2155
Rango:5438
Efecto Pepita: 0

B) PINO

Para la cobertura de Pino se determinó un comportamiento isotrópico ajustado con un modelo esférico, modelo que ajusta con los valores del variograma experimental.

Conglomerados = 160



Variograma isotrópico

Bosque Pinos

Modelo esférico

$$r^2 = 0.4$$

Parámetros del Variograma isotrópico

Meseta: 1237

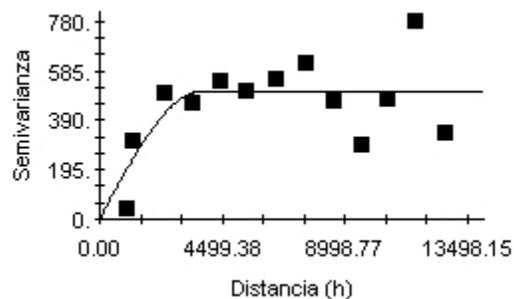
Rango: 3406

Efecto Pepita: 0

C) BOSQUE MIXTO

Para la cobertura de Bosque Mixto se determinó un comportamiento isotrópico ajustado con un modelo esférico, modelo que mejor ajusta con los valores del variograma experimental.

Conglomerados = 30



Variograma isotrópico

Bosque Mixto

Modelo esférico

$$r^2 = 0.61$$

Parámetros del Variograma isotrópico

Meseta: 504.1

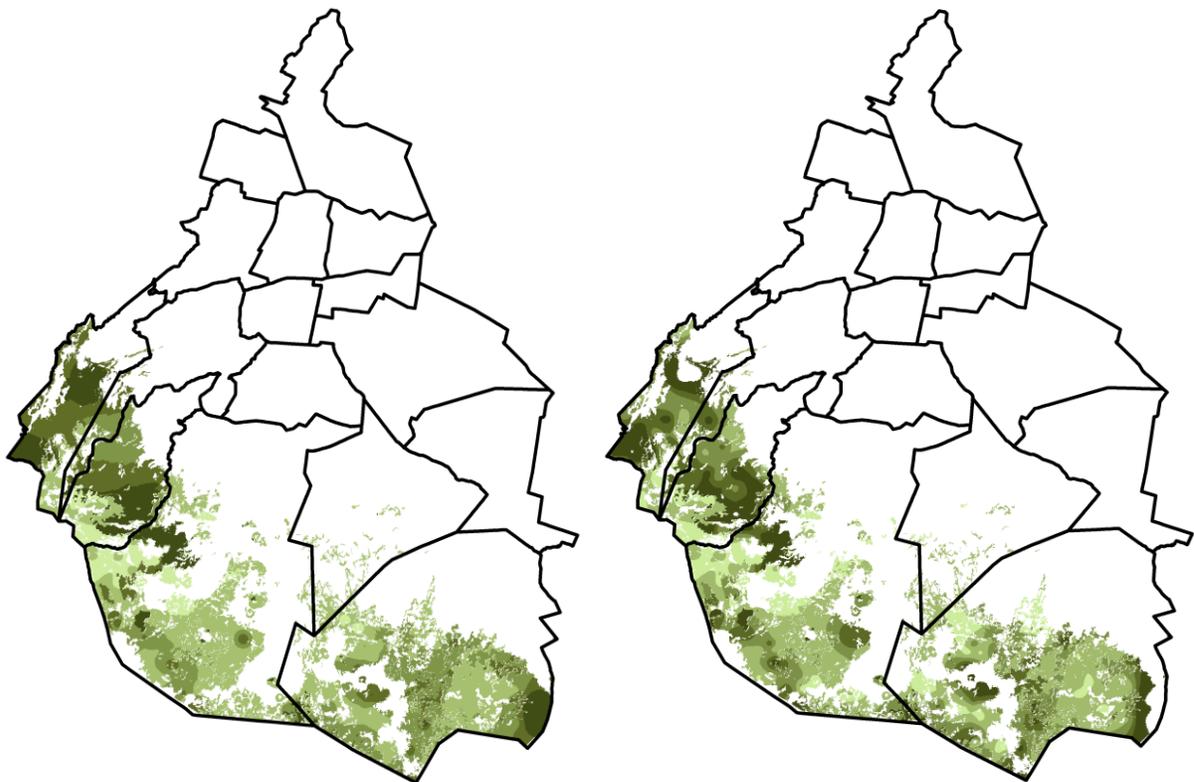
Rango: 3710

Efecto Pepita: 0

Para el caso de este método se realizaron pruebas en el número de iteraciones (10, 100, 1000 y 10000) encontrando que no existe una mejora significativa en términos del error cuadrático medio después de 1000 iteraciones, por lo que las estimaciones en el presente trabajo se definieron bajo este número.

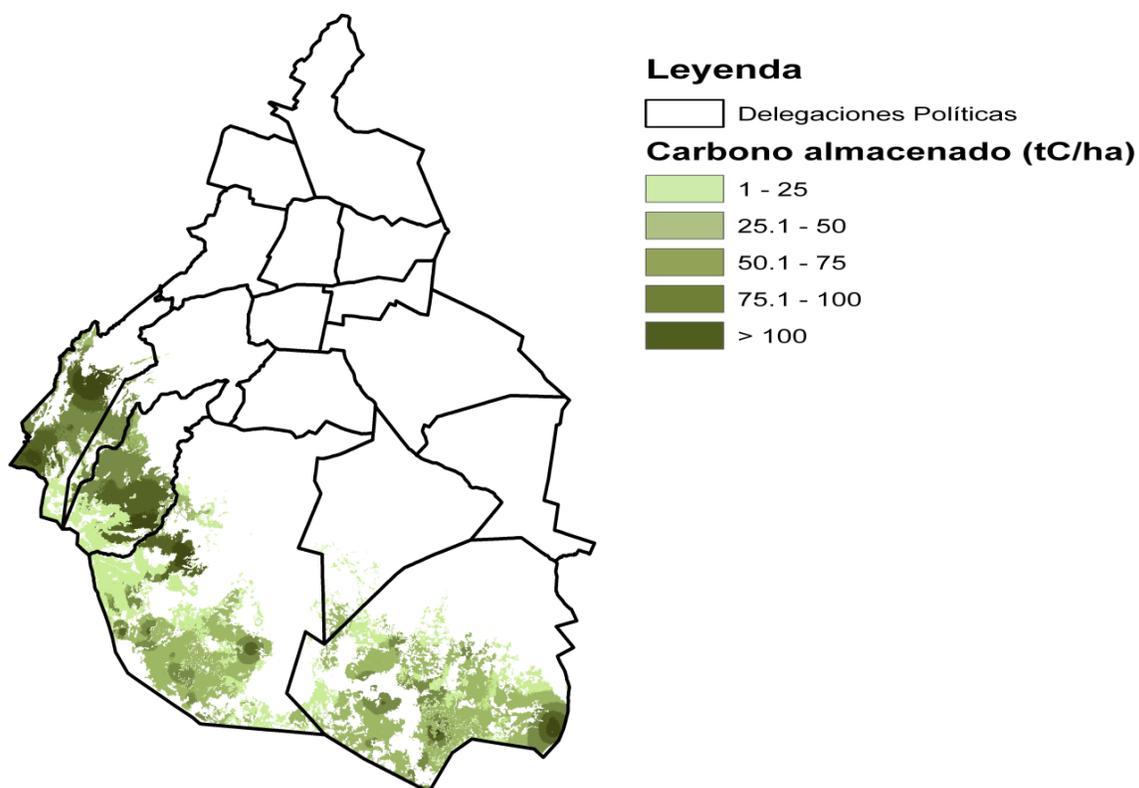
Contenido de Carbono

A continuación se presentan los mapas de las densidades de Carbono derivadas de los tres métodos de interpolación.



Kriging Ordinario

Cokriging Ordinario



Conditional simulation

Figura 12. Estimaciones resultantes de los tres métodos geoestadísticos

Una vez obtenidas las interpolaciones se determinó su error cuadrático medio, resultando que para los bosques de Oyamel y Mixto el método de Conditional simulation arrojó el menor error (3.02 y 1.09 tC/ha respectivamente) y para el caso de los bosques de Pino fue el método de Kriging Ordinario (2.21 tC/ha). En el siguiente cuadro se presentan los valores resultantes de la validación cruzada.

Cobertura vegetal	KO Error cuadrático medio (tC/ha)	CO Error cuadrático medio (tC/ha)	CS Error cuadrático medio (tC/ha)
Oyamel	3.25	3.29	3.02
Pino	2.21	2.32	2.46
Bosque Mixto	1.20	1.15	1.09

Cabe señalar que estos resultados de validación deben tomarse con precaución, ya que ésta fue realizada con los mismos datos que con los que se calibraron los algoritmos, por lo que se recomienda validar con otros datos a los usados en la calibración (e.g. los conglomerados del inventario nacional forestal) para así reducir la incertidumbre.

Para la elaboración de la capa final de carbono (figura 13), se conjuntó un mosaico de las mejores estimaciones por tipos de bosque (que presentaron el menor error cuadrático medio) de entre los 3 métodos geoestadísticos para así tener mejor representada la variabilidad espacial de las densidades de carbono en estos tres tipos de cobertura forestal.

Distribución espacial del Carbono almacenado en la biomasa aérea en el Suelo de Conservación, D.F.

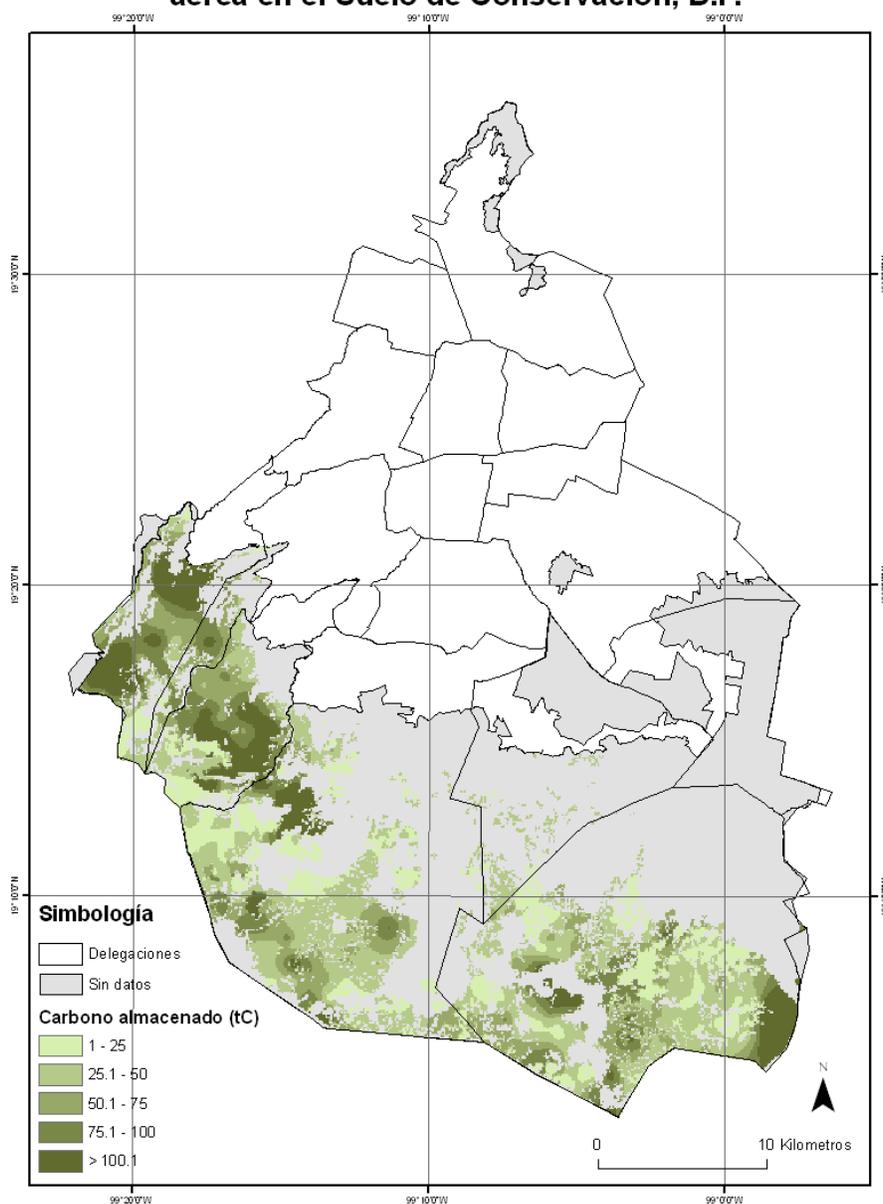


Figura 13. Mapa final de carbono almacenado en la biomasa aérea

Este último, se integro a la información interpolada realizada por el INIFAP de las clases de bosque de Encino, Matorral inerte y otras comunidades vegetales a fin de tener una representación integrada (figura 14) de la vegetación perteneciente al suelo de conservación. Cabe señalar que la información incorporada presenta un error cuadrático medio de 38.61tC/ha.

Distribución espacial del Carbono almacenado en la biomasa aérea en el Suelo de Conservación, D.F.

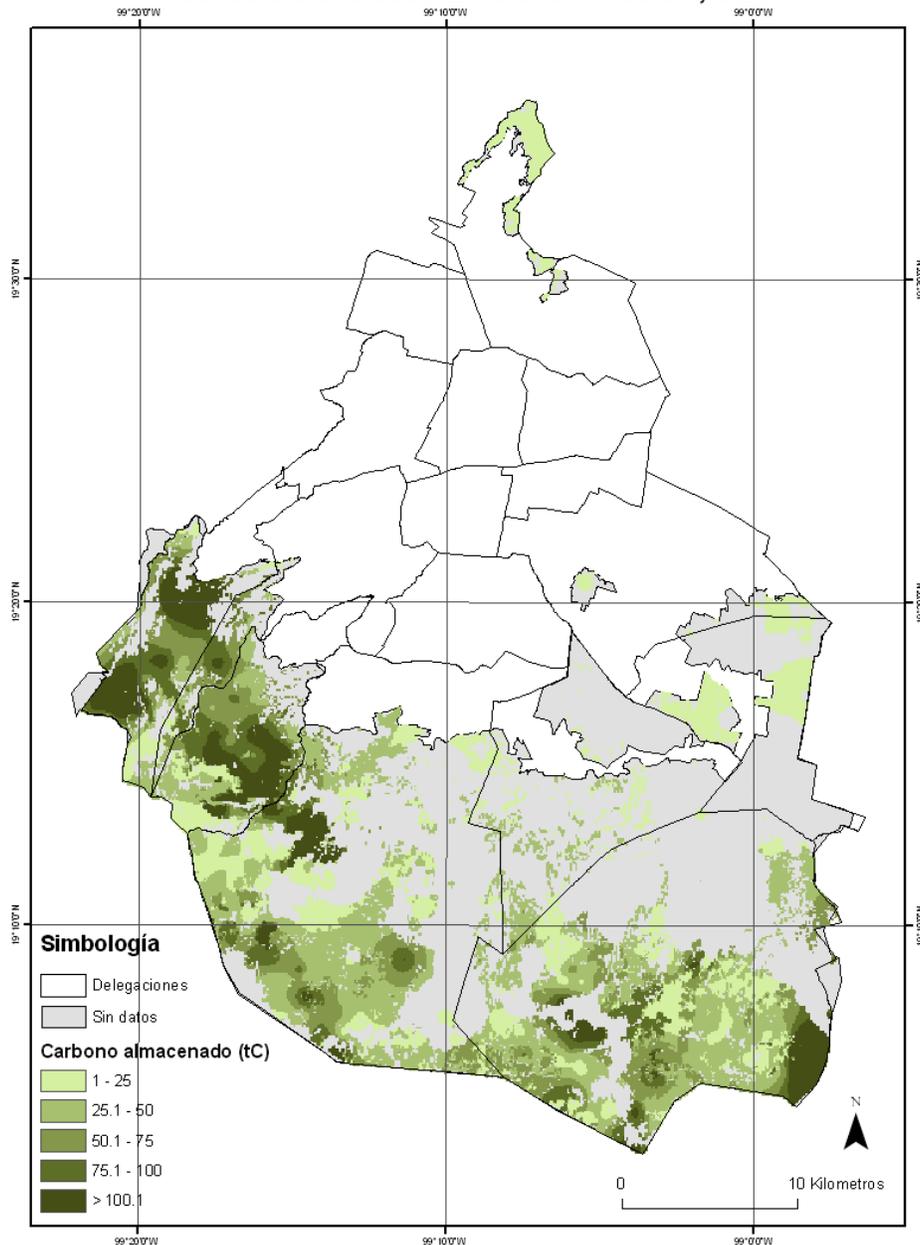


Figura 14. Mapa de carbono almacenado en la biomasa aérea integrado con la información del INIFAP.

CARBONO ALMACENADO POR TIPO DE COBERTURA FORESTAL

De los tres tipos de cobertura forestal que se analizaron en este estudio, el bosque que presenta mayor cantidad de Carbono almacenado corresponde a la clase de *Abies religiosa*, con 778,362tC en un superficie de 9,357.60ha; le sigue el bosque de pino con 778,362Tc en una superficie de 19,529.96ha y por último los bosques mixtos con 192,539tC en una superficie de 5,737.85. En el siguiente cuadro se presentan los valores puntuales y los referentes a los límites inferior y superior.

Cobertura vegetal	Estimación puntual del total (tC)	Límite inferior (tC)	Límite superior (tC)
Oyamel	798,662	772,336.08	826,282.92
Pino	778,362	743,468.1	813,478.9
Bosque Mixto	192,539	186,845.5	198,337.8

Cabe resaltar la importancia de los bosques de Oyameles ya que presentan la mayor cantidad de carbono almacenado en una superficie mucho menor a la que representa los bosques de Pino. Además de acuerdo con estudios de Nava (2005) los bosques de oyamel requieren de ciertas condiciones abióticas específicas como es el caso de temperatura baja y sin grandes oscilaciones térmicas diurnas así como una humedad relativa alta y constante. Aunado a los factores mencionados anteriormente de acuerdo a Pascual (2003) el *Abies religiosa* es una especie cuyo crecimiento está en función de la sombra, el suelo y la competencia con otras especies del sotobosque, disminuyendo la disponibilidad de los recursos; la mortandad de las plántulas de *Abies religiosa* puede estar asociada con la disputa subterránea entre las raíces de éstas y la vegetación del sotobosque, ya que el sistema de raíces de las coníferas es menos capaz que el de las angiospermas de aprovechar el abastecimiento de agua y nutrimentos en el suelo en sus etapas iniciales. Aunque también hay que señalar que la colonización vertical y horizontal del sotobosque modifica las condiciones microambientales, creando sombras que favorecen la germinación y el crecimiento de los *Abies religiosa*. Todas estas razones indican la vulnerabilidad de esta especie, por lo tanto, es importante crear estrategias que aseguren su permanencia.

CARBONO ALMACENADO POR DELEGACIÓN

La delegación Milpa Alta es la que tiene más carbono almacenado en la biomasa aérea de los tres tipos de cobertura forestal (33.2% del total estimado) en el presente estudio; le siguen Tlalpan (27.6%), Cuajimalpa (17.6%), Magdalena Contreras (17.3%), Álvaro Obregón (3%) y por último Xochimilco (1.3%). En el siguiente cuadro se presentan los valores totales (tC), los valores máximos y porcentajes.

Delegación	Total (tC)	Valor Máximo	Porcentaje
Cuajimalpa	311,019	216	17.6
Álvaro Obregón	52,789	119	3
Magdalena Contreras	306,869	198	17.3
Tlalpan	488,831	170	27.6
Milpa Alta	587,243	219	33.2
Xochimilco	22,812	57	1.3

Cabe resaltar que las delegaciones Milpa Alta y Tlalpan presentan la mayor superficie (36.8 y 33.5% respectivamente) de los tres bosques analizados, por lo que a su vez hacen que sean las delegaciones con mayor carbono almacenado en la biomasa aérea. Le siguen las delegaciones Magdalena Contreras (13.3%), Cuajimalpa (11.6%), Álvaro Obregón (2.8%) y Xochimilco (1.9%).

PERSPECTIVAS DE LOS ALMACENES DE CARBONO

La diferencia de valores de Contenido de Carbono almacenado por tipo de cobertura vegetal, presenta variaciones derivadas de:

- La edad del arbolado, ya que los bosques son multietáneos, cuyo crecimiento diferencial derivado de la calidad de sitio, refleja diferentes densidades de biomasa arbórea y por ende almacenes de Carbono e incrementos disímiles en la misma cobertura vegetal.
- El estado de conservación de la masa forestal, aunado a la densidad del arbolado y las condiciones actuales de la estructura y composición de cada cobertura vegetal.
- La infraestructura de los caminos y las pendientes (accesibilidad), son otro factor determinante en la distribución de los almacenes de Carbono por cobertura vegetal.

Existen otros procesos que afectan a la Cuenca:

Tala. En la cuenca se pueden observar tablones ordenados para su carga, así como una presencia importante de tocones con diámetros superiores a los 30 cm; en cierta medida este proceso está influenciado por la Veda Forestal presente en esta área.

Contaminación atmosférica. El suelo de conservación se encuentra principalmente en el Sur de la Cuenca del Valle de México, dirección a la cual viajan los vientos dominantes arrastrando la contaminación generada en la ciudad, dando como consecuencia clorosis, exposición a concentraciones de ozono, afectación de la fitomasa, alteración entre los ciclos reproductivos de diferentes especies, lluvia ácida, retirada de polinizadores y dispersadores, entre otros; esta contaminación también genera condiciones microclimáticas que favorecen el desarrollo y distribución vertical de plagas forestales. Por ejemplo en el estudio de Hernández et al. (2001) en bosques de *Pinus Hartwegii* de Zoquiapan, Ajusco y Desierto de los Leones, concluye que la exposición de esta especie a 0.30 partes por millón de ozono genera daños en la germinación y el crecimiento del tubo polínico de los granos de polen de *Pinus Hartwegii* en los bosques del sur de Distrito Federal.

Hernández T., Cox, R., Malcolm, J., Bauer, M., Vargas, J., Velázquez, A. y Alvarado, D. (2001). Impacto del Ozono sobre el polen de *Pinus Hartwegii*. Ciencia Forestal en México. Vol. 26. NÚM 89: 5-18.

Plagas. La veda forestal en el suelo de Conservación del D.F. en combinación con el desarrollo de plagas, impide el adecuado saneamiento de la masa forestal remanente, dando lugar a una disminución en la captura potencial de carbono, la purificación del aire, la generación de oxígeno y un incremento en la distribución de plagas. Por ejemplo en el estudio de Velasco *et al.* (2002) en bosques contiguos a San Miguel Ajusco, Santo Tomás Ajusco y Magdalena Petlascalco en la delegación Tlalpan, concluye que con un 95% de confiabilidad el porcentaje de árboles plagados está entre 8.9 y 18.5%, mientras que en el porcentaje de árboles enfermos se encuentra entre 4.2 y 13.7%. Las plagas y enfermedades que destacan son *Scirius sp*, *Dendroctonus adjunctus*, *Ips mexicanus*, *Ascomyceto*, *Lophodermium sp.* Y *Cronartium sp.*

Velasco, E., Reséndiz, F., Sandoval, L., Olvera, P., Moreno, F., Gutiérrez, M. y Cedeño, O. (2002). Diagnóstico sanitario de los bosques del Distrito Federal. *Ciencia Forestal en México*. Vol. 27. NÚM 91: 7-26.

Incendios naturales e inducidos. Esto también afecta de forma directa el potencial de captura de carbono y sus almacenes, así como los continuos de bosque que permiten el desplazamiento de las especies. Por ejemplo en el estudio de Flores (2006) en bosques de la Cuenca de Río Magdalena en la delegación Magdalena Contreras, se resalta el alto índice de incendios que presenta la zona, ya que para el periodo de 1995-2004 se presentaron 157 incendios, siendo el año de 1998 el año de mayor incidencia. Proporcionalmente la comunidad de *Quercus* es en donde ocurre el mayor número de incendios, probablemente porque es la más expuesta a la influencia humana.

Flores, A., (2006). Frecuencia de incendios forestales, su relación con la precipitación y la riqueza de especies vegetales, en la cuenca del río Magdalena, D.F., México. Tesis de Licenciatura en Biología, Facultad de Ciencias, UNAM, México.

FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

De acuerdo con lo observado en este estudio hace falta impulsar investigación en las siguientes áreas:

- Ecuaciones alométricas: Las ecuaciones empleadas por el INIFAP para la conversión a valores de Carbono, Biomasa y Volumen se generaron para bosques en Tlaxcala, Oaxaca y Estado de México. Esto puede generar incertidumbre ya que las calidades de sitio y condiciones abióticas no son las mismas que para el Suelo de Conservación por lo que sería conveniente generar ecuaciones alométricas de las principales especies pero con árboles extraídos de esta zona.
- Incrementar el muestreo: Aumentar el muestreo para las coberturas forestales de Bosque Inducido (11 conglomerados) y Matorral (7 conglomerados). Además de muestrear en otros tipos de vegetación que no se incluyeron tanto en la información de CORENA como en la del INIFAP como por ejemplo los Bosques de Encino y Humedales. Esto afín de poder mapear las densidades de carbono en la biomasa aérea para una mayor superficie del Suelo de Conservación.
- Otros métodos: este reporte emplea un método de varios que se están llevando a cabo en el estado del arte del mapeo de la variabilidad espacial del carbono en bosques, por lo que conocer la incertidumbre de otros métodos como la relación entre el coeficiente de retrodispersión de imágenes Radar, la coherencia derivada de procesos de interferometría, entre otros. Permitiría conocer cuál es el enfoque apropiado para mapeo del carbono en la biomasa aérea en función de los tipos de bosques del Suelo de Conservación así como el relieve (pendientes) asociadas a estos bosques.
- Reservorios de Carbono: Este estudio está centrado sólo en el carbono almacenado en la biomasa aérea (fuste, ramas y hojas), por lo que estimar los otros cuatro reservorios, de acuerdo al IPCC son a) biomasa subterránea (raíces), b) Necromasa (árboles muertos en

pie, ramas, entre otros), c) Mantillo (hojarasca) y d) Suelo, permitiría entender al Suelo de Conservación como un sumidero de este gas de manera integral.

- Parcelas de monitoreo: Es importante contar con parcelas de monitoreo distribuidos por los diferentes tipos de coberturas forestales afín de monitorear la dinámica del carbono en los 5 reservorios y así poder conocer el potencial de captura que tiene el Suelo de Conservación.

Bibliografía

- Journel, A.G. y Ch. J. Huijbregts. 1978. Mining Geostatistics, Academic Press, New York.
- Goovaerts, P. (2000) Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall. *Journal of Hydrology* 228: 113-129.
- Isaaks, E. and Srivastava, R. (1989). An Introduction to Applied Geostatistics. Oxford University Press. New York. 575p.
- Maselli, F. and Chiesi, M. (2006) Evaluation of Statistical Methods to Estimate Forest Volume in a Mediterranean Region. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 44, No. 8: 2239-2250.
- Mejía, O., Betancur T. y Londoño L. (2007). Geostatistics Techniques in Bajo Cauca Antioqueño Hydrogeology. *Dyna* 152: 137-149.
- Moral, F. (2004). Aplicación de la geoestadística en las ciencias ambientales. *Ecosistemas* 13: 78-86.
- Nava Mariana, 2005, "Carbono almacenado como servicio ecosistémico y criterios de restauración en el Bosque de Abies religiosa de la Cuenca del Río Magdalena, D.F., México, Tesis de Maestría, Facultad de Ciencias, UNAM, 70p.
- Pascual C. N., Musálem M.A. y Boyás J. C., 2003, "Efecto de la vegetación asociada al sotobosque sobre el crecimiento y desarrollo inicial de Abies religiosa (HBK) Schltdl. Et Cham.", En: *Ciencia Forestal*, #94, Vol. 28, p. 7-22.
- Sales, M., Souza, C., Kyriakidis, P., Roberts, D., and Vidal, E. (2007) Improving spatial distribution estimation of forest biomass with geostatistic: A case study for Rondonia, Brazil. *Ecological Modelling*, 205: 221-230.
- Stein, A. and Van Der Meer, F. (2002). *Spatial Statistics for Remote Sensing*. Kluwer Academic Publishers. Vol. 1. 284p.
- Websters, R., and Oliver, M. (2007) *Geostatistics for Environmental Scientists*. John Wiley & Sons. 2° Edition. Great Britain. 332p.

- Yarus, J. and Chambers, R. (1994). Stochastic Modeling and Geostatistics. Principles, Methods, and Case Studies. The American Association of Petroleum Geologist. USA. 342p.

Estudio: *Evaluación de la vulnerabilidad ambiental que presenta el suelo de conservación por la pérdida de servicios ecosistémicos a consecuencia del cambio de uso de suelo*

INFORME FINAL: **PRIMERA SECCION**

Análisis sobre los sitios de mayor aportación de servicios ambientales en términos de aptitud de infiltración

Noviembre, 2010

Este análisis se basa en la aplicación de un modelo derivado de la metodología (ver documento respectivo en esta misma sección, denominado *Ubicación y análisis de los sitios más relevantes para la infiltración*), que contempla algunos elementos multi-temporales (como la precipitación), y en una valoración de los resultados cartográficos y estadísticos.

Con la finalidad de no repetir la bibliografía *in extenso* de la metodología respectiva, es conveniente que para la consulta a las pocas referencias bibliográficas se recurra a dicha metodología.

Recarga es el proceso de alimentación del acuífero con agua proveniente de cualquier dirección. Infiltración puede definirse como el movimiento del agua desde la superficie hacia la superficie (Scanlon *et al.*, 2002). Estos autores igualmente indican que en algunas ocasiones la infiltración puede ser considerada equivalente a la recarga. Visto el suelo como un sistema que puede absorber una cantidad máxima de agua (S) por día o por evento promedio de precipitación, la infiltración será justamente un valor aproximado a S.

En este estudio se estima infiltración a partir de S implementando un modelo de tipo cubeta (*bucket*). Es decir que el suelo se considera como un recipiente capaz de ser rellenado hasta un tope máximo por el agua proveniente de la precipitación

o de acumulaciones de flujo. La definición de S está basada en las determinaciones del modelo número de curva (CN) del SCS (Servicio de Conservación de Suelos) hoy NRCS (Servicio de Conservación de Recursos Naturales) de los EU. El método es descrito en detalle en NEH-4 (SCS 1985) y en TR-55 (USDA 1986). Ha sido aplicado para definir aspectos relacionados con escorrentía e infiltración (Rao *et al.*, 1996; Sharma *et al.*, 2001; Chandramohan y Durbude, 2001; Sharma y Kumar, 2002, Coskun 2005, Yuan 2008) y es simple, fácil de entender, estable y útil para cuencas no instrumentadas (Mishra y Singh, 2003). Para el estudio de PAOT en particular, el principal motivo por el cual fue elegido para estimar S es el mencionado por autores como Perez-Pedini *et al.* (2005) relativo a que CN es una atractiva opción para estudiar los impactos de las modificaciones de cobertura terrestre en la generación de escorrentías y por tanto en la disminución de las capacidades de los territorios para detener y captar agua de lluvia y para recargar acuíferos. De acuerdo con los últimos autores el método puede ser fácilmente modificado para representar los cambios en la cuenca. En el contexto del proyecto PAOT esta característica es de suma importancia ya que el SC viene incrementando su capacidad de generación de escorrentías y paralelamente decrementando su capacidad de recargar acuíferos en función de los cambios en cuanto a cobertura terrestre.

El modelo propuesto tiene como una variable principal al tipo de cobertura terrestre obtenido mediante clasificación de imágenes satelitales, que nos permiten ponderar las posibilidades de recarga del acuífero indicadas mediante el estimado de infiltración. Otras variables incluidas en el modelo son precipitación multianual diaria (P, considerada como un evento por día), grupos hidrológicos de suelos (GHS, definidos en función de la capacidad del suelo para permitir la generación de escorrentías o equivalentemente de infiltración), acumulaciones de flujo (ver inciso correspondiente) y permeabilidad geológica.

Cabe mencionar que la disponibilidad de imágenes de satélite con su validación de campo, permitiría un monitoreo multitemporal para darle seguimiento a los

cambios que se vayan presentando en cuanto a las posibilidades de recarga del acuífero indicadas mediante el estimado de infiltración.

Cartografía

En la metodología detallada y presentada en el documento denominado *Ubicación y análisis de los sitios más relevantes para la infiltración* (acorde con los términos de referencia), se da cuenta de la cartografía utilizada; a continuación se presentan los datos básicos:

Cobertura terrestre

Datum: D_WGS_1984

Proyección: reproyectada a UTM zona 14N

Descripción de capas: Muestra resultados de clasificación supervisada por clases de cobertura vegetal de acuerdo con la capa de uso actual de suelo y vegetación, serie III de INEGI (2005) escala 1:250 000. Los polígonos de entrenamiento obtenidos fueron verificados uno a uno en la imagen procesada para evitar al máximo la confusión.

Fecha de la información: 2010/05/01

Fecha de creación de la capa: 19/08/2010

Nombre del grid: C100205

Fuente: Clasificación supervisada de Imagen Landsat5. Resultados de la clasificación Average accuracy = 89.75 %, Overall accuracy = 95.91 % y KAPPA COEFFICIENT = 0.96082

Escala: resolución espacial 32 metros cuadrados por pixel

Responsable: Felipe Omar Tapia Silva, otapia@centrogeo.org.mx

Precipitación

Datum: D_WGS_1984

Proyección: reproyectada a UTM zona 14N

Descripción de capas: Expresa el promedio de precipitación diario de los últimos 30 años de la época de lluvias (Mayo a Octubre). Se obtuvo como resultado de una interpolación kriging de tipo ordinario con datos obtenidos del SMN.

Fecha de la información: 27/07/ 2010

Fecha de creación de la capa: 17/08/2010

Nombre del grid: ppok_sc

Fuente: Base de Datos Climatológica del Sistema Meteorológico Nacional

Escala: resolución espacial 32 metros cuadrados por pixel.

Responsable: Felipe Omar Tapia Silva, otapia@centrogeo.org.mx

Permeabilidad geológica

Datum: D_WGS_1984

Proyección: proyectada a UTM zona 14N

Descripción de capas: Resultado de la interpolación por Kriging Ordinario de los datos provistos por PAOT provenientes del estudio realizado por INIFAP de mediciones de infiltración.

Nombre del grid: permgeo_sc

Fecha de la información y creación de la capa: Julio de 2010.

Fuente: Levantamiento en campo de mediciones de infiltración realizadas por INIFAP para PAOT.

Escala: resolución espacial 32 metros cuadrados por pixel

Responsable: Felipe Omar Tapia Silva, otapia@centrogeo.org.mx

Permeabilidad de suelos

Datum: D_WGS_1984

Proyección: UTM zona 14N

Descripción de capas: representa el valor de permeabilidad geológica de suelos

Fecha de la información y creación de la capa: Información generada por el Geólogo F. Mooser y recibida directamente por el responsable de la generación de esta capa geográfica. Fecha de creación de la información desconocida.

Nombre del grid: permsuel_ok

Fuente: Federico Mooser (comunicación directa)

Escala: 1:50,000

Responsable: Felipe Omar Tapia Silva, otapia@centrogeo.org.mx

Profundidad del suelo

Datum: D_WGS_1984

Proyección: proyectada a UTM zona 14N

Descripción de capas: representa el valor en cm de la profundidad del suelo interpolados mediante kriging ordinario a partir de datos obtenidos en campo.

Fecha de la información y creación de la capa: Julio de 2010.

Nombre del grid: profcm_ok

Fuente: Levantamientos de suelos realizados por personal de CentroGeo hace aproximadamente 8 años (mayor información con Aristides Saavedra y Daniel López de CentroGeo, encargados de los levantamientos).

Escala: resolución espacial 32 metros cuadrados por pixel

Responsable: Felipe Omar Tapia Silva, otapia@centrogeo.org.mx

Procedimiento

El procedimiento que se siguió para la obtención de la cartografía resultado del modelo se resume en: obtención de S, “Llenado del recipiente mediante precipitación” (ver inciso correspondiente), Cálculo de acumulaciones de flujo, “Rellenado mediante acumulaciones de flujo”, Identificación de zonas de alta acumulación y Ajuste por geología. Este último ajuste permite un mayor acercamiento de los valores de infiltración a los de recarga. La razón de lo anterior es que el modelo no solo considera la capa superior del sistema de almacenamiento hídrico, sino además la permeabilidad de la capa siguiente (la geológica).

1. Obtención de cantidad máxima absorbida por el suelo (S)

De acuerdo con el método CN, S se obtiene en unidad volumétrica (mm o pulgadas) considerando GHS y el tipo de cobertura terrestre. Estos dos factores se resumen en lo que se denomina propiamente CN, de acuerdo a la expresión:

$$S = 1000/CN - 10.$$

Los valores de CN van de 0 a 100, indicando respectivamente que toda la precipitación se infiltra y que esta escurre en su totalidad. CN se obtiene a partir de

tablas que relacionan este valor con tipo de cobertura terrestre y con grupo hidrológico de suelos (USDA 1986).

2. “Llenado del recipiente mediante precipitación”

A nivel de pixel se restó a S el valor de P, lo que significa que se simula el proceso por el cual la lluvia es captada por el suelo en función de sus mismas capacidades para el efecto (S).

3. Cálculo de acumulaciones de flujo

Las acumulaciones de flujo se calcularon en términos del modelo propuesto por Tapia *et al.* (2007). Este modelo consiste en estimar escorrentías a nivel de pixel utilizando el método CN y posteriormente “ruteando” esas escorrentías de acuerdo al modelo de conectividad hidrológica superficial propuesto por Jensen y Domingue (1998) mediante el cálculo de direcciones y acumulaciones de flujo.

4. “Rellenado con acumulaciones de flujo”

Una vez realizado el relleno del recipiente (el suelo) mediante P, hubo algunos pixeles con capacidad de absorción de agua disponible. Es decir que su valor de P fue menor que el de S. Estos pixeles fueron “rellenados” con agua que precipitó en otros pixeles pero que en función de la conectividad hidrológica superficial se acumularon en ellos. Después de este procedimiento se considera que el suelo (recipiente o *bucket*) esta completamente lleno y ya no tiene mayor de capacidad de absorber agua hasta el siguiente evento de precipitación. El resultado de este proceso es un continuo de valores de estimados de infiltración. Para efectos de clasificación en términos cuantitativos del mapa de infiltración obtenido se procedió a calcular el cociente infiltración/precipitación, que nos aporta una excelente comparabilidad de los resultados obtenidos, ya que nos expresa cuanto de lo que llueve se infiltra y fue utilizado para categorizar el mapa de infiltración en intervalos de 0.2 del cociente: < 0.2 muy baja, 0.2 a 0.4 baja, 0.4 a 0.6 moderada,

0.6 a 0.8 alta y > 0.8 muy alta. Lo anterior también puede ser visto en términos de porcentaje como: <20% muy baja y así sucesivamente hasta > 80% muy alta. Es importante aclarar que con este procedimiento es posible asignarle a cada categoría cualitativa un valor estimado de la cantidad de agua que se infiltra, es decir su significado en términos cuantitativos.

5. Identificación de zonas de alta acumulación

Las zonas de alta acumulación de flujos fueron identificadas y marcadas en una categoría adicional a las cinco previamente definidas de aptitud a infiltración.

6. Ajuste por geología

Este ajuste permite un mayor acercamiento de los valores de infiltración a los de recarga. La razón de lo anterior es que el modelo no solo considera la capa superior del sistema de almacenamiento hídrico, sino además la permeabilidad de la capa siguiente (la geológica). En términos operativos el ajuste se realizó de la siguiente manera. Teniendo la clasificación de las capas de infiltración y permeabilidad geológica en cinco categorías (1.muy baja, 2.baja, 3.moderada, 4.alta y 5.muy alta) respectivamente, cada categoría de infiltración se comparó con cada una de las de permeabilidad; en los casos en donde la permeabilidad es muy baja y la infiltración alta se reasignó la infiltración a una categoría menor.

Obtención de la cartografía de entrada del modelo

Grupos hidrológicos de suelos

Para la obtención de los GHS, se consideraron los resultados de las 51 mediciones de permeabilidad de suelos realizadas por INIFAP para PAOT. Las mediciones fueron interpoladas mediante kriging ordinario para generar una superficie continua de esta variable. Otra variable considerada en esta determinación es la capa de profundidad de suelos que fue interpolada de la

misma manera. El procedimiento consistió en realizar una clasificación con base en las capas de entrada tomando en cuenta la premisa de que la permeabilidad de los suelos es afectada por la profundidad de estos. Lo anterior visto por ejemplo en términos de que un suelo muy permeable pero poco profundo tiende a generar una mayor cantidad de escorrentías que uno con mayor profundidad. Se obtuvieron así las cuatro categorías de GHS: la 1 correspondiente a alta permeabilidad de suelos, la 2 a moderada, la 3 a baja y la 4 a muy baja.

Generación de superficies de precipitación a partir de interpolación

Las superficies de precipitación se obtuvieron mediante la interpolación de valores de lluvia en promedio diario multianual (30 años) para la época cuando la lluvia se considera bien establecida (temporada mayo-octubre). En este caso también se utilizó kriging ordinario. La razón de tomar este tipo de valor estadístico de la precipitación consiste en que se considera que las lluvias promedio y no las intensas son las que pueden generar el proceso de infiltración. Las muy intensas tienden a generar escorrentías en mayor medida.

Obtención de coberturas terrestres

Las coberturas terrestres fueron obtenidas mediante clasificación supervisada de una imagen satelital de 2010 (Landsat 5), en combinación de bandas RGB 423. Con apoyo de la carta de uso actual de suelo y vegetación Serie III de INEGI (2005), escala 1:250 000, se realizó una cobertura de puntos de entrenamiento base para la clasificación que se verificaron sobre la imagen procesada. Como se mencionó anteriormente el modelo propuesto permite la realización de monitoreo multitemporal de los efectos de la modificación de usos de suelo sobre los procesos hidrológicos escorrentía e infiltración. Los índices de precisión de la clasificación son: *average accuracy* 89.75, *overall accuracy* 95.91 y coeficiente kapa 0.9, indicando un procedimiento de clasificación correcto.

Análisis de la cartografía obtenida

Para efectos de entender mejor el producto obtenido hay que considerar que no se cuenta información para todo el Suelo de Conservación (ver recuadro); y los puntos que se enlistan más adelante:

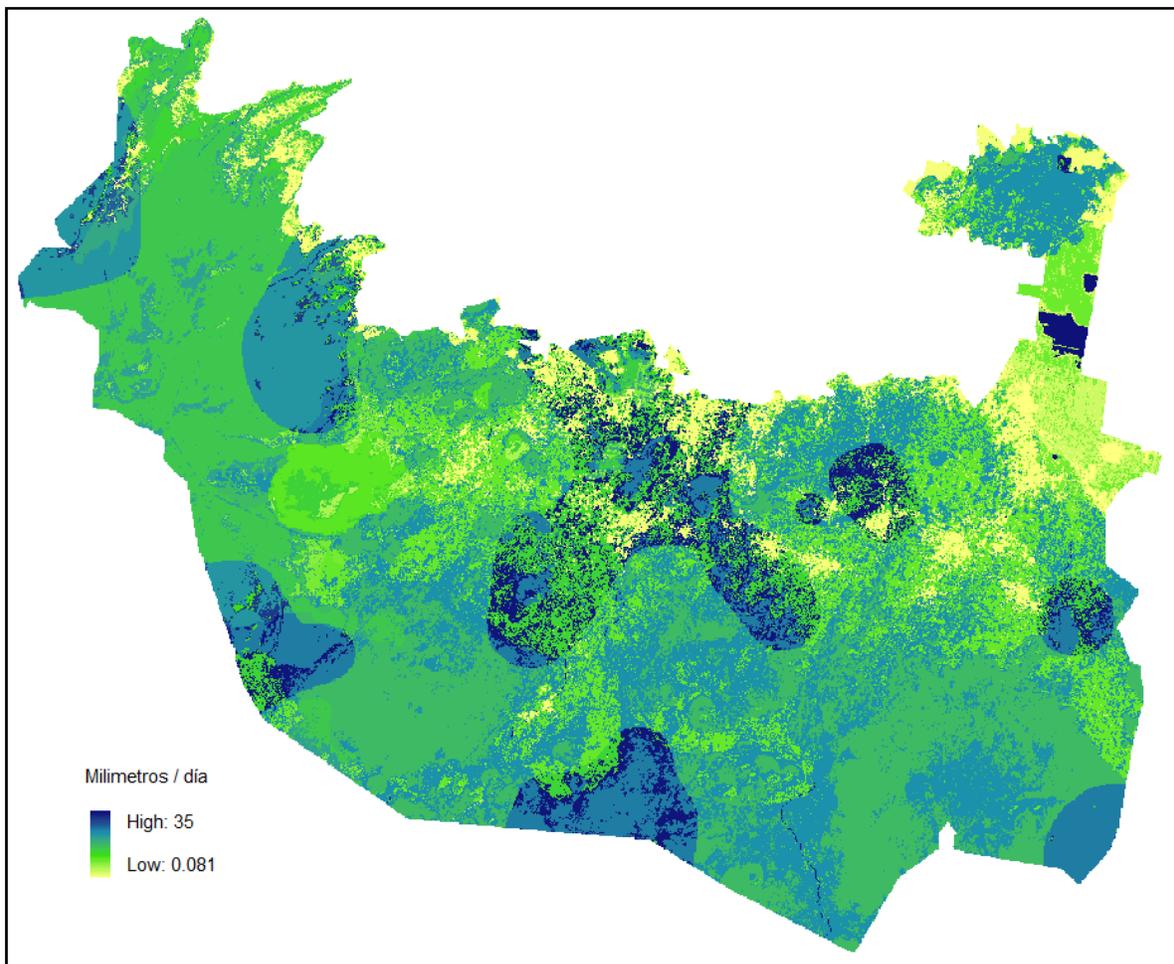
Zona de estudio

Del total del SC solo se obtuvo información de estimados de infiltración para la parte sur (polígono mayor), pues no se tuvo información disponible de permeabilidad geológica, motivo por el que la zona norte de Xochimilco, Cerro de la Estrella (Iztapalapa) y la zona norte del D.F (Gustavo A. Madero) fueron excluidos (Mapa 1).

1. Aunque ya se había mencionado antes es importante considerar que no toda el agua que se infiltra se recarga, esto es especialmente importante en zonas boscosas y otras con vegetación, donde se considera que hasta un 50% de la precipitación puede llegar a evaporarse. Esta evaporación proviene en buena parte de lo que se infiltró es decir lo que se captó en los suelos.
2. Como también fue mencionado el ajuste por permeabilidad geológica acerca un poco más los valores de infiltración obtenidos a los valores de recarga.
3. El mapa obtenido es un resultado de la cartografía disponible y por ello es sujeto a mejorarse en cuanto se disponga de versiones mejores de la misma. Ejemplo de lo anterior es el bandeo que se observa en el mapa en cuanto a categorías de infiltración y que puede ser resultado del mismo bandeo observado en inputs como es el mapa de precipitación.

Con las capas de cobertura terrestre, precipitación, direcciones de flujo y grupos hidrológicos (obtenida a partir de profundidad y permeabilidad de suelo), se genero un primer mapa de aptitud a infiltración el cual se ajusto de acuerdo con las clases obtenidas de dicho mapa y permeabilidad geológica (cinco categorías para cada caso). Debido a que las capas de suelos solo cuentan con información para la zona sur del suelo de conservación, no es posible generar el mapa de aptitud a infiltración para todo el suelo de conservación, pues no se puede generar la capa completa de grupos hidrológicos, insumo básico en esta metodología. El mapa 1 muestra cantidad de agua infiltrada por pixel, expresada en mm/día.

Mapa 1. Aptitud a infiltración para el suelo de conservación del año 2010.

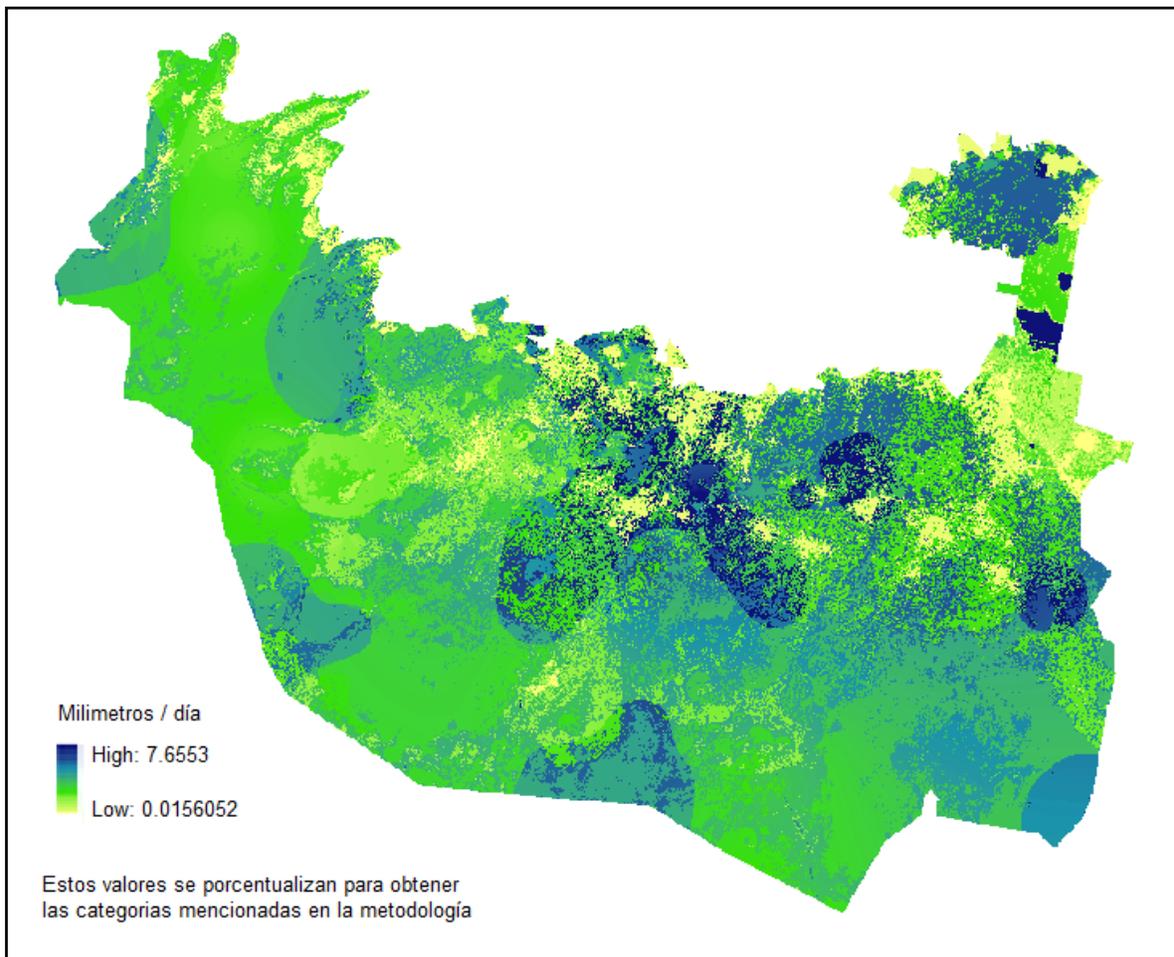


Con el fin de tener un mejor entendimiento de la esta información y expresiones estadísticas del modelo cartográfico, cabe recordar lo señalado anteriormente:

Para efectos de clasificación en términos cuantitativos del mapa de infiltración obtenido se procedió a calcular el cociente infiltración/precipitación, que nos aporta una excelente comparabilidad de los resultados obtenidos, ya que nos expresa cuanto de lo que llueve se infiltra y fue utilizado para categorizar el mapa de infiltración en intervalos de 0.2 del cociente: < 0.2 muy baja, 0.2 a 0.4 baja, 0.4 a 0.6 moderada, 0.6 a 0.8 alta y > 0.8 muy alta. Lo anterior también puede ser visto en términos de porcentaje como: <20% muy baja y así sucesivamente hasta > 80% muy alta. Es importante aclarar que con este procedimiento es posible asignarle a cada categoría cualitativa un valor estimado de la cantidad de agua que se infiltra, es decir su significado en términos cuantitativos.

Con este fin, se presenta el mapa del coeficiente de Infiltración/lluvia del año 2010 (ver mapa 2).

Mapa 2. Coeficiente de Infiltración/lluvia del suelo de conservación para el año 2010.



En las siguientes tablas se muestra la distribución de las categorías de infiltración por delegación.

Tabla 1. Categorías del coeficiente infiltración/lluvia del suelo de conservación para el año 2010.

Clase	HA	%
Muy baja	7,350.4	9.1
Baja	26,566.9	32.8
Media	28,296.8	34.9
Alta	12,788.3	15.8
Muy alta	6,099.8	7.5
Total (*)	81,102.2	100

(*) Estas cifras solo representan el área para la cual se genero información, sin incluir la correspondiente a humedales

De la información generada (Tabla1) el 7.5% corresponde a la categoría de infiltración muy alta, el 15.8% a la de alta, el 34.9% a la de media, el 32.8% a la de baja y el 9.1% a la de muy baja. Se tiene entonces un 22% del territorio con más de un 60% de infiltración de la cantidad de lluvia y un 32.4% entre 40% y 60% de infiltración de la cantidad de agua precipitada. Es decir resulta que 54% del territorio analizado del SC infiltra el 40% de la lluvia precipitada como mínimo. Así mismo, el 67% de la zona analizada corresponde a las delegaciones Milpa Alta y Tlalpan.

De acuerdo con la tabla 2 se realizo un análisis delegacional que muestra que Xochimilco, Tlalpan, Milpa alta y Magdalena Contreras, representan las zonas en donde más del 50% del área de SC tiene una infiltración de moderada a alta, por otra parte Álvaro Obregón, Cuajimalpa, Iztapalapa y Tláhuac presentan altos porcentajes de baja infiltración.

El porcentaje de superficie con una infiltración alta y muy alta por delegaciones es:

- 0.05% de 3,476 ha para Álvaro Obregón,

- 3.8% de 5,353.2 ha para Cuajimalpa,
- 38% de 904.1 ha para Iztapalapa,
- 7% de 4,997.7 ha para Magdalena Contreras,
- 33% de 28,489.7 ha para Milpa Alta,
- 28% de 25,077 ha para Tláhuac,
- 14% de 26,043.1 ha para Tlalpan,
- y 50% de 6,725.6 ha para Xochimilco.

Del total del territorio del SC (87,412 ha) solo se analizó el 93.1% (81,353.1 ha) debido a la falta de información para el resto de la zona (Tabla3). Las clases Baja y media son las mejor representadas con el 30.4% y 32.4% respectivamente, mientras que las de menor área son Muy Baja (8.4%) y Muy alta (7%).

Los resultados para todo el territorio analizado y por delegación nos indican que aun se tiene disponible una cantidad muy importante de territorio que presta en buena medida el servicio ambiental de recarga. No obstante, estos resultados deben ser analizados a mayor detalle y en su caso ajustados en caso de encontrarse determinaciones no justificables. Como se mencionó los resultados son función directa de la calidad de los insumos que desafortunadamente aunque limitados son los que están disponibles.

Tabla 2. Distribución por clases del coeficiente de infiltración/lluvia para el suelo de conservación en el año 2010.

Delegación	Álvaro Obregón		Cuajimalpa de Morelos		Gustavo A. M.		Iztapalapa		Magdalena Contreras		Milpa Alta		Tiáhuac		Tlalpan		Xochimilco*	
	HA	%	HA	%	HA	%	HA	%	HA	%	HA	%	HA	%	HA	%	HA	%
Muy Baja	425.9	12.3	513.8	9.6	ND	ND	351.6	38.9	254	5.1	1,235.10	4.3	1,946.30	38.3	1,552.80	6.0	1,070.90	15.9
Baja	2,510.70	72.2	2,931.90	54.8	ND	ND	138.6	15.3	1,990.60	39.8	6,496.20	22.8	1,649.30	32.5	9,784.40	37.6	1,065.20	15.8
Media	537.7	15.5	1,703.60	31.8	ND	ND	69.9	7.7	2,398.70	48.0	11,276.40	39.6	53.3	1.0	10,995.30	42.2	1,261.90	18.7
Alta	1.5	0.04	203.8	3.8	ND	ND	319.5	35.3	323.1	6.5	6,859.20	24.1	853.6	16.8	2,351.50	9.0	1,876.10	27.8
Muy alta	0.2	0.01	0.1	0.002	ND	ND	24.5	2.7	31.1	0.6	2,631.80	9.2	574.5	11.3	1,359.10	5.2	1,478.50	21.9
Total	3,476.0	100.0	5,353.2	100.0	ND	ND	904.1	100	4,997.5	100	28,498.7	100	5,077.0	100	26,043.1	100	6,752.6	100

* ND, información no disponible; para Xochimilco solo se genero información para la zona sur

Tabla 3. Distribución de clases por delegación del coeficiente de infiltración/lluvia para el suelo de conservación en el año 2010.

Delegación	Clase		Superficie Del.		Sup_I/SC*		Muy Baja		Baja		Media		Alta		Muy alta	
	HA	%	HA	%	HA	%	HA	%	HA	%	HA	%	HA	%	HA	%
Álvaro Obregón	1,992	2.3	3,476.0	4.3	425.9	5.8	2,510.7	9.5	537.7	1.9	1.5	0.0	0.2	0.003		
Cuajimalpa de M.	5,764	6.6	5,353.2	6.6	513.8	7.0	2,931.9	11.0	1,703.6	6.0	203.8	1.6	0.1	0.002		
Gustavo A. M.	1,230	1.4	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND		
Iztapalapa	1,138	1.3	904.4	1.1	351.6	4.8	138.6	0.5	69.9	0.2	319.5	2.5	24.5	0.4		
Magdalena C.	6,207	7.1	4,997.5	6.1	254.0	3.5	1,990.6	7.5	2,398.7	8.5	323.1	2.5	31.1	0.5		
Milpa Alta	28,213	32.3	28,498.6	35.0	1,235.1	16.8	6,496.2	24.5	11,276.4	39.9	6,859.2	53.6	2,631.8	43.1		
Tiáhuac	6,500	7.4	5,327.8	6.5	1,946.3	26.5	1,649.3	6.2	53.3	0.2	853.6	6.7	574.5	9.4		
Tlalpan	25,971	29.7	26,043.1	32.0	1,552.8	21.1	9,784.4	36.8	10,995.3	38.9	2,351.5	18.4	1,359.1	22.3		
Xochimilco	10,393	11.9	6,752.5	8.3	1,070.9	14.6	1,065.2	4.0	1,261.9	4.5	1,876.1	14.7	1,478.5	24.2		
Total	87,412	100.0	81,353.1	93.1	7350.4	8.4	26566.9	30.4	28296.8	32.4	12788.3	14.6	6099.8	7.0		

*Sup_I/SC es la superficie total del suelo de conservación para la que se genero información; ND, información no disponible; para Xochimilco solo se genero información para la zona sur

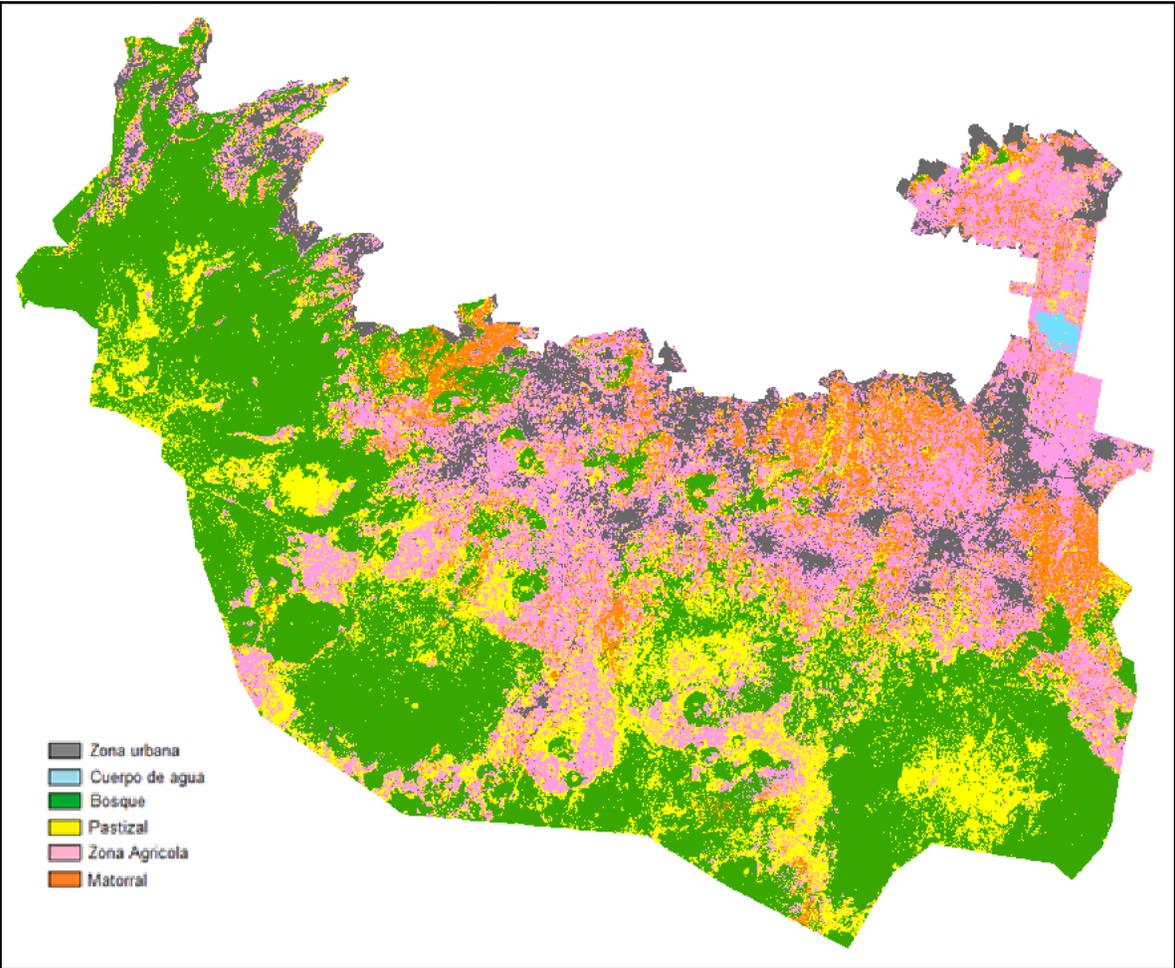
VALIDACION DEL MAPA DE APTITUD A INFILTRACION 2010

A la metodología utilizada para generar el mapa de aptitud a infiltración 2010 se le hizo una modificación para la obtención de la cobertura, que consta en la clasificación de la misma imagen de satélite 2010 (Landsat5) usando como fuente base de información la capa de Uso de Suelo de 2005, proporcionada por PAOT, para la obtención de los puntos de entrenamiento, mismos que se verificaron sobre la imagen. Los resultados obtenidos de la clasificación son: Average accuracy = 84.80%, Overall accuracy = 91.25% y Kappa coefficient = 0.86 (mapa 3). La cobertura obtenida se comparo con la anterior (mapa 4). Mediante el modulo de Scatter Plot del programa PCI se hizo un análisis comparativo entre mapas de clasificación de cobertura terrestre y se obtuvo un coeficiente de correlación entre ambas de 0.86. El principal cambio o modificación entre capas es el número de categorías utilizadas para cada caso (tabla 4). La inclusión de una nueva categoría (matorral) permitió obtener zonas más definidas de las zonas urbanas y disminuyo la confusión entre el pastizal y la agricultura.

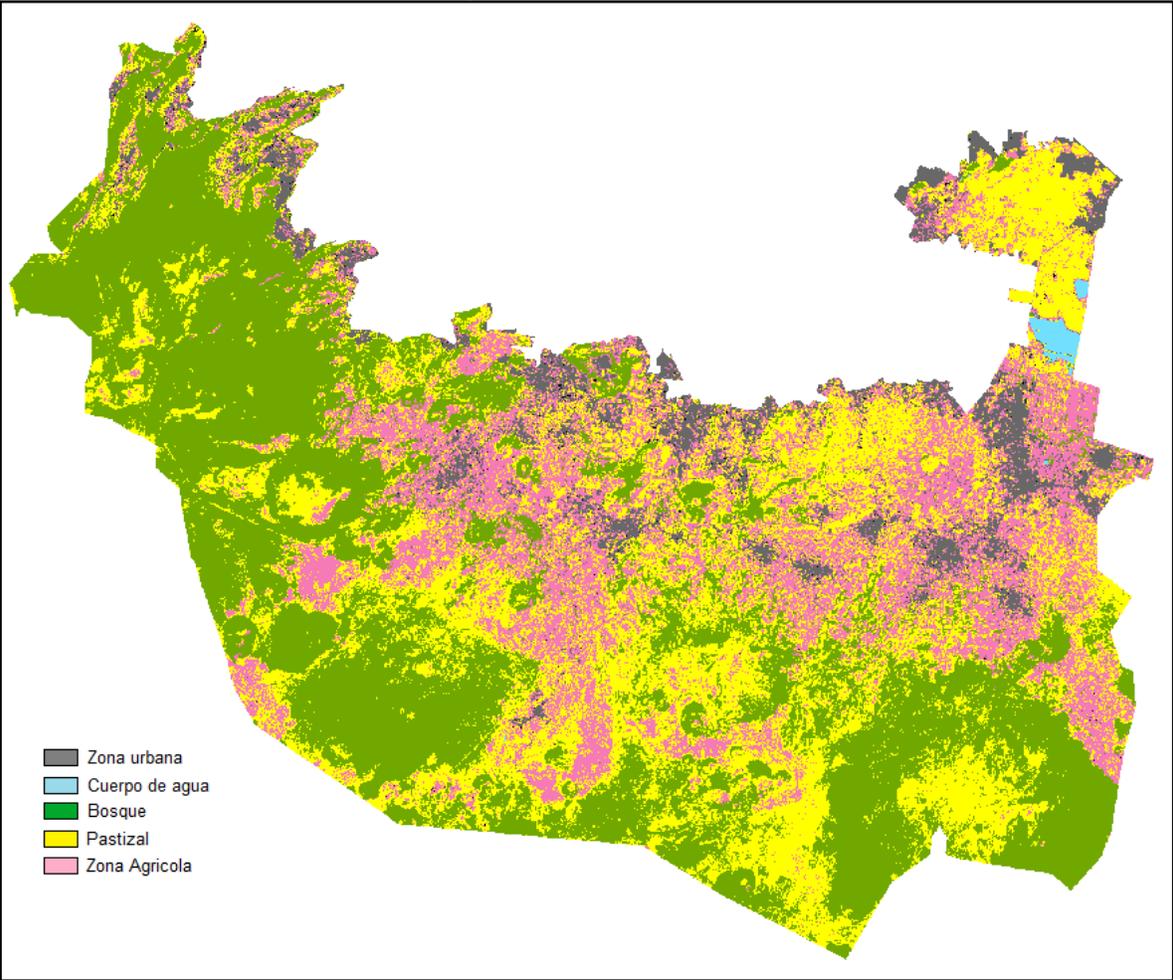
Tabla 4. Coberturas utilizadas para la clasificación de la imagen satelital Landsat5, usando diferentes fuentes de información para la obtención de puntos de entrenamiento.

Coberturas	Uso de suelo INEGI	Uso de suelo PAOT
Zona urbana	X	X
Cuerpos de agua	X	X
Bosque	X	X
Pastizal	X	X
Zona agrícola	X	X
Matorral		X

Mapa 3. Capa de cobertura terrestre del año 2010 generada a partir de la información de la capa de uso de suelo 2005, proporcionada por PAOT.



Mapa 4. Capa de cobertura terrestre del año 2010 generada a partir de la información de la capa de uso de suelo y vegetación INEGI III



Corolario

Al comparar los estadísticos del mapa de coeficiente de infiltración/ lluvia para ambos casos (Tabla 5 y 6) se obtuvieron desviaciones poco significativas, si se ponderan con la variable de superficie; y si se considera que se trata de una caracterización cualitativa más general (es decir, comparación entre clases y no pixel por pixel).

En general, la modificación realizada valida los resultados obtenidos; y nos permite contar con un ejercicio con una ampliación en las categorías del mapa de coeficiente de infiltración lluvia; misma que no afecta los resultados..

Por lo anterior, este ejercicio de validación sirve para sustentar los resultados y nos indica que no es necesario ajustar la cartografía, mucho menos ajustar los procesos de regionalización vía áreas de captación, y de la zonificación de áreas de mayor valor ambiental.

Tabla 5. Estadísticos del mapa de coeficiente de infiltración/lluvia de 2010, usando como base la capa de uso de suelo Serie III de INEGI, para la clasificación de cobertura terrestre.

Clase	Superficie		Sup_I*/SC		Muy Baja		Baja		Media		Alta		Muy alta	
	HA	%	HA	%	HA	%	HA	%	HA	%	HA	%	HA	%
Álvaro Obregón	1,992	2.3	3,476.0	4.0	425.9	0.5	2,510.7	2.9	537.7	0.6	1.5	0.002	0.2	0.0002
Coyoacán	4	0.005	*ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Cuajimalpa de M.	5,764	6.6	5,353.2	6.1	513.8	0.6	2,931.9	3.4	1,703.6	1.9	203.8	0.2	0.1	0.0001
Gustavo A. M	1,230	1.4	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Iztapalapa	1,138	1.3	904.4	1.0	351.6	0.4	138.6	0.2	69.9	0.1	319.5	0.4	24.5	0.0
Magdalena C.	6,207	7.1	4,997.5	5.7	254.0	0.3	1,990.6	2.3	2,398.7	2.7	323.1	0.4	31.1	0.0
Milpa Alta	28,213	32.3	28,498.6	32.6	1,235.1	1.4	6,496.2	7.4	11,276.4	12.9	6,859.2	7.8	2,631.8	3.0
Tláhuac	6,500	7.4	26,043.1	29.8	1,552.8	1.8	9,784.4	11.2	10,995.3	12.6	2,351.5	2.7	1,359.1	1.6
Tlalpan	25,971	29.7	5,327.8	6.1	1,946.3	2.2	1,649.5	1.9	53.3	0.1	853.6	1.0	574.5	0.7
Xochimilco**	10,393	11.9	6,752.5	7.7	1,070.9	1.2	1,065.2	1.2	1,261.9	1.4	1,876.1	2.1	1,478.5	1.7
Total	87,412	100.0	81,353.2	93.1	7350.4	8.4	26,567.2	30.4	28,296.8	32.4	12,788.2	14.6	6,099.8	7.0

Tabla 6. Estadísticos del mapa de coeficiente de infiltración/lluvia de 2010, usando como base la capa de Uso de suelo 2005, para la clasificación de cobertura terrestre.

Clase	Superficie		Sup_I*/SC		Muy Baja		Baja		Media		Alta		Muy alta	
	HA	%	HA	%	HA	%	HA	%	HA	%	HA	%	HA	%
Álvaro Obregón	1,992	2.3	3,476.0	4.0	588.5	0.7	2,374.4	2.7	511.3	0.6	1.2	0.001	0.09	0.0001
Coyoacán	4	0.005	*ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Cuajimalpa de M	5,764	6.6	5,353.2	6.1	819.4	0.9	2,710.6	3.1	1,686.2	1.9	135.8	0.2	0.0	0.0
Gustavo A. M	1,230	1.4	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Iztapalapa	1,138	1.3	904.4	1.0	348.3	0.4	275.3	0.3	58.9	0.1	214.8	0.2	5.2	0.01
Magdalena C	6,207	7.1	4,997.5	5.7	326.1	0.4	1,899.5	2.2	2,458.4	2.8	279.9	0.3	33.2	0.04
Milpa Alta	28,213	32.3	28,498.6	32.6	1,557.5	1.8	7,294.1	8.3	10,758.6	12.3	6,355.9	7.3	2,532.3	2.9
Tláhuac	6,500	7.4	26,043.1	29.8	1,962.6	2.2	10,114.5	11.6	10,608.5	12.1	2,282.7	2.6	1,072.4	1.2
Tlalpan	25,971	29.7	5,327.8	6.1	2,613.6	3.0	1,965.4	2.2	25.6	0.0	275.0	0.3	271.4	0.3
Xochimilco**	10,393	11.9	6,752.5	7.7	1,356.2	1.6	1,169.6	1.3	1,444.1	1.7	1,627.6	1.9	1,151.3	1.3
Total	87,412	100.0	81,353.2	93.1	9572.1	11.0	27,803.5	31.8	27,551.5	31.5	11,172.9	12.8	5,065.9	5.8

Sup_I/SC es la superficie total del suelo de conservación para la que se generó información; ND, información no disponible; para Xochimilco solo se generó información para la zona sur.

Estudio: *Evaluación de la vulnerabilidad ambiental que presenta el suelo de conservación por la pérdida de servicios ecosistémicos a consecuencia del cambio de uso de suelo*

INFORME FINAL
SEGUNDA SECCION

Noviembre 30, 2010

PRESENTACIÓN

Con la finalidad de facilitar la visualización del contenido y organización del **Informe Final**, la presentación de esta **segunda sección** comienza con la tabla del Índice de Contenido:

SECCIÓN	ENTREGABLES
Primera sección	Análisis sobre los sitios de mayor aportación de servicios ambientales en términos de almacén de carbono e infiltración Integración de la información colectada en campo, con la ya existente sobre la cuantificación del almacén de carbono e infiltración.
Segunda sección	Diagnóstico general de las condiciones que se presentan en los sitios analizados. Mapa de zonificación de los sitios con mayor aportación de servicios ambientales
Tercera sección	Modelo utilizado para la evaluación del cambio de uso de suelo (selección de variables o categorías) así como la cartografía resultante (imágenes de satélite clasificadas, procesadas). Mapa de zonas con los cambios de uso de suelo más drásticos.
Cuarta sección	Análisis de la vulnerabilidad ambiental que presentan algunas zonas del suelo de conservación en relación a la pérdida de servicios ecosistémicos. Modelo de ponderación de la vulnerabilidad de los sitios. Mapa de vulnerabilidad ambiental del suelo de conservación en relación a la pérdida de servicios ecosistémicos por cambio de uso de suelo.

Respecto al contenido de cada uno de los entregables de esta **Segunda sección**, se tiene que:

Entregable: *Diagnóstico general de las condiciones que se presentan en los sitios analizados*

Este entregable incorpora tres componentes o documentos que ameritan una presentación específica, misma que se da más adelante:

- *Diagnóstico y mapeo de bosques densos y continuos en el periodo de estudio 1986-2010* (para la elaboración de este trabajo se utilizaron los

resultados del proyecto *Modelo digital de pérdida de cubierta forestal para el Suelo de Conservación del Distrito Federal*);

- *Diagnóstico de los Humedales en el Suelo de Conservación;*
- *Utilización de áreas de captación para el diagnóstico general de las condiciones de los sitios analizados, y para la zonificación de los sitios con mayor aportación ambiental.*

Referente a los primeros dos documentos, cabe recordar que en la **Primera Sección** se cuenta con el análisis en materia de carbono almacenado e infiltración; sin embargo, en congruencia con los términos de referencia y con el Modelo de Vulnerabilidad desarrollado conjuntamente, resulta indispensable incorporar al diagnóstico los sitios donde se presenta el servicio ecosistémico denominado *provisión de hábitat* (ver recuadro, su descripción detallada se presenta en el Modelo de Vulnerabilidad, en la Cuarta Sección).

Las tendencias espaciales y temporales de los ecosistemas para proporcionar servicios ecosistémicos dependen de qué tanto es posible mantener la elevada biodiversidad, tanto en número como en tipos de especies.

Un hábitat adecuado fortalece a los ecosistemas, e incluso tienden a verse menos afectados por disturbios, tanto humanos como naturales, y a recuperarse más rápido después de éstos. Mientras mayor sea la riqueza y diversidad del ecosistema, los sistemas biológicos tendrán mayor capacidad de mantener la integridad de sus relaciones básicas (resiliencia). Asimismo, la biodiversidad garantiza la presencia de servicios ecosistémicos fundamentales para el bienestar social y los derechos ambientales de la población.

La destrucción y fragmentación de hábitat son procesos fatales para la biodiversidad. De hecho, la biodiversidad está amenazada y ya se ha perdido gran parte de ella. Los cambios en los usos del suelo, como la intensificación de la agricultura y la urbanización, la sobreexplotación de recursos naturales, la contaminación, el cambio climático y la introducción de especies que compiten con la flora y fauna autóctonas, son todos ellos causantes de daños a los ecosistemas naturales (Conabio).

Los bosques densos y los humedales resultan ser sitios excepcionales para la provisión de hábitat. Es en estos espacios en donde se localiza la mayor diversidad y el más alto número de especies endémicas.

Por ende, las dos componentes principales para el diagnóstico de la *provisión de hábitat* son las zonas de bosques densos y las zonas de humedales; los análisis respectivos se presentan en documentos separados que forman parte de este primer entregable, es decir, del *Diagnóstico general de las condiciones*

que se presentan en los sitios analizados. Cabe reiterar cómo se denomina estos dos documentos: *Diagnóstico y mapeo de bosques densos y continuos en el periodo de estudio 1986-2010*; y *Diagnóstico de los Humedales en el Suelo de Conservación*.

Respecto al tercer documento de este entregable denominado *Utilización de áreas de captación para el diagnóstico general de las condiciones de los sitios analizados, y para la zonificación de los sitios con mayor aportación ambiental*; su importancia y alcances responde a que una vertiente central del proceso de diagnóstico es la utilización de una regionalización basada en áreas de captación. En este documento se presentan sus elementos metodológicos, de su aplicación y de análisis para el Suelo de Conservación.

Cabe destacar que esta regionalización permite que el diagnóstico enriquezca sustancialmente el enfoque de servicios ecosistémicos, y por ende, es el enlace entre el proceso de diagnóstico y el segundo entregable de esta sección.

Entregable: *Mapa de zonificación de los sitios con mayor aportación de servicios ambientales.*

Este segundo rubro (entregable) consta de

- *Esquema metodológico y análisis de resultados de la zonificación de los sitios con mayor aportación de servicios ambientales (en formato power point);*
- *Mapas resultantes de zonificación de los sitios con mayor aportación de servicios ambientales: por almacén de carbono, por infiltración, por provisión de hábitat y mapa síntesis que incorpora los tres servicios (en impreso y digital);*
- *Metodología para obtener una zonificación síntesis de los sitios con mayor aportación en servicios ecosistémicos;*

Respecto a la pertinencia de este último documento, se justifica dada la relevancia y complejidad de la zonificación del **mapa síntesis**, ver la tercera fase del *Esquema metodológico (primer documento)*; y contiene una metodología de pertinencia difusa, que incorpora **conocimiento experto**, para obtener una zonificación síntesis de los sitios con mayor aportación en términos de los tres servicios ambientales mencionados.

Estudio: *Evaluación de la vulnerabilidad ambiental que presenta el suelo de conservación por la pérdida de servicios ecosistémicos a consecuencia del cambio de uso de suelo*

INFORME FINAL: SEGUNDA SECCION

Utilización de áreas de captación para el diagnóstico general de las condiciones de los sitios analizados, y para la zonificación de los sitios con mayor aportación ambiental

Noviembre 30, 2010

Introducción

Es necesario determinar las unidades territoriales en las que se van a exponer los resultados obtenidos de zonificación del Suelo de Conservación en función de áreas más conservadas, áreas con cambios más drásticos y ponderación de la vulnerabilidad de áreas relevantes desde una perspectiva de servicios ambientales.

En interacción con PAOT se trabajó en la propuesta del CentroGeo, en cuanto a enriquecer este proceso con la utilización de *áreas de captación*, ya que, la utilización de áreas de captación a un tamaño adecuado para el desarrollo de este trabajo, ofrece diversas ventajas que a continuación se explicitan:

- Son espacios fundamentales de ocurrencia y funcionamiento del ciclo hidrológico, el que a su vez ejerce una influencia directa para posibilitar la existencia de servicios ecosistémicos de interés para este estudio: infiltración, almacenaje de carbono y cobertura forestal;
- Ofrecen un encuadre jerárquico perfecto entre las áreas de captación de diversos tamaños, lo que permiten subir y bajar de escala sin ninguna complicación, agrupando la información de acuerdo al objetivo del estudio o análisis que interese.
- Permiten integrar información de diferentes fuentes y conformar, de esta manera, unidades geográficas comparables, tanto espacial (áreas de captación homogéneas) como temporalmente, ya que ofrecen la virtud de que no se modifican con cambios de uso de suelo.

La propuesta y primeros ejercicios ilustrativos

Como parte fundamental del desarrollo e implementación de un sistema de monitoreo se requiere de la definición de un modelo geográfico que permita la representación de indicadores para diferentes áreas geográficas (Mora et al. 2007).

Las áreas de captación (AC) constituyen una importante opción para regionalizar el territorio, para evaluarlo en función de esa regionalización y para organizar el proceso de toma de decisiones en unidades flexibles y susceptibles de ser analizadas a diferentes escales basadas en la configuración misma del territorio.

Algunos de los requerimientos para la definición de unidades de evaluación son homogeneidad estructural, área de tamaño comparable y significancia funcional (Mora et al. 2007). Estos criterios son perfectamente cubiertos al segmentar un territorio por ACs.

El encuadre jerárquico perfecto entre las áreas de captación de diversos tamaños permite análisis que pueden ser efectuados a escalas diversas sin ninguna complicación mayor, agrupando la información de acuerdo al objetivo del estudio o análisis que interese.

Otra característica importante de la segmentación del territorio mediante AC es que las variables geográficas de interés pueden ser mapeadas en forma homogénea y los patrones mostrados por tal mapeo constituyen también una evaluación a nivel de paisaje para la región completa.

El análisis de la heterogeneidad espacial permite a los tomadores de decisiones identificar zonas en peligro o tendencias específicas de cambio en las variables de interés.

La importancia de utilizar AC para fines de monitoreo y de gestión del territorio en el proyecto que nos ocupa radica en que son los espacios fundamentales de ocurrencia y funcionamiento del ciclo hidrológico, el que a su vez ejerce una influencia directa para posibilitar la prestación de los servicios ambientales que interesan: Infiltración, almacenaje de carbono, cobertura forestal y biodiversidad.

Las AC pueden ser extraídas de la estructura topográfica al definir los patrones de conectividad hidrológica superficial a partir de modelos de elevación digital (DEMs)

de acuerdo a procedimientos como el planteado por Jenson & Domínguez (1988). Es conveniente definir en forma conjunta con PAOT el tamaño promedio de las AC que parezca adecuado para la gestión y para el monitoreo.

Para este efecto se presentan las siguientes ilustraciones que incluyen diferentes tamaños promedio de las AC y visualizaciones de algunas capas que refieren a los servicios ambientales de interés en el proyecto. En la ilustración 1 se muestran las AC de tamaño promedio de 1 km² y las de 4.5 km² sobre un modelo de elevación sombreado. En el caso de las primeras se trata de 539 unidades y en el otro de 132. Es posible que estos números se reduzcan un poco al realizar algunos ejercicios de edición de las AC (como agregación de AC muy pequeñas con otras de tamaños similar o mayores).

Se considera suficiente iniciar el proceso de definición del tamaño promedio considerando estas capas y si en las discusiones surge la necesidad de incluir otras de mayor o menor tamaño se puede hacer sin complicación alguna.

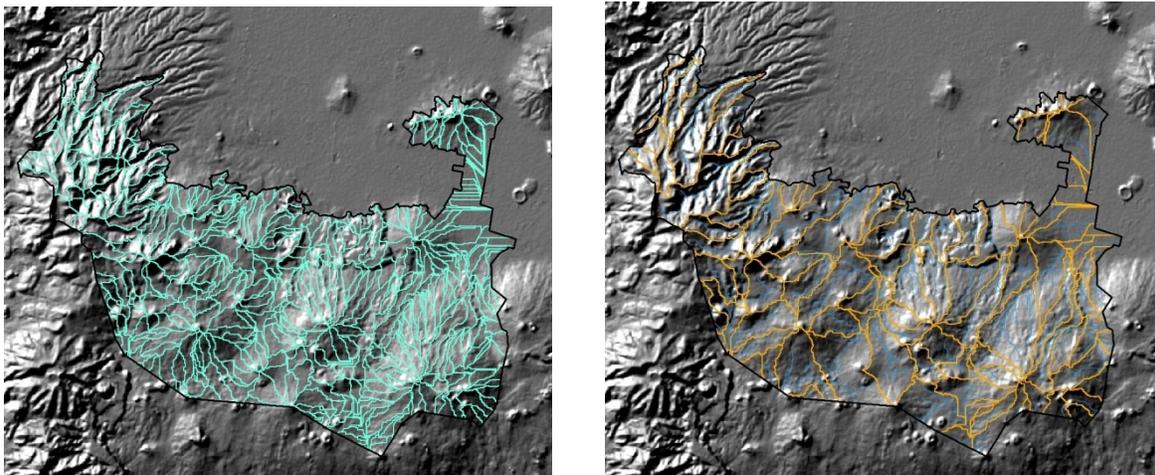


Ilustración 1: Áreas de captación de tamaño promedio de 1 km² (539 unidades, izquierda) y de 4.5 km² (132 unidades, incluye líneas de drenaje, derecha) cortadas con los límites territorio del suelo de conservación (polígono principal situado al sur de la Ciudad)

En la ilustración 2 se despliega una capa con las aptitudes cualitativas a infiltración (versión de finales de diciembre de 2007) por AC de los tamaños mencionados.

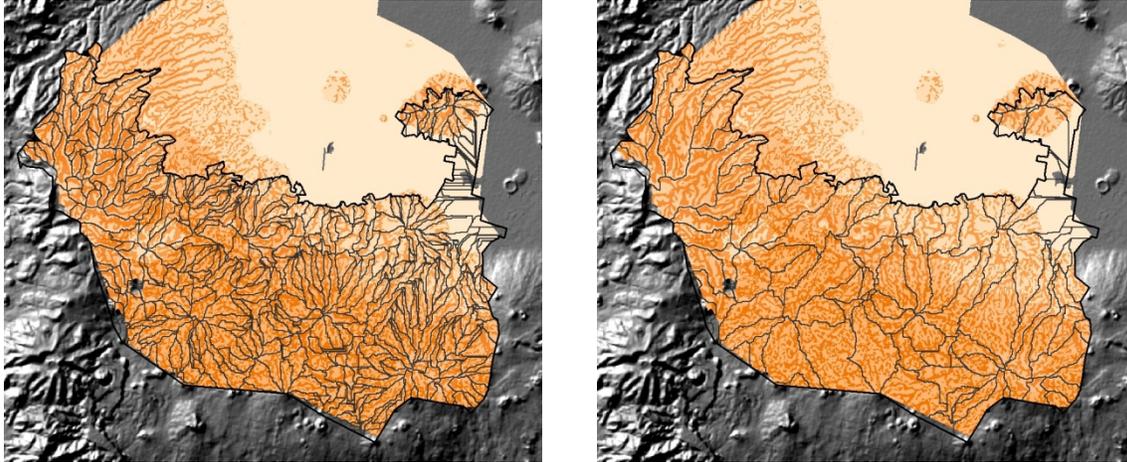


Ilustración 2: Despliegue de grados de aptitud a infiltración (versión de finales 2007) por áreas de captación de tamaño promedio de 1 km² (izquierda) y de 4.5 km² (derecha)

En la ilustración 3 se muestra la capa geográfica de captura de carbono generada (interpolada) por INIFAP a partir de sus mediciones en campo.

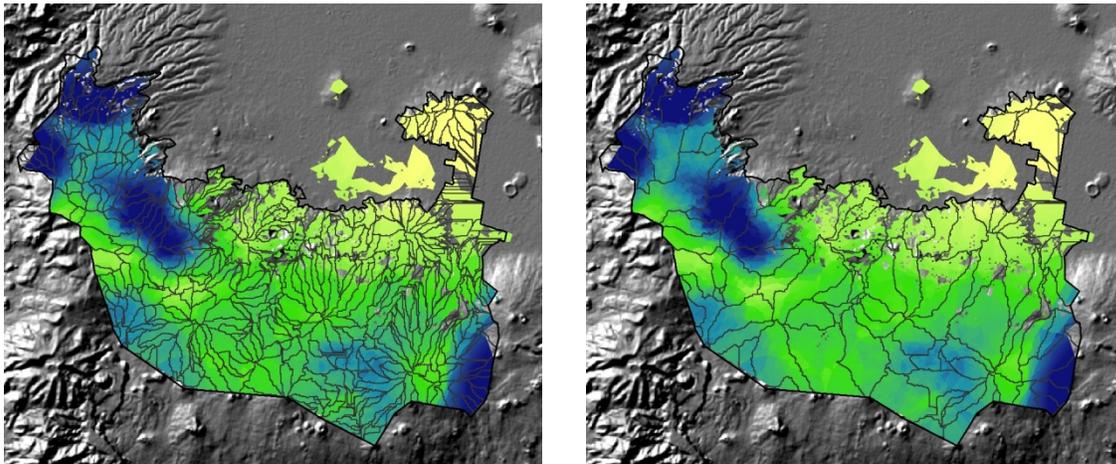


Ilustración 3: Despliegue de información sobre niveles de captura de carbono generada (interpolada) por INIFAP a partir de sus mediciones en campo, sobrepuesta con las áreas de captación de tamaño promedio de 1 km² (izquierda) y de 4.5 km² (derecha)

La ilustración 4 muestra permeabilidad de suelos generada (interpolada) mediante *kriging* ordinarios a partir de mediciones en campo de INIFAP, igualmente sobrepuesta con las áreas de captación.

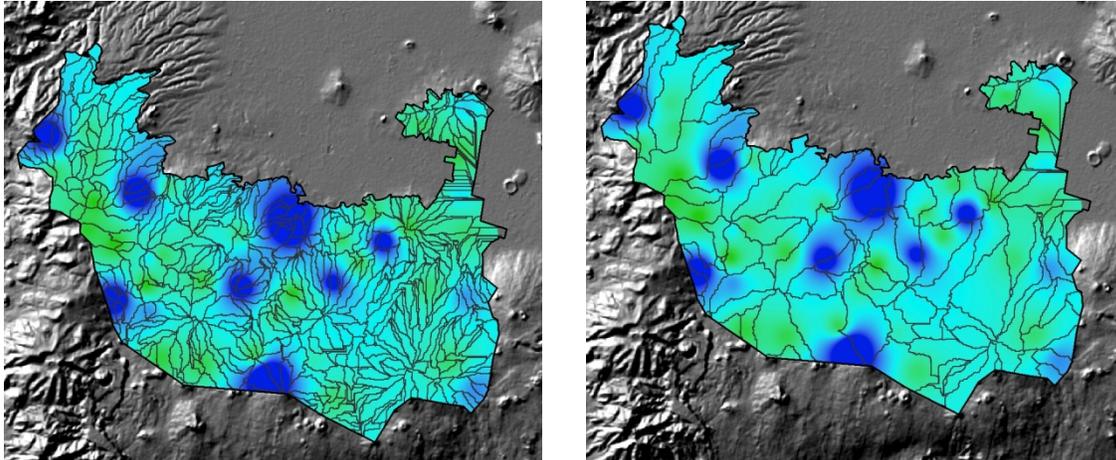


Ilustración 4: Despliegue de información sobre permeabilidad de suelos generada (interpolada) a partir de mediciones en campo de INIFAP, sobrepuesta con las áreas de captación de tamaño promedio de 1 km² (izquierda) y de 4.5 km² (derecha)

Con base en el análisis de estas ilustraciones se enriqueció la discusión para definir los tamaños de las AC adecuados para efecto de gestión y monitoreo del territorio de los servicios ambientales que el suelo de conservación ofrece a la población de la ciudad.

Estudio: *Evaluación de la vulnerabilidad ambiental que presenta el suelo de conservación por la pérdida de servicios ecosistémicos a consecuencia del cambio de uso de suelo*

INFORME FINAL: SEGUNDA SECCION

Metodología para obtener una zonificación síntesis de los sitios con mayor aportación en servicios ecosistémicos

Noviembre 30, 2010

INTRODUCCIÓN

A partir del cálculo y la estimación de servicios ambientales asociados al Suelo de conservación del Distrito Federal, se propone una clasificación para la definición e identificación de Zonas de Alto Valor Ambiental (ZAVA), las cuales representan la síntesis de las variables evaluadas para la prestación de servicios ambientales o ecosistémicos.

METODOLOGÍA

A partir de los resultados del **modelo digital de pérdida de cubierta forestal** para el Suelo de Conservación del Distrito Federal y la metodología para la **definición e identificación de bosques densos y continuos** y los resultados dentro de este mismo proyecto acerca de Infiltración y captura de Carbono, Se plantea un ejercicio de zonificación dentro de un entorno de análisis espacial para identificar zonas de alto valor ambiental en el Suelo de Conservación del Distrito Federal. A partir del mapeo de variables biofísicas que aportan servicios ambientales (cubierta forestal, captura de carbono e infiltración) se identifican sitios de valor ambiental, considerando su pertinencia difusa (conocimiento experto) para la generación de cartografía.

Por razones de manejo adecuado para la gestión, el ejercicio se planteo a partir de la regionalización de áreas de captación pluvial (ACP), regiones contiguas jerárquicas y anidadas de los patrones superficiales del escurrimiento. Las cuales se plantearon como pertinentes para dicho propósito. Para fines de ubicar las ACP adecuadas para la gestión, se obtuvieron diferentes regionalizaciones a diferentes tamaños, optando por definir rangos que variaran de entre 1 y 5 km².

Optando finalmente, para la realización del ejercicio a áreas de captación pluvial con un tamaño promedio de 1 km² (Figura 1). Dichas zonas se acercan a los requerimientos de gestión mencionados por la PAOT, por lo que se consideran

espacios adecuados sobre los cuales llevar a cabo el ejercicio de análisis espacial que conlleve a la definición e identificación de zonas de alto valor ambiental.

Recursos de información

Se emplean para llevar a cabo el ejercicio de definición e identificación de ZAVA, insumos correspondientes a infiltración, captura de carbono y cubierta forestal, expresada como bosques densos y continuos a los cuales se anexaron las zonas de humedales, con la idea de expresar disponibilidad de hábitat (figuras 2-4).

Es importante mencionar que este último proceso se lleva a cabo hasta que los valores de los tres servicios evaluados, son expresados por ACP. Este procedimiento se realiza mediante la implementación de operaciones zonales, las cuales permiten asignar a regiones predefinidas, los estadísticos de una variable continua. Por lo cual es posible expresar por unidad de área de captación pluvial, el promedio de las tres variables evaluadas en el ejercicio. Lo que permite la manipulación de los servicios ambientales por unidades homogéneas. Garantizando con ello una regionalización más eficiente de las mismas. Para llevar a cabo dicha operación, se emplearon los tres insumos definidos anterior mente y las áreas de captación pluvial con un tamaño promedio de 1 km². Esta operación permitió la obtención de servicios ambientales categorizados e rangos y expresados por unidades homogéneas continuas. Lo que permite por un lado, obtener valores para todo el paisaje del Suelo de Conservación y por otro una categorización congruente con el análisis.

Los resultados de este procedimiento se muestran en las Figuras 5-7, las cuales expresan servicios ambientales por unidad de área de captación pluvial.

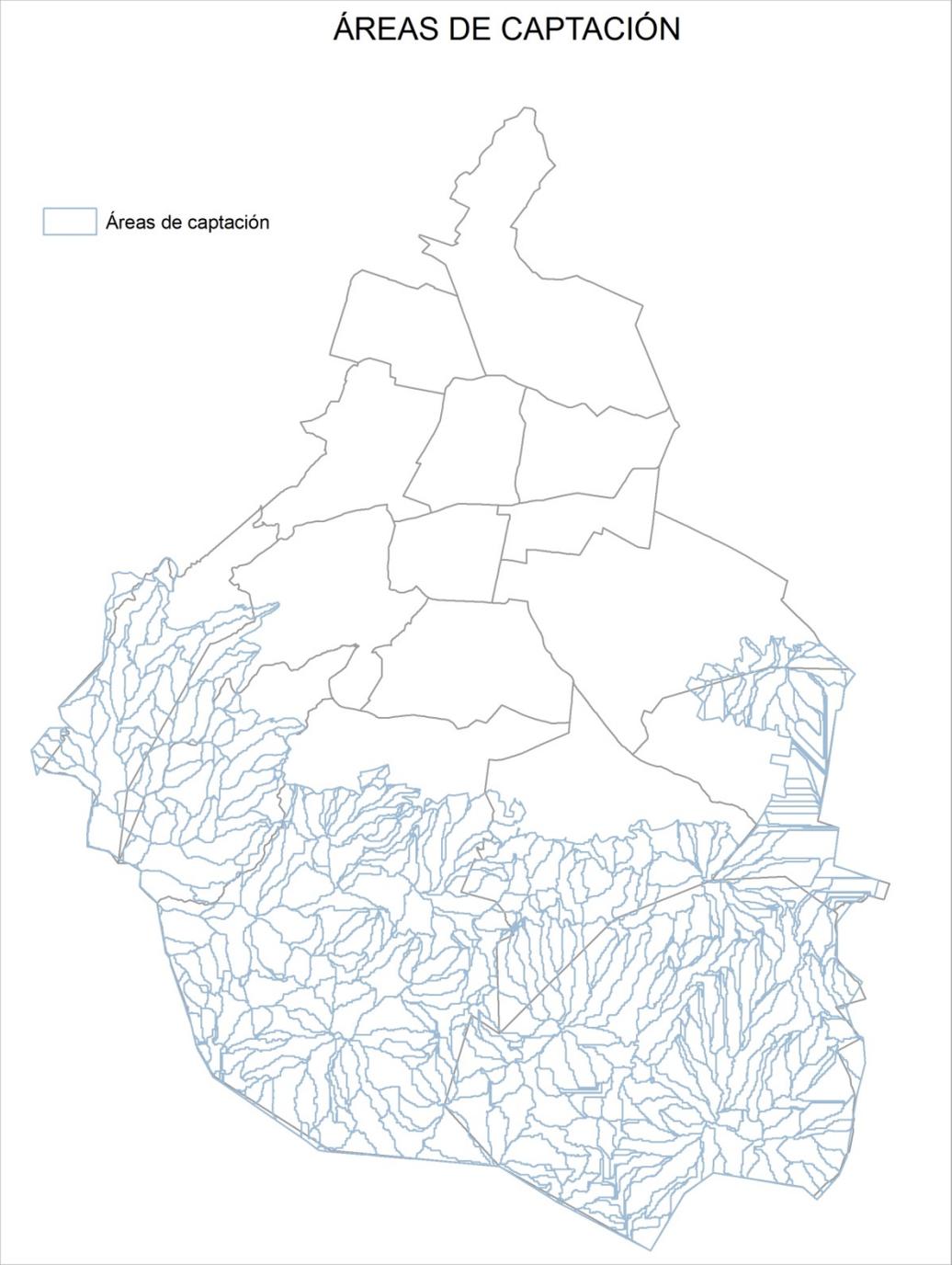


Figura 1. Áreas de Captación Pluvial con tamaño promedio de 1 km²

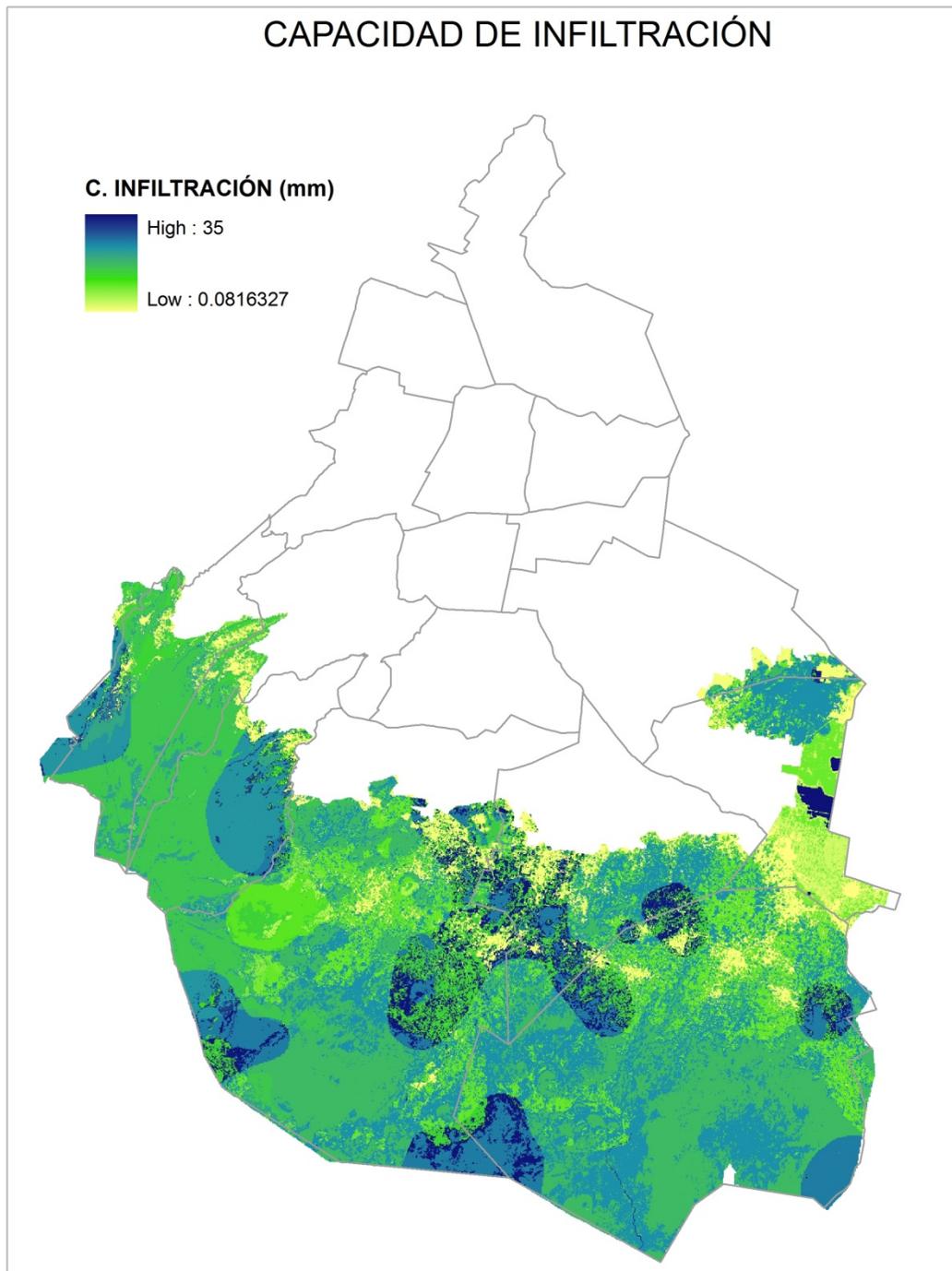


Figura 2. Zonas de infiltración para el Suelo de Conservación

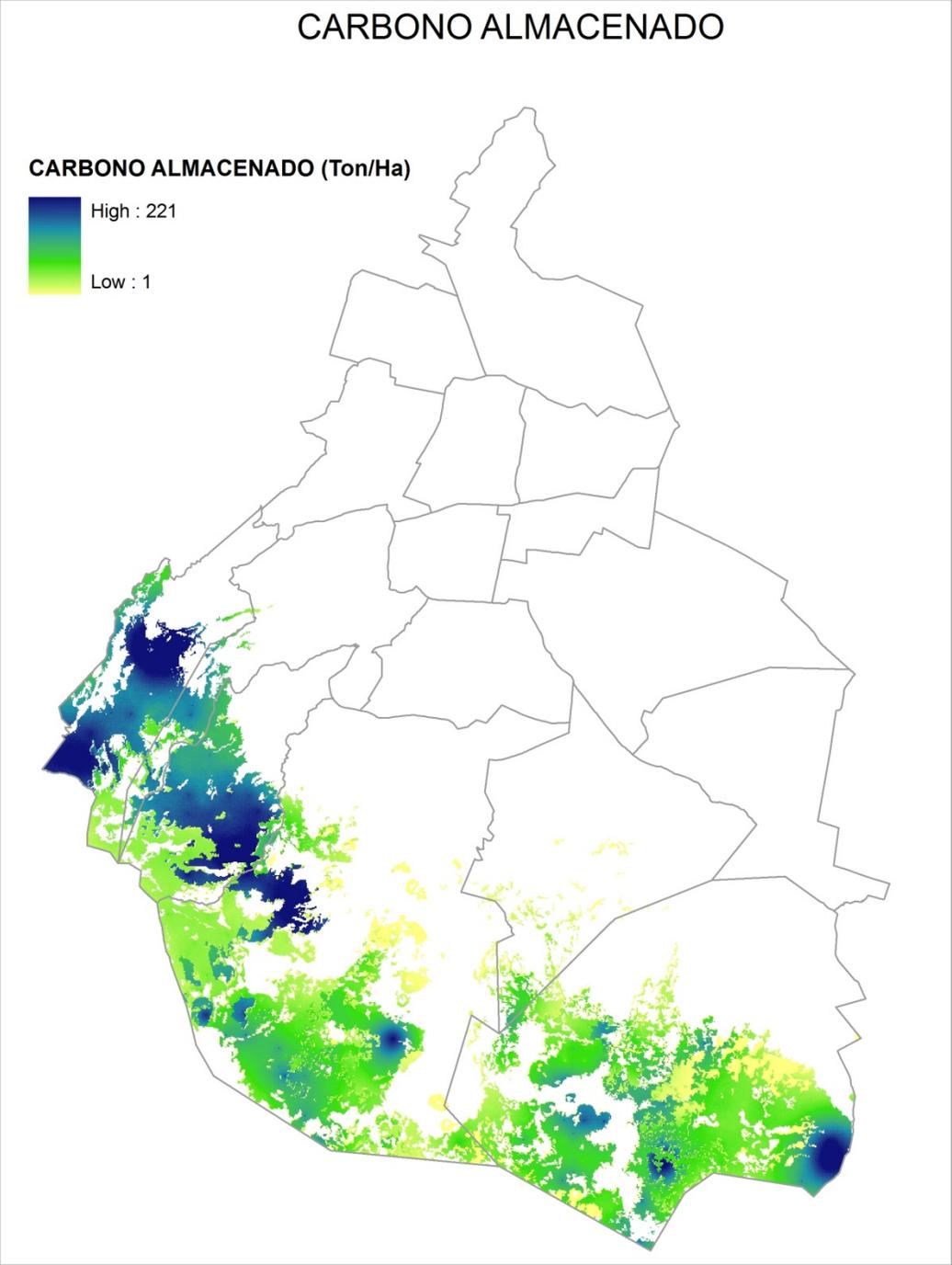


Figura 3. Carbono almacenado para el Suelo de Conservación

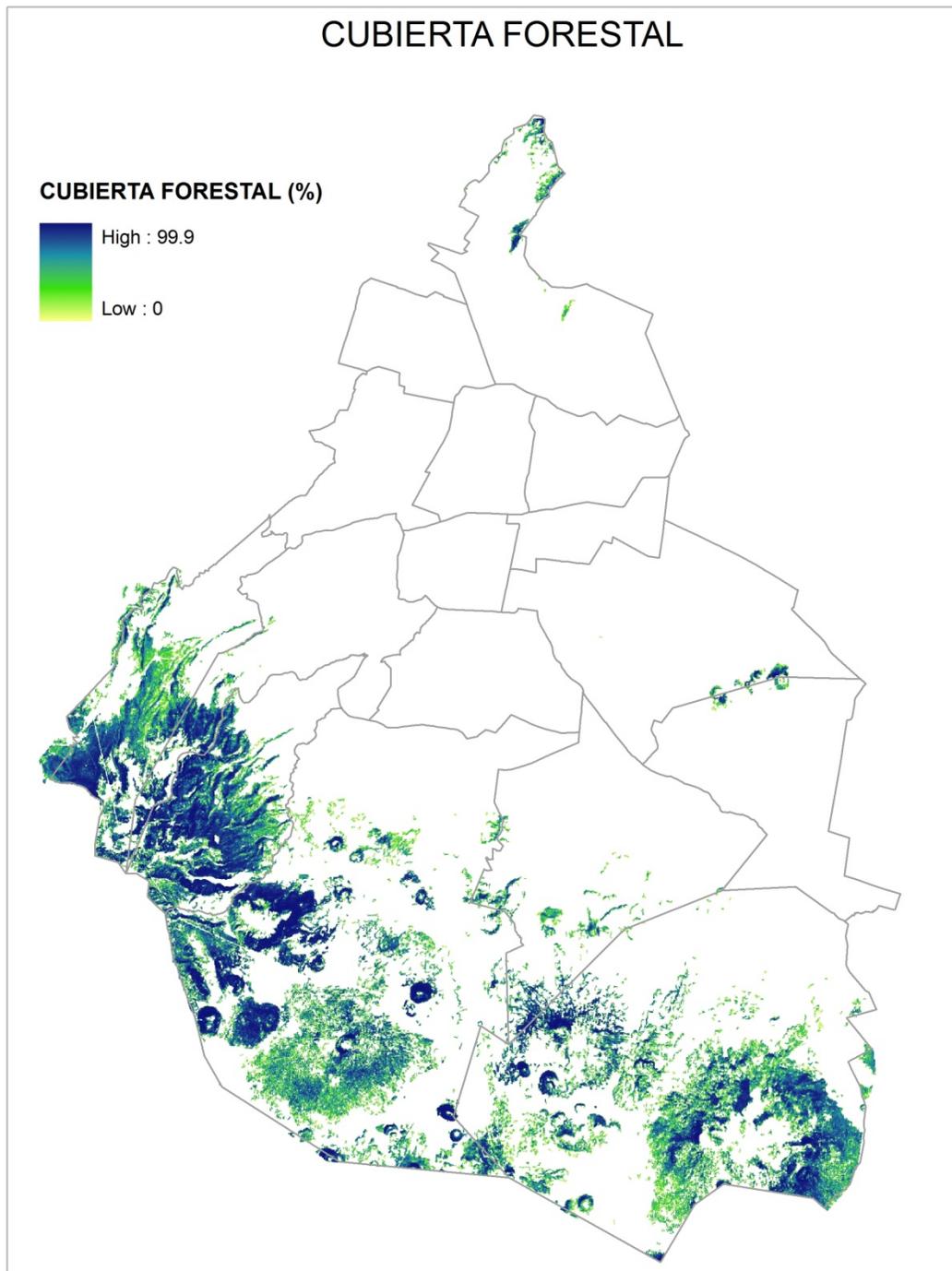


Figura 4. Cubierta forestal para el Suelo de Conservación

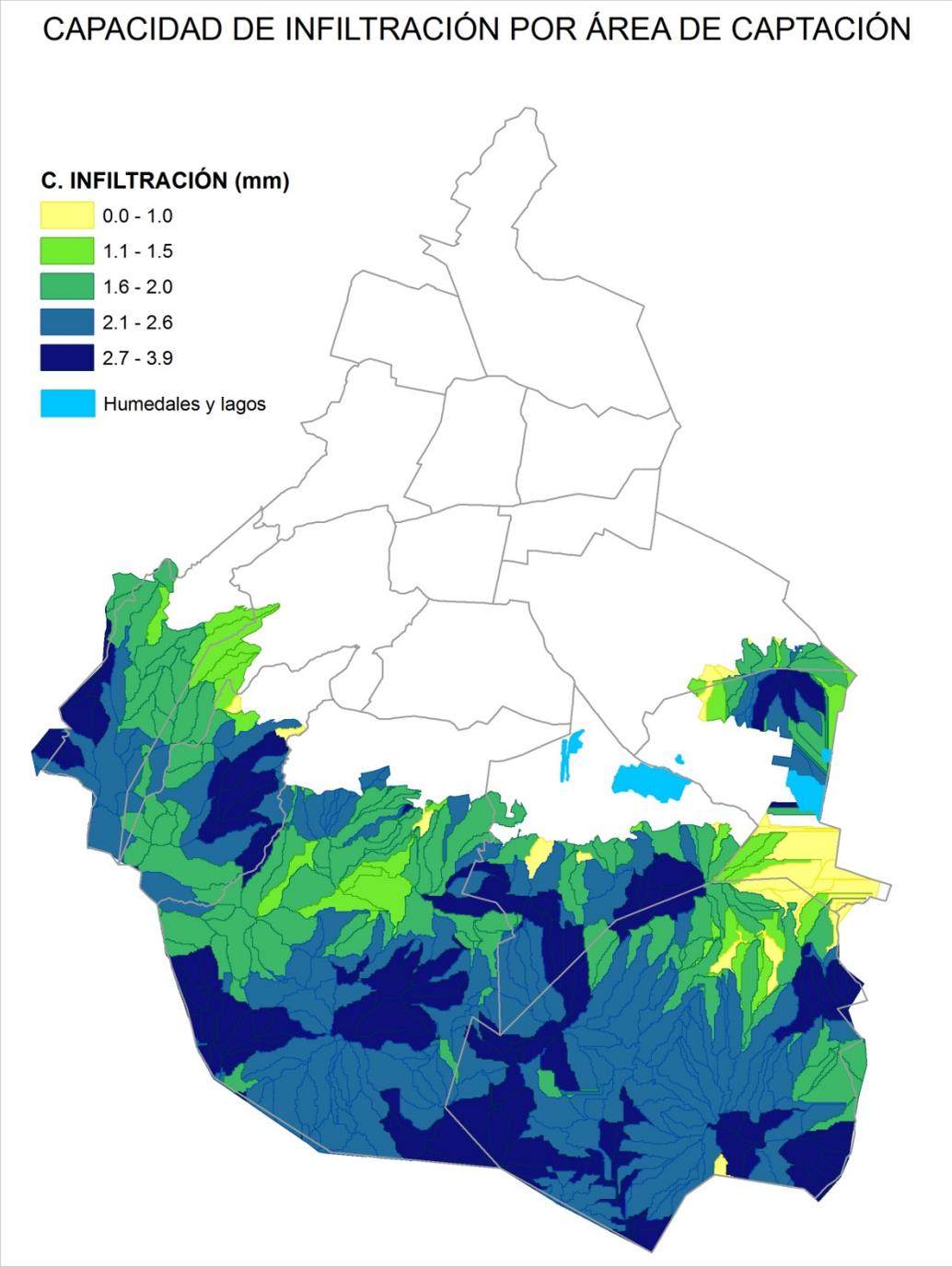


Figura 5. Zonas de infiltración por ACP para el Suelo de Conservación

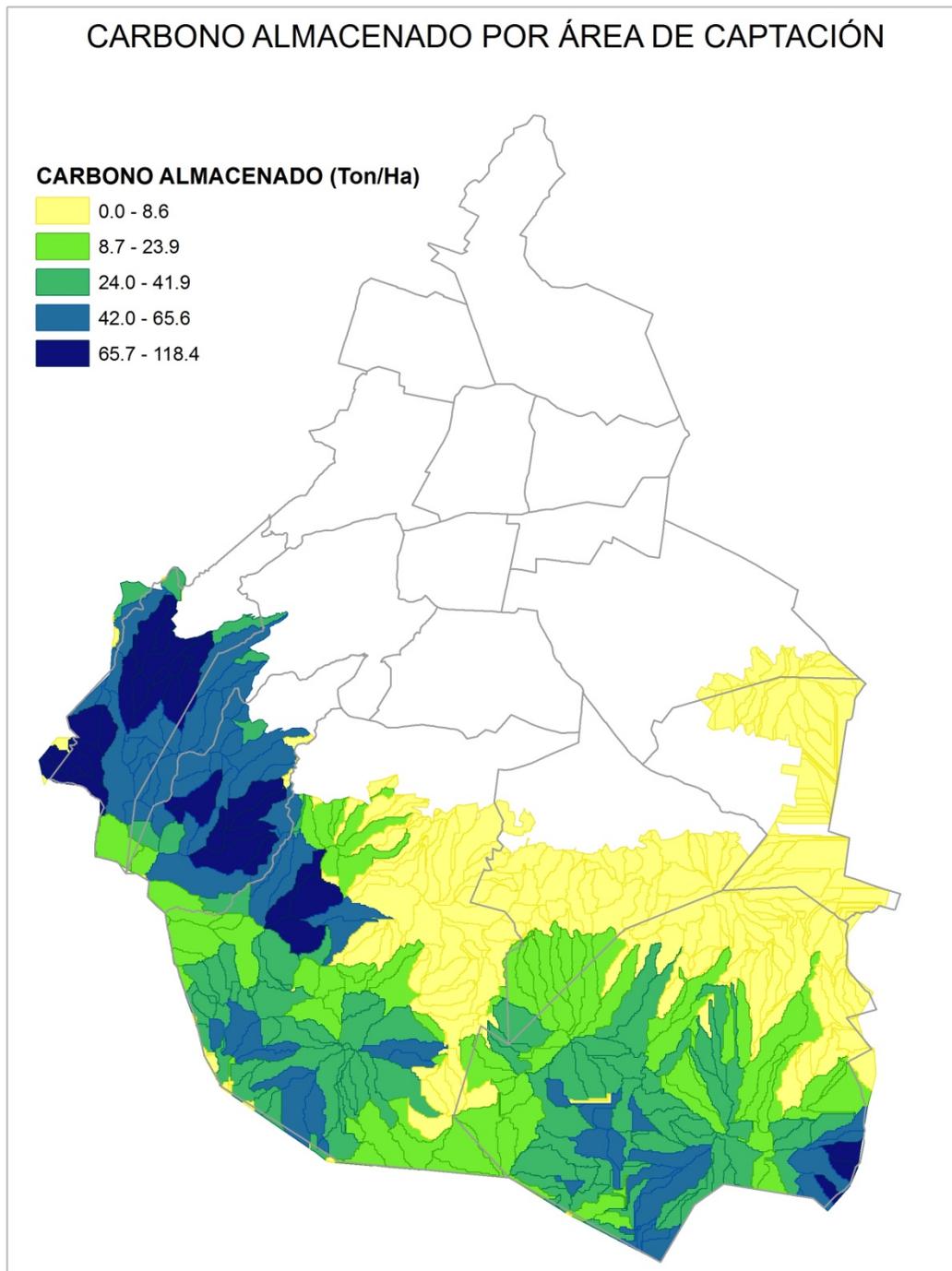


Figura 6. Carbono almacenado por ACP para el Suelo de Conservación

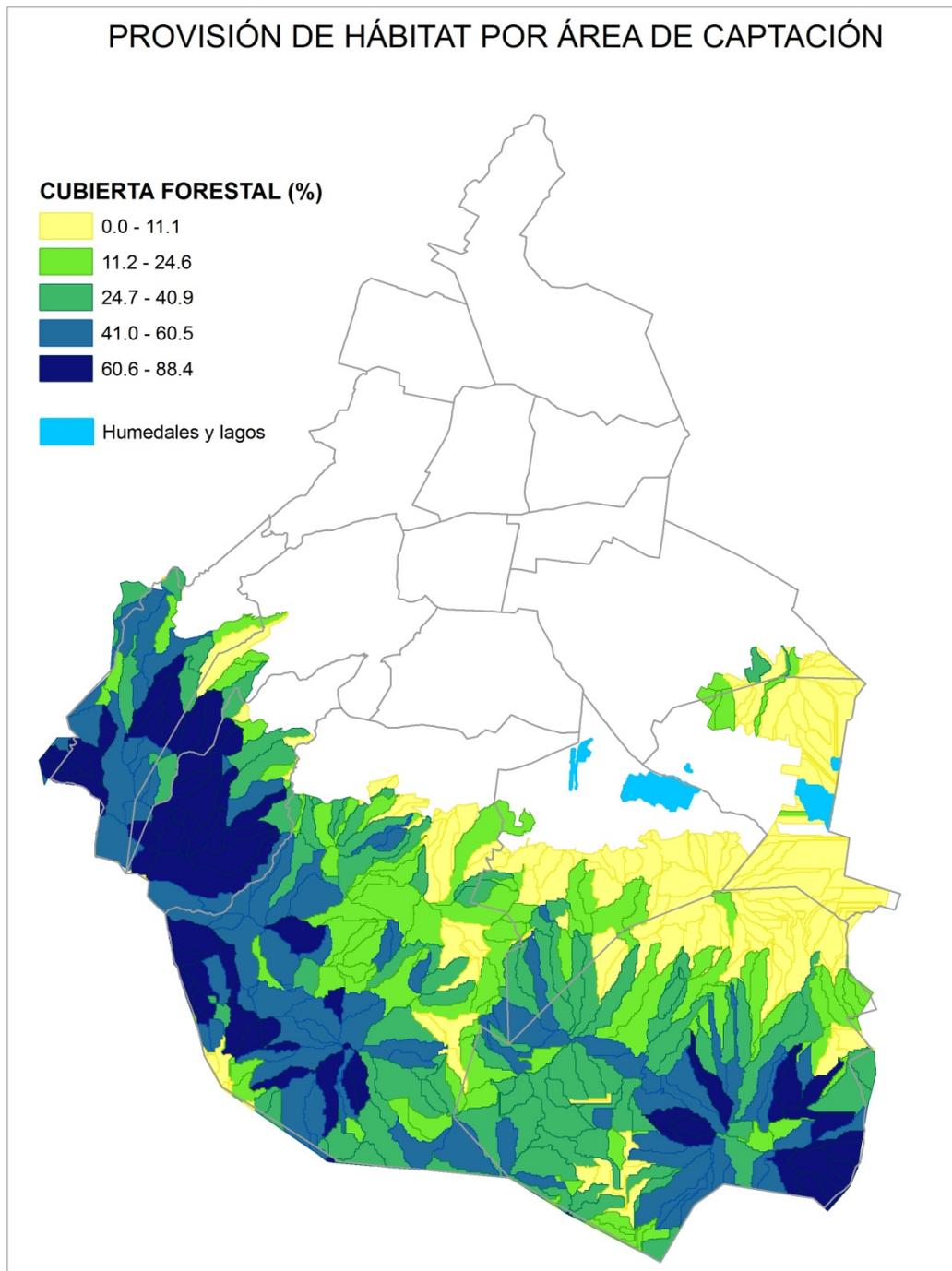


Figura 7. Cubierta forestal por ACP para el Suelo de Conservación

Una vez generados los servicios ambientales por unidades de ACP, se procedió a buscar normalizar los valores en términos de la construcción de una función de pertinencia difusa, la cual permite construir una función continua para cada una de las variables (Figura 8).

Figura 8. Pertinencia difusa

A partir de la construcción de las funciones de pertinencia difusa y basados en el conocimiento de expertos de cada uno de los servicios ambientales (hacedores de la información, referencias bibliográficas o criterios establecidos a priori). Con esta etapa elaborada, se procede a construir una matriz tridimensional, que permite expresar las diferentes regiones de valor ambiental que se expresan de acuerdo con los parámetros establecidos (Figura 9)

Figura 9. Construcción de matriz tridimensional

Para la construcción de la matriz, se emplean por rangos cualitativos (conocimiento de expertos) las variables normalizadas de cubierta forestal, carbono e infiltración. A partir de ello y de los resultados dentro de la matriz, se obtienen zonas de valor ambiental, categorizadas en cuatro rangos. Zonas de bajo valor ambiental, zonas de valor medio y zonas de alto y muy alto valor ambiental. Las cuales en conjunto corresponden a las zonas de alto valor ambiental.

RESULTADOS

De acuerdo con los resultados obtenidos, las zonas de alto y muy alto valor ambiental corresponden a áreas presentes en todas las delegaciones en suelo de conservación a excepción de la delegación Tláhuac. Sin embargo las zonas de muy alto valor ambiental se concentran principalmente en las delegaciones Magdalena Contreras y Cuajimalpa; aunque también se encuentran presentes en las delegaciones de Tlalpan, Milpa Alta y Álvaro Obregón.

Puede observarse que a nivel del paisaje las zonas de alto y muy alto valor ambiental se distribuyen al poniente y sur del Suelo de Conservación, lo que se asocia a zonas altas por arriba de los 2800 msnm.

Finalmente, mencionar que las zonas de alto valor ambiental, corresponden a unidades de áreas de captación pluvial en las que están presentes por lo menos un alto valor de servicio ambiental asociado a valores medios de otros servicios. Mientras que las zonas de muy alto valor ambiental corresponden a la presencia de dos o más valores altos de servicios ambientales. De tal manera que en el ejercicio siempre se identifique como zonas de alto y muy alto valor ambiental, unidades en las que confluyan dos o más servicios ambientales presentes, que signifiquen un diferencia sustancial con respecto de otras áreas que aunque brindan un servicio ambiental.

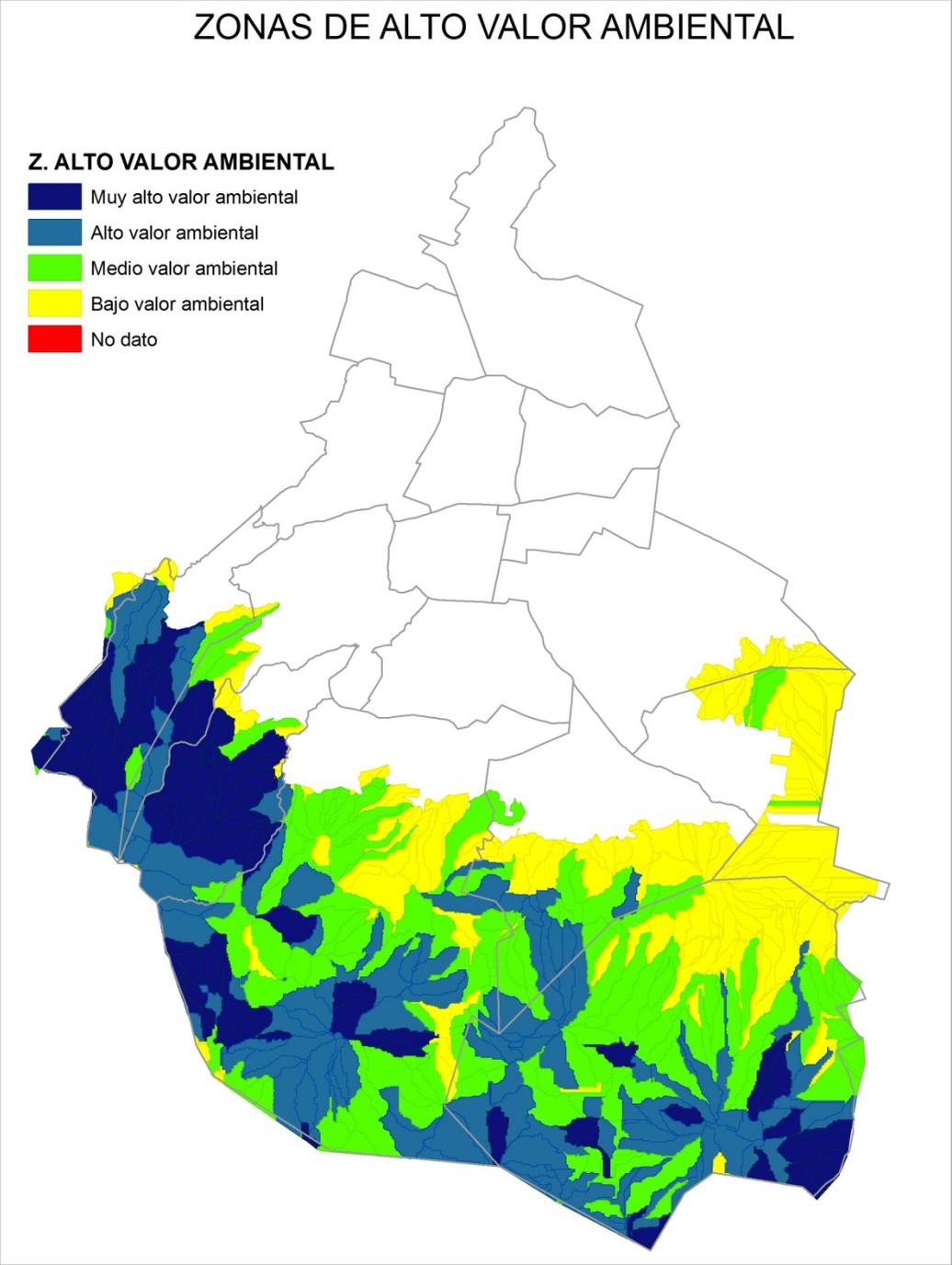


Figura 10. Zonas de alto y muy alto valor ambiental para Suelo de Conservación

Estudio: Evaluación de la vulnerabilidad ambiental que presenta el suelo de conservación por la pérdida de servicios ecosistémicos a consecuencia del cambio de uso de suelo

INFORME FINAL: SEGUNDA SECCION

Diagnóstico y mapeo de bosques densos y continuos en el periodo de estudio 1986-2010

Noviembre 12, 2010

PRESENTACIÓN

La estimación continua y sistemática de la cubierta forestal, es empleada para la definición e identificación de sitios más conservados del Suelo de Conservación del Distrito Federal. La presente metodología está basada en la estimación para el periodo de estudio 1986-2010 del Índice de Cubierta Forestal (ICF) mediante la estimación con percepción remota de la variable biofísica “cobertura de copas” la cual permite caracterizar y conocer la dinámica de la cubierta forestal en un área definida. A partir de ello, se definen e identifican los sitios más conservados del Suelo de Conservación del Distrito Federal como aquellos sitios con cubierta forestal promedio densa y continua a lo largo de todo el periodo de estudio.

Esta definición de sitios más conservados, hace referencia a las zonas de bosque que a lo largo de un periodo de tiempo de alrededor de 25 años, se han conservado como sitios continuos de una alta densidad arbórea, lo que garantiza su calidad en términos de disponibilidad de hábitat y calidad en los servicios ecosistémicos que brinda. Los sitios así identificados en este ejercicio a través de la metodología planteada, son caracterizados en términos de la cantidad de bosque que representan con respecto de cada uno de los años contemplados dentro del periodo de estudio; así como de los valores de tendencia que muestran a lo largo del mismo.

INTRODUCCIÓN

El suelo del Distrito Federal se divide, para fines prácticos, en urbano y de conservación. Cada categoría depende de los usos productivos del suelo y las actividades de la población, así como los de carácter administrativo que determinan la línea limítrofe entre el área de desarrollo urbano y el área de conservación ecológica.

La dimensión de la superficie del suelo de conservación es de 88,442 ha, misma que constituye poco más del 59 % de la superficie total del Distrito Federal, limitando al norte, este y oeste con el Estado de México y al sur con Morelos. Lo compone principalmente el área rural del Distrito Federal en su región sur y surponiente; localizado en las delegaciones de Alvaro Obregón, Cuajimalpa, Iztapalapa, Magdalena Contreras, Milpa Alta, Tláhuac, Tlalpan y Xochimilco, y una pequeña área al norte de la Ciudad de México, en la delegación Gustavo A. Madero.

La pérdida de la cubierta natural ocasionada por el crecimiento urbano, la expansión agrícola, la extracción de suelo y minerales, la tala clandestina y los incendios forestales constituyen los principales problemas en la zona rural del Distrito Federal. Situación que pone en riesgo una variada gama de servicios ambientales, ya que los bosques protegen el suelo contra la erosión, propician el mantenimiento de su fertilidad, garantizan el volumen y la calidad del agua captada, preservan la biodiversidad y propician la estabilidad climática a niveles local y regional. La manera en que la dinámica de la cubierta forestal contribuye a todos estos servicios ambientales apenas empieza a entenderse por lo que resulta de interés conocer las zonas más conservadas en términos de estos y otros servicios

La Figura 1 muestra un modelo simplificado que ilustra la dinámica de los cambios forestales. Tiene solo dos clases: bosques y todas las demás tierras. Una reducción de la cubierta forestal puede operarse por dos procesos distintos. La deforestación, con mucho el más importante, implica que el bosque es talado por acción humana y la tierra es destinada a otro uso, como agricultura o infraestructuras. Catástrofes naturales pueden también destruir los bosques, y cuando la zona no puede regenerarse naturalmente y no se hace nada para plantar de nuevo en ella, pasa también a la categoría de otras tierras.

Un aumento en la cobertura puede también ocurrir de dos maneras: por forestación, o sea plantación de árboles en tierras que no eran forestales, o por expansión natural de los bosques, por ejemplo en tierras agrícolas abandonadas, lo que es muy frecuente en algunos países europeos. Cuando una parte del bosque es talada pero se vuelve a plantar (reforestación), o cuando el bosque se repone por sí solo en un plazo relativamente corto (regeneración natural), no hay cambios en el área de bosque.

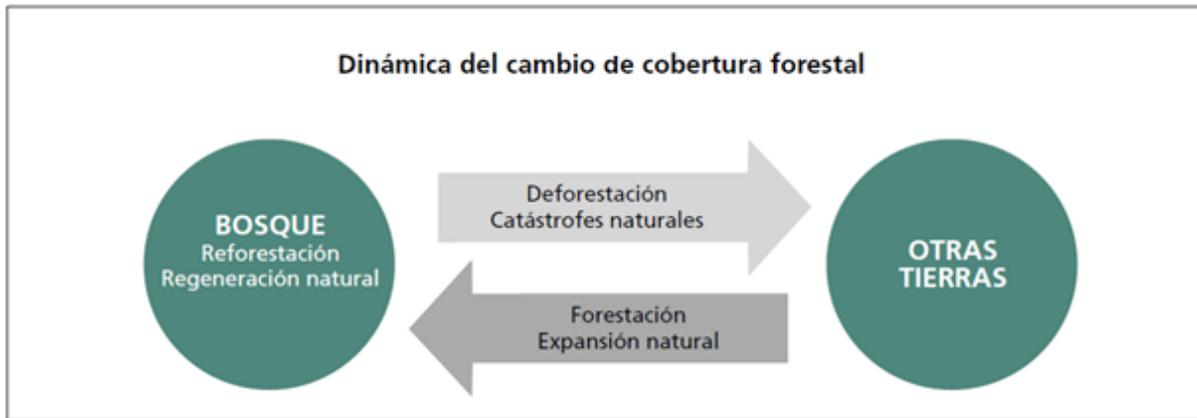


Figura 1. Esquema de la dinámica en el cambio de la cubierta forestal

De estas áreas que se mantienen como bosque, se pueden identificar aquellas catalogadas como zonas boscosas densas que durante un largo periodo de tiempo han permanecido como tal, garantizando con ello que la calidad de los servicios ambientales que brinda también se mantenga constante a lo largo del mismo. Estas dos características de densidad y continuidad permiten bajo una aproximación metodológica la definición e identificación de sitios conservados en términos ecosistémicos.

De acuerdo con el Programa de Gestión y Administración de los Recursos Naturales del Distrito Federal, elaborado por la UNAM para la Secretaría del Medio Ambiente, las áreas deforestadas equivalen al 7 % de la extensión del área rural y se concentran en las delegaciones Álvaro Obregón, Cuajimalpa y Magdalena Contreras. Lo que significa que existe una alta expectativa por identificar por el contrario, aquellos sitios que representan las zonas más conservadas del Suelo de Conservación del Distrito Federal

METODOLOGÍA

A partir de los resultados del **modelo digital de pérdida de cubierta forestal** para el Suelo de Conservación del Distrito Federal, se analizan los patrones del Índice de Cubierta Forestal (ICF) para definir a lo largo del periodo de estudio 1986-2010 las masas forestales continuas con una densidad arbórea alta ($ICF > 70\%$) para con ello determinar las masas forestales densas y continuas, entendidas como los sitios más conservados del Suelo de Conservación del Distrito Federal.

El Índice de Cubierta Forestal está basado en la estimación mediante percepción remota de la variable biofísica cobertura de copas, la cual permite definir cubierta

forestal en términos de aquellas zonas cuyo porcentaje de la superficie de terreno cubierta por la proyección vertical arbórea varía ascendientemente a partir de entre el 10 y el 20%, sobre una extensión mínima de una hectárea y que en promedio los individuos ahí presentes en ese arreglo, tienen una altura promedio de mínimo 5 metros *in situ*.

Esta definición aplica a vegetación arbórea fotosintéticamente activa en la época de evaluación (puede incluir una fracción mínima de arbustos o árboles pequeños). Integra además la mayoría de los diversos tipos de bosque presentes en el sitio, sin diferenciar el tipo de uso de la cobertura (p. e. plantaciones forestales o áreas bajo manejo, etc.) ni a la condición estacional (vegetación perenne o caducifolia) o sucesional (diferenciación entre vegetación primaria o secundaria).

De la misma manera y de acuerdo con Brack (1999) la cubierta forestal, puede agruparse de acuerdo con varios rangos, que permiten su clasificación en masas boscosas de abiertas a densas (Tabla 1)

CLASES	RANGOS
Muy escaso	1-9
Escaso	10-29
Bajo	30-49
Medio	50-69
Denso	70-84
Muy denso	85-100

Tabla 1. Clases y rangos para el establecimiento cubierta forestal

Acorde a lo anterior, y considerando a la cobertura de copas como variable biofísica adecuada sobre la cual se hará la estimación de la cubierta forestal continua durante el periodo de estudio en valores de masas forestales densas y muy densas se definen e identifican los sitios más conservados del Suelo de Conservación del Distrito Federal

Recursos de información

El recurso de información para la definición e identificación de los sitios más conservados del Suelo de Conservación del Distrito Federal es la colección de resultados del **modelo digital de pérdida de cubierta forestal** obtenido a partir de imágenes satelitales de los sensores *Landsat TM* y *Landsat ETM+* y *SPOT HRG*. De esta manera se conforma una serie de 8 productos cartográficos de cubierta forestal para diferentes fechas que conforman el periodo de estudio comprendido entre 1986

y 2010, con un aproximado de separación entre fechas de 3.4 años, lo que representa el insumo de continuidad.

Figura 2. Serie de cubierta forestal para el periodo de estudio 1986-2010

Finalmente se incorpora información de la variable biofísica estimada mediante percepción remota, seleccionando así las zonas de intersección que corresponde a valores del ICF mayores a 70%. Generando con ello un mapa que contienen únicamente aquellas zonas con valores continuos de cubierta forestal, cuyo promedio de ICF es considerado entre denso y muy denso.

RESULTADOS

De acuerdo con las definiciones planteadas y los insumos mencionados, se identifican los sitios más conservados, de donde se puede observar que el porcentaje de bosque denso y continuo para cada año de estudio muestra una disminución neta de 14% (Figura 3)

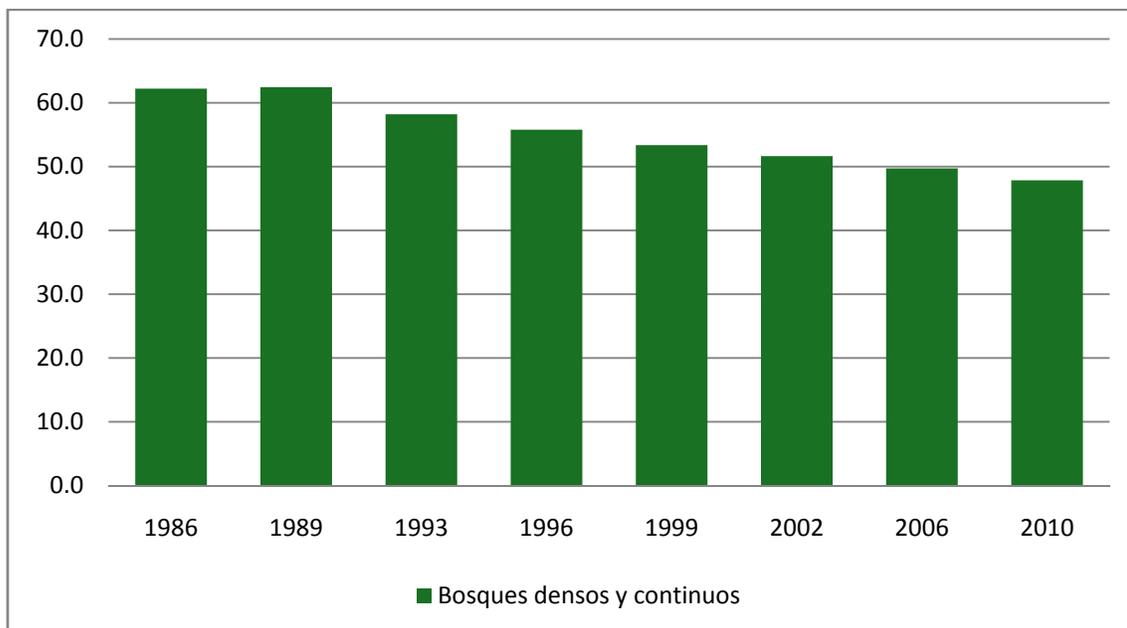


Figura 3. Porcentaje de bosques densos y continuos para el periodo de estudio 1986-2010

La extensión total de los bosques densos y continuos para 2010 es de 14 272 ha, la cual corresponde a 47.9 del total de cubierta forestal identificada para 2010. Estos bosques se encuentran principalmente distribuidos en las delegaciones de Magdalena Contreras, Álvaro Obregón y Cuajimalpa, cuyos valores más altos de ICF se encuentran mayor mente distribuidos ahí precisamente; además de las delegaciones Tlalpan y Milpa Alta con valores del ICF apenas mayores al umbral menor del ICF considerado como denso. Finalmente las delegaciones de Xochimilco, Gustavo A. Madero y Tlahuac, presentan nula o escasa presencia de sitios conservados.

Una de las características observadas más importantes acerca de estos, los sitios más conservados en Suelo de Conservación del Distrito federal, es el hecho de encontrarse situados en promedio a mas de 3 000 msnm lo que de alguna manera les permite ubicarse alejados en mayor medida de perturbaciones antrópicas (Figura 4).

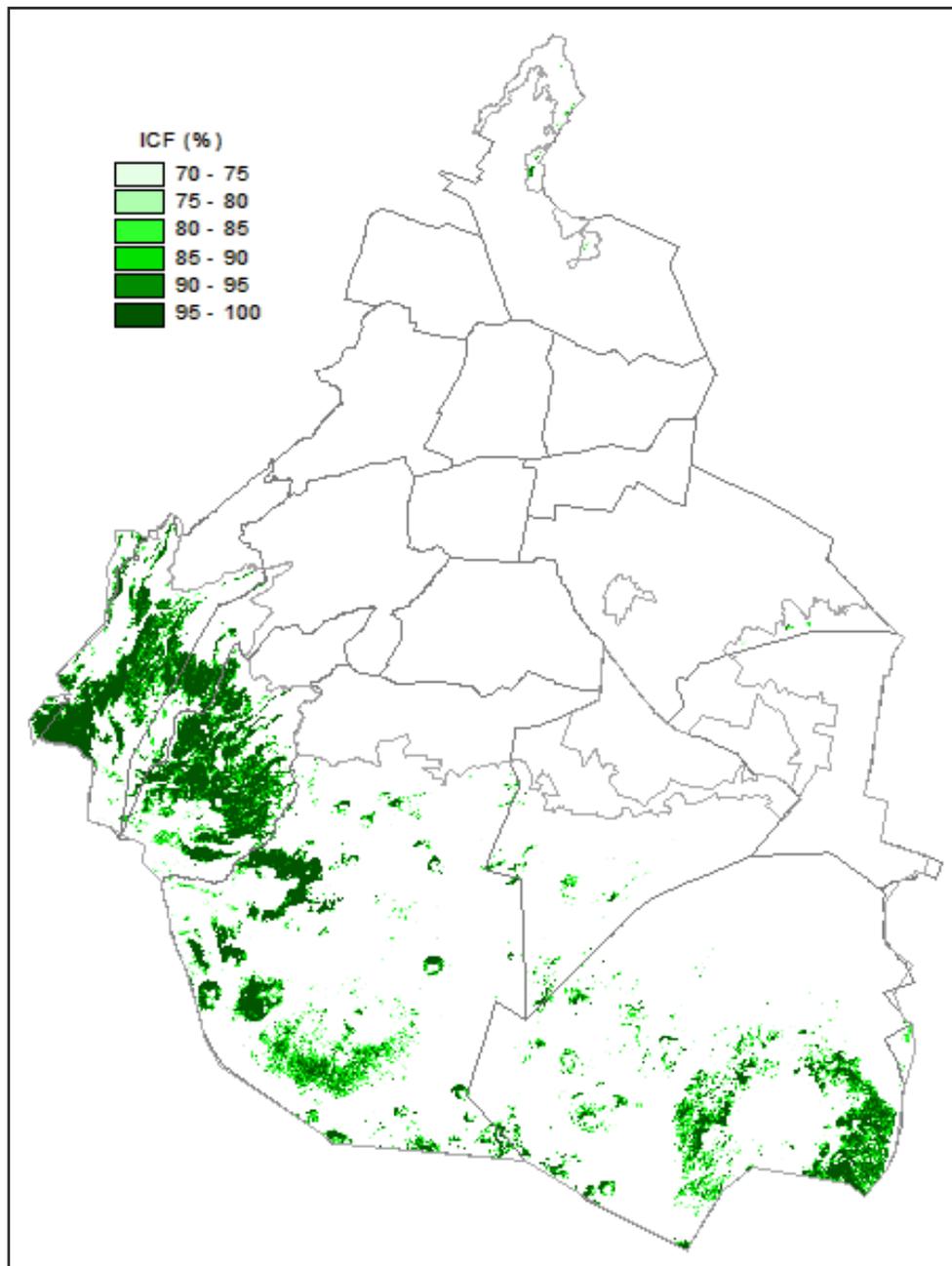


Figura 4. Valores de ICF para bosques densos y continuos de 2010

Estas masa forestales catalogadas como densas y continuas, pueden ser expresadas en términos de su tendencia, lo que otorga un referente, en cuanto el sentido de la pendiente que dichos valores del ICF se observa para todo el periodo de estudio. En donde los valores marcados con un valor de pendiente de entre -1 y 1 corresponden a sitios que mantienen una tendencia estable, mientras que en los extremos se otorgan valores que corresponden a los extremos de tendencias positivas y negativas respectivamente (Figura 5)

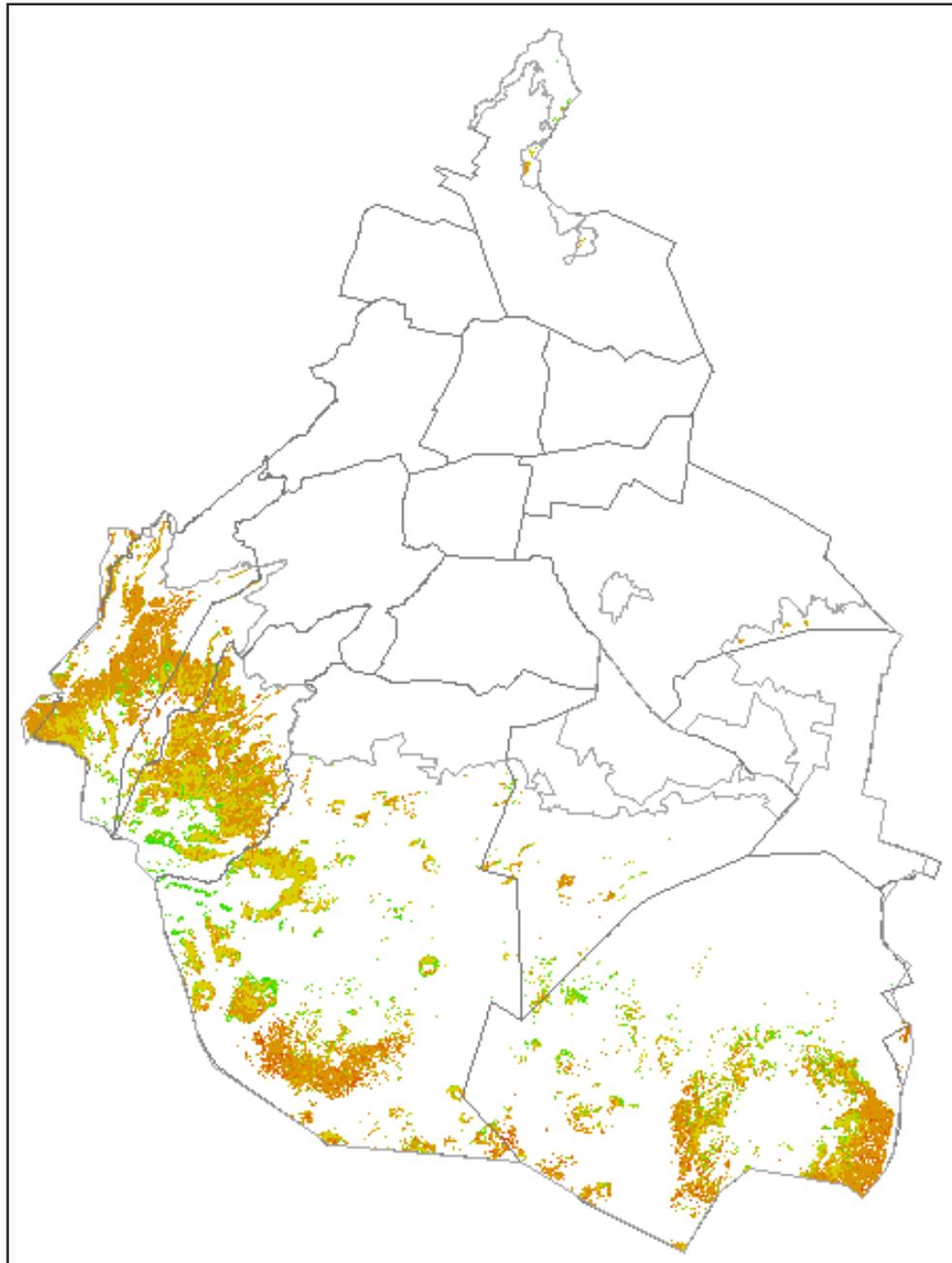


Figura 5. Valores de la tendencia del ICF para bosques densos y continuos de 2010

En donde en tonos rojos, se muestran masas forestales con una tendencia negativa de decaimiento del ICF, mientras que en tonos naranjas y amarillos se muestran tendencias en un rango estable, mientras que en verde se observan tendencias positivas. Estos resultados pueden ser reinterpretados como bosques degradados, estables y en regeneración. Si atendemos a que los valores de la pendiente menores

a -1 son considerados como bosque degradado, el intervalo -1 a 1 son considerados bosque estable y los mayores a 1 son bosque en regeneración. Para el caso de bosques densos y continuos para el Suelo de Conservación del Distrito Federal para el periodo 1986-2010, se observa un valor promedio de pendiente de -0.6166, es decir son masas forestales que corresponden a un bosque estable con tendencia a la degradación. Sin embargo si uno considera la extensión del bosque en clases, se puede observar que el 43.5% de las masas densas y continuas corresponden a bosques degradados; mientras que el 34% corresponden a bosques estables; finalmente solo el 22.5% corresponden a zonas en regeneración.

BIBLIOGRAFÍA

Brack, C. 1999. *Forest, Measurement and Modelling*. Australian National University.

FAO. 2005. Global forest resources assessment 2005. Progress towards sustainable forest management. FAO Forestry Paper 147. Food and Agriculture Organization of the United Nations Rome, 2005.

Programa General de Ordenamiento Ecológico del Distrito Federal. 2000. Gobierno del Distrito Federal. Versión abreviada para difusión.

Estudio: *Evaluación de la vulnerabilidad ambiental que presenta el suelo de conservación por la pérdida de servicios ecosistémicos a consecuencia del cambio de uso de suelo*

INFORME FINAL: SEGUNDA SECCION

**Diagnóstico de los Humedales en el
Suelo de Conservación**

Noviembre 12, 2010



Estas zonas lacustres que se localizan en el suelo de conservación, al sureste del Distrito Federal, en las delegaciones de Tláhuac y Xochimilco, son un humedal permanente,¹ los últimos humedales en el Distrito Federal. Se encuentran en una cuenca cerrada, no existen mareas, ni tiene conexión con agua de mar o con otro cuerpo de agua. Constituyen un ecosistema representativo de la Cuenca de México, remanente del gran lago que la caracterizaba, formado por planicies inundadas naturales y cuerpos de agua inducidos que son un área natural de descarga del flujo subterráneo.

Estos sitios enfrentan severos problemas ambientales y sequías. Actualmente, la presencia de agua en algunos sitios de estos sistemas lacustres, depende de

¹ El Convenio de Ramsar, aprobado en la ciudad iraní de este nombre en el año 1971 establece en sus dos primeros artículos una definición de humedal de ámbito mundial: Artículo 1.1. Se consideran humedales las extensiones de marismas, pantanos, turberas o superficies cubiertas de agua, sean estas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluidas las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda de seis metros. Artículo 2.1. Además podrán comprender zonas de bordes fluviales o de costas adyacentes al humedal, así como las islas o extensiones de agua marina de una profundidad superior a los seis metros en marea baja, cuando se encuentren dentro del humedal. (Ficha técnica de sitios RAMSAR)

la época del año, ya que se crean y desaparecen cuerpos de agua. Asimismo, la profundidad varía considerablemente, en algunos sitios como en los canales y zonas inundadas, donde la profundidad de 60 cm, o el caso de algunas lagunas donde alcanza de los tres a los seis metros.

Durante años, estos ecosistemas han funcionado como proveedores de agua a la Ciudad de México y tienen gran importancia socioeconómica y ambiental debido a los importantes servicios ambientales que prestan.



En términos socioeconómicos, desde tiempos prehispánicos, han sido importantes debido a la realización de actividades agrícolas, mediante la construcción de chinampas, en el caso de Xochimilco, que es una forma de cultivo considerada única en el mundo y la utilización de trajineras como transporte para el comercio regional. Estos ecosistemas tienen un alto valor de recreación, turismo, estético, de paisaje y cultural para la Ciudad de México.

Los servicios ambientales que estos proporcionan son la captación de agua de lluvia y recarga de los mantos acuíferos; la captura de bióxido de carbono por la cubierta vegetal; la fijación de nutrientes en el suelo; de mayor importancia, la preservación de especies y poblaciones silvestres de flora y fauna silvestre endémicas, con estatus de riesgo o migratorias; y la conservación de sitios con un valor estético por su paisaje y valor cultural.

Para el presente estudio, nos interesa resaltar su importancia, en términos de provisión de hábitat para el mantenimiento de la biodiversidad de la Ciudad. Varios de estos hábitats, están determinados por la presencia de los tulares, islas flotantes, que son comunidades vegetales que albergan gran cantidad de especies de flora y fauna acuática y terrestre, algunas de ellas vulnerables y de distribución muy restringida aportando un patrimonio genético importante, además de funcionar como zona de alimentación y reproducción de peces y aves. En este sentido, estos ecosistemas representan uno de los sitios más importantes dentro del Distrito Federal para el refugio de especies de aves

locales y migratorias así como de importantes mamíferos, reptiles e invertebrados. En esta zona, se registran 6 especies endémicas y 20 especies bajo alguna categoría de riesgo según la NOM-059 (SEMARNAT, 2001); 10 Bajo Protección Especial; 8 Amenazadas y dos en Peligro de Extinción².

Debido al deterioro de las áreas naturales y del resto del suelo de conservación en el Distrito Federal, los humedales constituyen un hábitat importante y en ocasiones único para la reproducción de especies residentes y migratorias cuyos únicos registros para el Distrito Federal son en esta zona.

Problemática de los Humedales

Durante los últimos treinta años, el creciente desarrollo urbano ha ocasionado un deterioro ambiental y ecológico en la zona lacustre debido a la modificación drástica del entorno físico realizado por el hombre en esta área. La desecación de los antiguos lagos, el relleno de los mismos y el acelerado proceso de urbanización, manifestado en la ocupación de los ejidos y las chinampas, ha repercutido en el deterioro ecológico del agua, el suelo y la vegetación. Las alteraciones que han transformado el funcionamiento de este sistema lacustre se deben en parte a la extracción excesiva de agua subterránea para satisfacer las necesidades hídricas de la ciudad, el aporte de agua a través de descargas residuales no tratadas y en un alto grado a la ocupación irregular.

La extracción de agua subterránea ha ocasionado respuestas ambientales negativas en el sistema lacustre ya sea por daño o desaparición de algunos manantiales; o durante la temporada de lluvias, provocando un aumento en los niveles de agua y por tanto, del nivel freático, y que, de manera conjunta afectan la navegación en los canales, la permanencia de flora y fauna y a un proceso de hundimiento y fracturamiento del suelo. Asimismo, la mayoría de los canales tanto de Xochimilco como de Tlahuac presentan cierto grado de

² Flora: *Nymphaea mexicana* Ninfa (Amenazada), *Cupressus lusitanica* Cedro blanco (Sujeta a protección especial/ introducida), *Erythrina coralloides* Colorín (Amenazada), Fauna: *Ambystoma mexicanum* Ajolote (Sujeta a protección especial y endémica; Vulnerable (UICN, 2003)), *Ambystoma velasci* Ajolote tigre de meseta (Sujeta a protección especial); *Rana tlaloci* Rana de Tlálóc (Peligro de Extinción y endémica); *Rana montezumae* Rana de Moctezuma (Sujeta a protección especial y endémica); *Phrynosoma orbiculare* Lagartija cornuda de montaña (Amenazada y endémica), *Sceloporus grammicus* Lagartija escamosa de mezquite (Sujeta a protección especial); *Thamnophis eques* Culebra listonada (Amenazada); *Thamnophis scaliger* Culebra listonada de montaña (Amenazada y endémica); *Kinosternon hirtipes* Tortuga casquito (Sujeta a protección especial); *Pituophis deppei* Cincuate (Amenazada y endémica); *Crotalus molossus* Cascabel cola negra (Sujeta a protección especial); *Anas platyrhynchos diaza* Pato mexicano (Amenazada y endémica); *Ardea herodias* Garza morena (Sujeta a protección especial); *Accipiter striatus* Gavilán pecho rojo (Sujeta a protección especial); *Rallus limicola* Rascón limícola (Sujeta a protección especial).

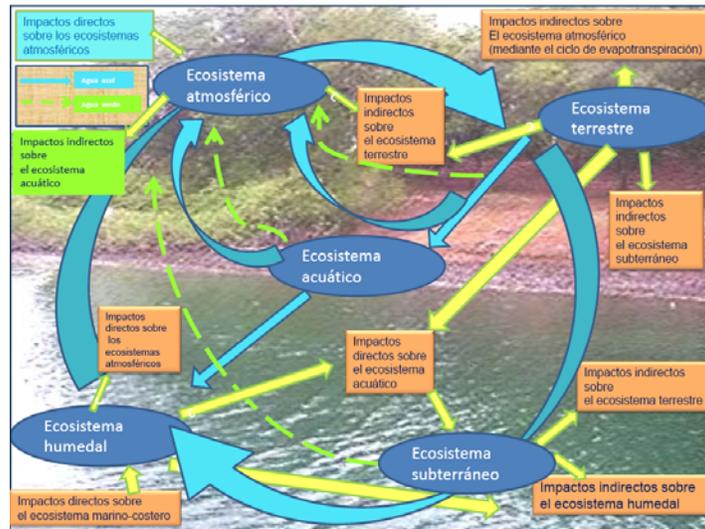
contaminación por la basura depositada, sirviendo de tiradero de desechos sólidos urbanos.



Todo esto, ha traído graves problemas de contaminación e impacto ambiental que atentan contra estos ecosistemas, últimos en el Valle de México.

Adicionalmente a los problemas descritos, se tiene evidencia que se está induciendo flujo de agua contaminada del lago, hacia los pozos de extracción de agua para fines de abasto a la población; lo que está resultando en una fuente de contaminación potencial a los recursos hídricos subterráneos y de riesgo a la comunidad que la usa.

La permanente contaminación en la zona lacustre, además de disminuir la biodiversidad, suscitará insalubridad y afectará severamente el sector turístico, así mismo, la sobreexplotación de agua, que ya genera hundimientos diferenciales, dañará riquezas patrimoniales, como las chinampas y monumentos históricos, y se acelerará el proceso de desecamiento de canales, lo que a su vez se convertirá en una zona susceptible de especulación para urbanizadores.



A continuación se muestran las tendencias actuales de los humedales.

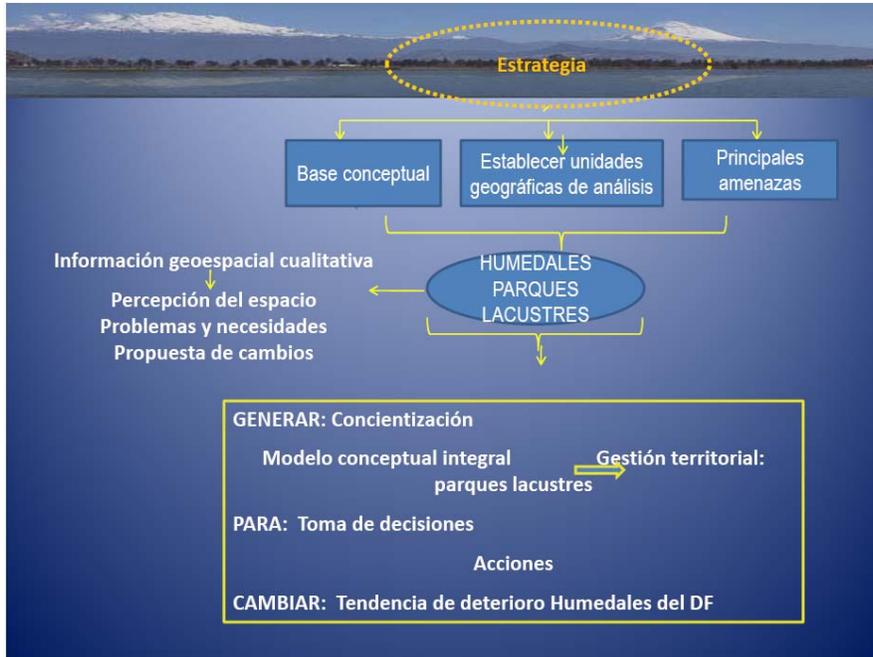




Hacia la preservación y restauración de los humedales

El rescate de estos humedales es fundamental por varias razones: para mantener la calidad y dinámica del acuífero del suelo de conservación; de mayor importancia, conservar los endemismos y los hábitats asociados para la protección de la biodiversidad; preservar el equilibrio ecológico regional, y, por el valor cultural que representa como museo vivo natural, por la permanencia de agro-sistemas tradicionales como la chinampería.

Algunos estudios han determinado que en menos de 20 años la Ciudad de México se verá en graves problemas para el abastecimiento de agua, teniendo que recurrir a otras fuentes, cada vez más lejanas, para contar con el vital líquido. Xochimilco y Tlahuac representan una alternativa para revertir la pérdida de infiltración, mediante la aplicación de proyectos ecológicamente viables que promuevan el desarrollo integral de las comunidades, que restauren espacios propicios para inducir la recarga. En este sentido de rescate versan los planes para crear los dos parques lacustres en Tlahuac y Xochimilco con el objetivo de recuperar el paisaje lacustre en 250 ha en estas delegaciones.



En el caso de los dos parques lacustres en Xochimilco (San Gregorio Atlapulco) y Tlahuac, el objetivo es desarrollar un proyecto que contemple, además de la conservación de los recursos naturales, la posibilidad de un nuevo esquema de desarrollo, con actividades de ecoturismo, agricultura tecnificada y diversificada, así como una vía para proteger la zona del crecimiento desordenado de la mancha urbana.

Al llevarse a cabo dicho proyecto, se podrían esperar otra serie de beneficios como es el impulsar el desarrollo sustentable de la zona por medio de actividades económicas productivas, frenar el deterioro de estos sistemas lacustres mejorar las condiciones para la conservación y el retorno de la fauna característica de la región, así como contribuir a la recarga del acuífero.

Estudio: *Evaluación de la vulnerabilidad ambiental que presenta el suelo de conservación por la pérdida de servicios ecosistémicos a consecuencia del cambio de uso de suelo*

**INFORME FINAL
TERCERA SECCION**

Noviembre 30, 2010

PRESENTACIÓN

Con la finalidad de facilitar la visualización del contenido y organización del **Informe Final**, la presentación de esta **tercera sección** comienza con la tabla del Índice de Contenido:

SECCIÓN	ENTREGABLES
Primera sección	Análisis sobre los sitios de mayor aportación de servicios ambientales en términos de almacén de carbono e infiltración Integración de la información colectada en campo, con la ya existente sobre la cuantificación del almacén de carbono e infiltración.
Segunda sección	Diagnóstico general de las condiciones que se presentan en los sitios analizados. Mapa de zonificación de los sitios con mayor aportación de servicios ambientales
Tercera sección	Modelo utilizado para la evaluación del cambio de uso de suelo (selección de variables o categorías) así como la cartografía resultante (imágenes de satélite clasificadas, procesadas). Mapa de zonas con los cambios de uso de suelo más drásticos.
Cuarta sección	Análisis de la vulnerabilidad ambiental que presentan algunas zonas del suelo de conservación en relación a la pérdida de servicios ecosistémicos. Modelo de ponderación de la vulnerabilidad de los sitios. Mapa de vulnerabilidad ambiental del suelo de conservación en relación a la pérdida de servicios ecosistémicos por cambio de uso de suelo.

Respecto al contenido de cada uno de los entregables de esta **Tercera sección**, se tiene que:

Entregable: *Modelo utilizado para la evaluación del cambio de uso de suelo (selección de variables o categorías) así como la cartografía resultante (imágenes de satélite clasificadas, procesadas);*

Este entregable consta de un solo documento extenso que se denomina igual:

- *Modelo utilizado para la evaluación del cambio de uso de suelo (selección de variables o categorías) así como la cartografía resultante (imágenes de satélite clasificadas, procesadas)*

Este documento incorpora la metodología, aplicación y análisis de resultados para la identificación y zonificación de los cambios de uso de suelo más drástico.

Lo cual deriva en la cartografía resultante, es decir, se articula este *Modelo* (entregable) con el *Mapa* (siguiente entregable).

Entregable: *Mapa de zonas con los cambios de uso de suelo más drásticos.*

- *Esta cartografía se presenta en impresión y digital;*

Estudio: *Evaluación de la vulnerabilidad ambiental que presenta el suelo de conservación por la pérdida de servicios ecosistémicos a consecuencia del cambio de uso de suelo*

INFORME FINAL: TERCERA SECCION

Modelo utilizado para la evaluación del cambio de uso de suelo (selección de variables o categorías) así como la cartografía resultante (imágenes de satélite clasificadas, procesadas)

Noviembre 30, 2010

Presentación

El equilibrio ecológico de la región sur del Distrito Federal –en adelante, Suelo de Conservación o SC- es frágil y altamente vulnerable a la intensa presión de los cambios del uso del suelo, mismos que son causa fundamental del deterioro de la funcionalidad ecosistémica de la cuenca del Valle de México.

A pesar de su enorme valor, la tasa de deforestación promedio anual en el DF fluctúa entre 500 ha (reporte SEMARNAT); 402 ha (reporte SMA-DF) y 240 ha (reporte PAOT. Aunque con diferencias significativas, los procesos que generan estas pérdidas se relacionan, en mayor medida, con el cambio de uso de suelo que provoca la agricultura y los asentamientos humanos, aunque también destacan los incendios, la erosión, entre otros (CORENA, 2002). Por su parte, los asentamientos (regulares e irregulares) continúan extendiéndose, llegando, según este estudio a 5,041.40 en 2005.

El modelo de cambio de uso de suelo en el SC, obligadamente ubica como vertiente de mayor impacto la presión constante sobre la cobertura forestal, la expansión agropecuaria y la extracción de madera. La deforestación, degradación y fragmentación de las masas boscosas del SC, resultante de estas actividades, ha generado fenómenos de degradación y pérdida de hábitats naturales, con un enorme impacto sobre la biodiversidad y los servicios ambientales.

Esta presión sobre la cobertura forestal y por ende, sobre la biodiversidad, se manifiesta principalmente en la conversión de bosques en sistemas productivos agrícolas y pecuarios, es decir, a tierras agrícolas y pastizales; lo cual en no pocas ocasiones, procede a un segundo cambio de uso de suelo con la proliferación de asentamientos humanos y posterior densificación.

La segunda vertiente de mayor impacto en el modelo de cambio de uso de suelo, refiere a la conversión de zonas agrícolas a asentamientos humanos, sea por

expansión o densificación de asentamientos ya existentes o por la emergencia de nuevos asentamientos.

De ahí, que en el Modelo de cambios de uso del suelo se conforme por dos grandes bloques: *Modelo para la identificación de cambios drásticos de uso del suelo* y un *Análisis tendencial de la distribución espacial de los asentamientos irregulares*.

El *Modelo para la identificación de cambios drásticos de usos del suelo* se pudo realizar, gracias a los resultados que generó el *Modelo tendencial sobre la pérdida de cubierta forestal en el suelo de conservación*, y que siguieron toda una ruta de procesamiento posterior. Hay que aclarar, que en común acuerdo con PAOT se determinó que por cambios drásticos, se entienden todos aquellos cambios de uso del suelo forestal. Este apartado incluye metodología y resultados que se presentan en mapas, gráficas y cuadros.

Por su parte, el *Análisis de las tendencias espaciales de los asentamientos humanos irregulares*, resulta ser un instrumento propicio para distinguir perfiles de distribución que facilitan el estudio de esta problemática, así como inferir posibles tendencias. Al igual que el anterior, contiene metodología y resultados expresados en mapas, gráficas y cuadros.

I. **MODELO DE IDENTIFICACIÓN DE CAMBIOS DRÁSTICOS DE USOS DEL SUELO**

Presentación

En este gran apartado, se explica la metodología que llevó a determinar los cambios de uso de suelo ocurridos de 1970 a 2005, lo que refiere un periodo indicativo para reflexionar sobre las tendencias. Del mismo modo, la riqueza de este análisis permite distinguir cuáles son los cambios drásticos, definidos en este trabajo, en común acuerdo con PAOT, como todos aquellos cambios que significaron la pérdida de cubierta forestal.

El presente análisis plantea la identificación de los cambios de uso que han ocurrido en el Suelo de Conservación del Distrito Federal. Este Modelo permite la identificación de áreas con pérdida de cubierta forestal que se complementan con el análisis más fino, de la cartografía disponible, que permite un mayor acercamiento a detalle de la subdivisión de los grandes grupos de clases particulares de cambio; identificando con ello los cambios más drástico de pérdida de la cubierta vegetal.

Por tanto, la descripción de estos procesos representa la presencia de los cambios de uso de un continuo definido más allá de la deforestación. Si bien es cierto que el estudio de la deforestación es una manera de acercarse al deterioro ecológico en general y por ello constituye un primer indicador que debe ser afinado tomando en cuenta los procesos más específicos de su compleja dinámica de cambio.

El Modelo de cambios de uso de suelo tiene dos grandes componentes: *El modelo de cambio de usos forestales*, y el *Análisis de tendencias de los asentamientos humanos irregulares*.

La primera parte de esta Sección, *El Modelo de cambios de usos forestales* inicia con los objetivos del Modelo; posteriormente, se mencionan algunos antecedentes relacionados con el tema. Enseguida se plantea la metodología que generó el CentroGeo sobre cambio de cubierta forestal y uso de suelo, basado en la construcción de etiquetas de primero y segundo nivel, con el propósito de identificar cambios de uso de suelo. Dentro de este inciso, se plantean las actividades que se realizaron para llegar a los resultados. En el último inciso, se presentan los resultados para todo el universo de estudio, así como por el suelo de conservación de cada una de las delegaciones, los resultados se expresan en cuadros estadísticos; en un mapa que refiere todos los cambios de uso de suelo, y otro que identifica los cambios drásticos; esto es las zonas que han dejado de ser bosques.

1. *Objetivos del Modelo*

Objetivo general:

Generar una metodología que permita la identificación y cuantificación de los cambios de uso de suelo y vegetación en el Suelo de Conservación del Distrito Federal.

Objetivos específicos

- a) Analizar a partir de la cartografía disponible los grupos particulares de cambio para identificar los cambios drásticos de pérdida de la cubierta vegetal
- b) Entender la dinámica de la cubierta vegetal y el uso de suelo en el Suelo de Conservación del Distrito Federal

2. Antecedentes

De acuerdo con datos bibliográficos, entre las principales causas identificadas en los cambios en la dinámica de la cubierta vegetal del Suelo de Conservación del Distrito Federal están: el crecimiento del área urbana hacia el suelo de conservación asociada con los asentamientos irregulares, el cambio de uso de suelo, el aumento de las vías de comunicación, las plagas y enfermedades forestales, la sobreexplotación de los mantos acuíferos, el sobre pastoreo de ganado y los incendios forestales.

Si uno lleva este análisis al detalle sucedido en las principales delegaciones que tienen participación en el Suelo de conservación, se pueden observar los siguientes aspectos: la delegación Álvaro Obregón, aunque cubierta casi en su totalidad por zonas urbanas, conserva aún algunas zonas de bosque que principalmente son parte del Parque Nacional del Desierto de los Leones; En la delegación Tláhuac la vegetación natural ha sido desplazada por áreas dedicadas al cultivo; la delegación Xochimilco, si bien cuenta con zonas de gran importancia agrícola y turística, presenta un alto deterioro principalmente por la contaminación de sus aguas y la densificación urbana. Milpa Alta se conserva aún como una de las zonas con más áreas boscosas y de pastizales naturales de gran importancia para toda la región. En Tlalpan la vegetación natural se encuentra rodeada de áreas de cultivo, siendo estas zonas afectadas por incendios forestales en su mayoría provocados intencionalmente así como por el crecimiento de la mancha urbana y la aparición de asentamientos irregulares; En Magdalena Contreras la zona boscosa se encuentra muy perturbada, ya que se han abierto muchas áreas para actividades agrícolas, mientras que el área urbana también representa una presión importante sobre la vegetación; Finalmente la delegación Cuajimalpa, aunque cuenta aun con pequeñas zonas de cultivo, se ha visto muy alterada la autopista México-Toluca y sus efectos aledaños (PRODERS, 2003).

3. Metodología sobre cambio de cubierta forestal y uso de suelo

La obtención de información acerca de la cubierta vegetal y el uso de suelo para el Suelo de Conservación del Distrito federal, está asociado a las diferentes comunidades vegetales arbóreas y a los principales usos de suelo presentes en el sitio (Grether, 1996); de entre ello destacan los siguientes:

- **Bosque de Oyamel.** Se localiza en áreas de suelo profundo y clima templado-húmedo, distribuido entre los 2 500 y 3 200 msnm. En las partes altas (*abies religiosa*) tiende a formar masas puras, mientras que en las partes bajas es codominante con pinos, encinos y otras especies de latifoliadas.
- **Bosque de Pino.** Incluye bosques puros de pino y pino-encino distribuidos por debajo de los 2 800 msnm. Incluye masas homogéneas puras principalmente abiertas de la clase *pinus hartwegii*.
- **Bosque de Encino.** Distribuida entre los 2 000 y 2 500 msnm sobre suelo escaso e inclusive lavas gruesas. A menudo este tipo de vegetación está formada por masas puras principalmente de *quercus rugosa* comúnmente en exposición sur o suroeste en la zona de pedregal del Ajusco.
- **Matorral Xerófilo.** Característico del sur del Valle de México, se distribuye hasta los 2 500 msnm donde se mezcla con algunos árboles. La estructura del matorral es abierta y heterogénea.
- **Áreas abiertas.** Áreas de transformación principalmente dedicadas a la agricultura (nopal, en áreas bajas de Milpa Alta, avena, frijol, alfafa, papa y maíz en las zonas elevadas) y la existencia de algunos pastizales indicidos, cuyas especies dominantes son *muhlenbergia macroura*, *festuca amplissima*, *agrostis bourgaei* y *bronunus exaltatus*.
- **Zonas urbanas.** Principalmente constituidas por la expansión de la mancha urbana, el crecimiento de los pueblos originarios de la zona sur de la ciudad y la aparición de asentamientos irregulares.

A partir de la revisión de fuentes bibliográficas y cartográficas, se ha establecido que la dinámica de la cubierta vegetal y de uso de suelo para los últimos casi 40 años corresponde al lo mostrado en la Figura 1.

En la Figura se muestran los sentidos de la dinámica de cambio en la cubierta vegetal y el uso de suelo para las fechas comprendidas entre 1973 y 2000, mostrándose las cantidades de inicio y fin en miles de hectáreas. De ello se puede advertir principalmente dos dinámicas. La primera es el aumento de áreas urbanas

a costa principalmente de la ocupación de áreas abiertas. Segundo la disminución de cubierta forestal, principalmente bosque de encino.

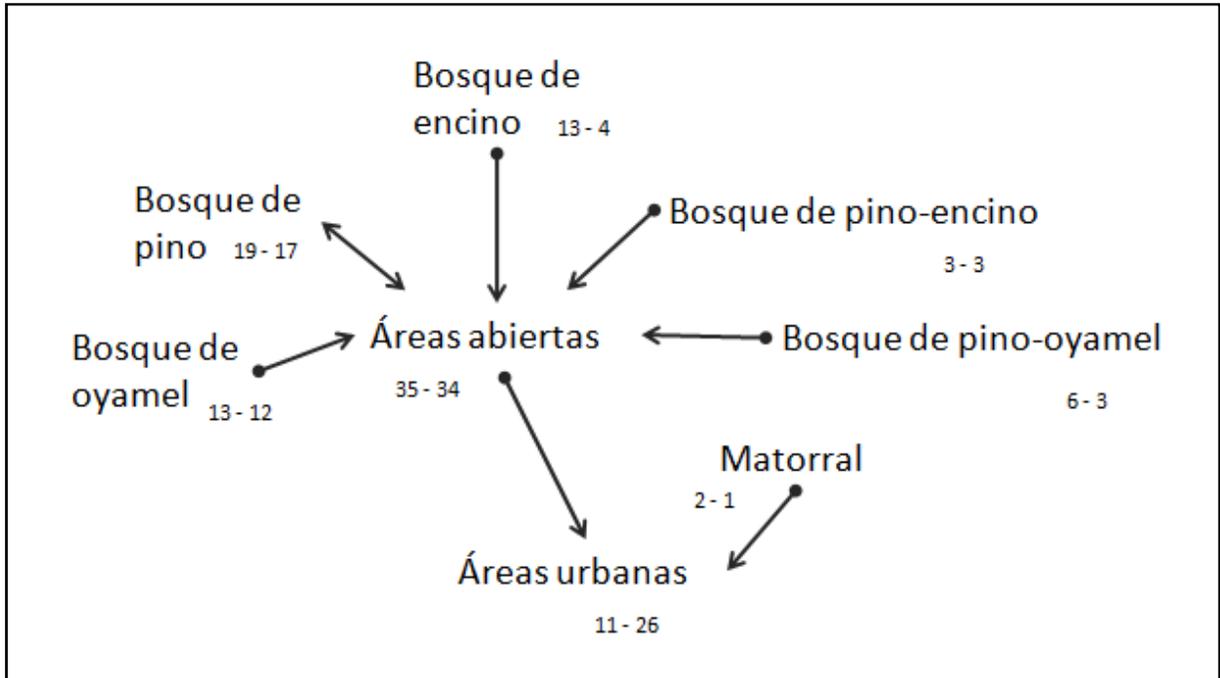


Figura 1. Esquema de la dinámica de la vegetación en el sur del Distrito Federal. (PRODERS, 2003)

Basados en lo anterior, se observa, que a pesar de la transformación de la cubierta forestal a áreas abiertas dedicadas principalmente a agricultura, se mantenga casi igual la cantidad de áreas bajo estas características. A partir de ello, este estudio se propone indagar sobre los cambios de la cubierta vegetal y el uso del suelo que expliquen la dinámica de estas transformaciones, dando cuenta de los cambios más drásticos.

En función de los hallazgos anteriores, se plantea una metodología de cambio de cubierta vegetal y uso de suelo, basado en la construcción de etiquetas de primero y segundo nivel, con el propósito de identificar cambios de uso de suelo. Los niveles corresponden a clases (cubierta terrestre) y categorías (cubierta vegetal y usos de suelo) agrupadas de manera jerárquica y anidada que permitan la identificación de las áreas de cambio en el suelo de conservación del Distrito Federal.

La Figura 2 esquematiza la metodología propuesta en este estudio para la identificación de cambios drásticos de la cubierta vegetal y el uso de suelo. A partir de la recopilación de grandes esfuerzos por el mapeo y la caracterización de los diversos tipos de vegetación y uso de suelo en el Distrito Federal, ya sea con propósitos de inventario o de ordenamiento del territorio, y aceptando la definición de cambios drásticos de cubierta vegetal y uso de suelo como aquellas

transformaciones que por el nivel de agravio a los ecosistemas y los servicios ambientales que prestan, se consideran irrecuperables en el sentido de su funcionalidad ecosistémica original, en cuyo caso su proceso de restauración y recuperación, sería infinitamente superior al gasto que implicó su transformación original.



Figura 2. Esquema metodológico para la identificación de niveles por clases y categorías

La generación de clases y categorías, permite amalgamar y homogenizar los diferentes enfoques con los que los diversos productos cartográficos identificados han desarrollado sus esquemas de mapeo. Es vital por ello entender que solo se definirán aquellos productos cartográficos que cubran con una serie de estándares cartográficos de producción cartográfica tales como fuente, información de origen, trabajo de edición y escala de publicación; poniendo especial atención en los periodos de elaboración de los mismos.

Es importante mencionar que los resultados del estudio denominado “Modelo de análisis tendencial sobre la pérdida de cubierta forestal en el suelo de conservación del Distrito Federal”, permitirán un primer nivel de aproximación, permitiendo con ello ponderar los resultados obtenidos del ejercicio de cambio de vegetación y uso del suelo.

ACTIVIDADES

Con este propósito a continuación se perfilan las siguientes actividades a desarrollar durante el presente estudio.

- a. **Recopilación de información.** Búsqueda y obtención de información documental y cartográfica, que den cuenta del inventario de la cubierta vegetal y el uso de suelo
- b. **Definición y homogenización de clases.** Una vez definidos todos los insumos cartográficos, se procederá a su homogenización en clases a dos niveles, el primero correspondiente a nivel de cubierta terrestre, cuyas principales clases serán: cubierta forestal, áreas abiertas y zonas urbanas; el segundo nivel corresponde a la identificación de categorías de cubierta vegetal y uso de suelo correspondientes a cada una de las clases de primer nivel. A manera de ejemplo, el caso de la clase de cubierta forestal puede ser ampliado en el segundo nivel a categorías que incluyan: diversos tipos de bosque, en sus categorías naturales o inducidas, tales como bosques de pino, encino, oyamel y sus composiciones mixtas.
 - a. Con este propósito será posible homogenizar clases de análisis a dos niveles de comparación, que permitan la identificación de cambios drásticos
- c. **Desarrollo de aspectos metodológicos.** Traducir los resultados de la recopilación cartográfica de Uso de Suelo y vegetación del suelo de conservación del Distrito Federal en insumos que permitan estructurar un diseño metodológico para la identificación y cuantificación de cambios drásticos de cubierta vegetal y uso de suelo para el sur del Distrito Federal.
- d. **Análisis de la información.** Identificación de los cambios de vegetación y uso de suelo que resultan ser clave en la dinámica de cambio de la cubierta vegetal y uso de suelo; de tal forma que se puedan identificar y calificar aquellos entendidos por el nivel de agravio a los ecosistemas y servicios ambientales que prestan como cambios drásticos.
- e. **Elaboración de productos cartográficos.** Elaboración de cartografía específica de resultados, que incorpore la identificación y cuantificación de los cambios drásticos en el suelo de conservación del Distrito Federal.

4. Resultados

Para la identificación de cambios de uso de suelo y vegetación en el Suelo de Conservación del Distrito Federal, se emplearon productos cartográficos de 1970, 1997 y 2005 proporcionados por la PAOT para tal propósito. Los mapas de cada uno de estos años, fueron tratados cartográficamente para lograr un único

contorno que incluyera datos para las tres fechas de estudio, obteniéndose con ello un mapa para el Suelo de Conservación del Distrito Federal de alrededor de 86 611 ha, lo que representa cerca de un % del total del suelo de conservación. Este manejo es importante en cuanto permite cancelar la aparición de cambios falsos en los usos de suelo y vegetación, originados por la no coincidencia de límites. Los resultados del manejo cartográfico de los mapas de uso de suelo y vegetación 1970, 1997 y 2005 se presentan en las siguientes figuras (Figuras 3, 4 y 5).

Una vez realizadas las adecuaciones cartográficas a los insumos, se procedió a agrupar las diversas clasificaciones temáticas a sus correspondientes categorías, de acuerdo a la metodología planteada. Es importante resaltar que a las categorías propuestas de forestal, zonas urbanas y áreas abiertas, se decidió anexar la categoría de humedales, debido principalmente al valor ambiental que por si solas conllevan esas áreas. En el caso de la categoría forestal, fueron asignadas ahí todas las clasificaciones de bosque (encino, pino, oyamel y sus respectivas combinaciones), además de matorrales y otras comunidades vegetales. En el caso de la clase áreas abiertas, se asignaron los usos agrícolas, los pastizales y otros usos. En el caso de zonas urbanas se agrupan esencialmente asentamientos humanos. Mientras que en el caso de humedales, están presentes la vegetación acuática y los cuerpos de agua.

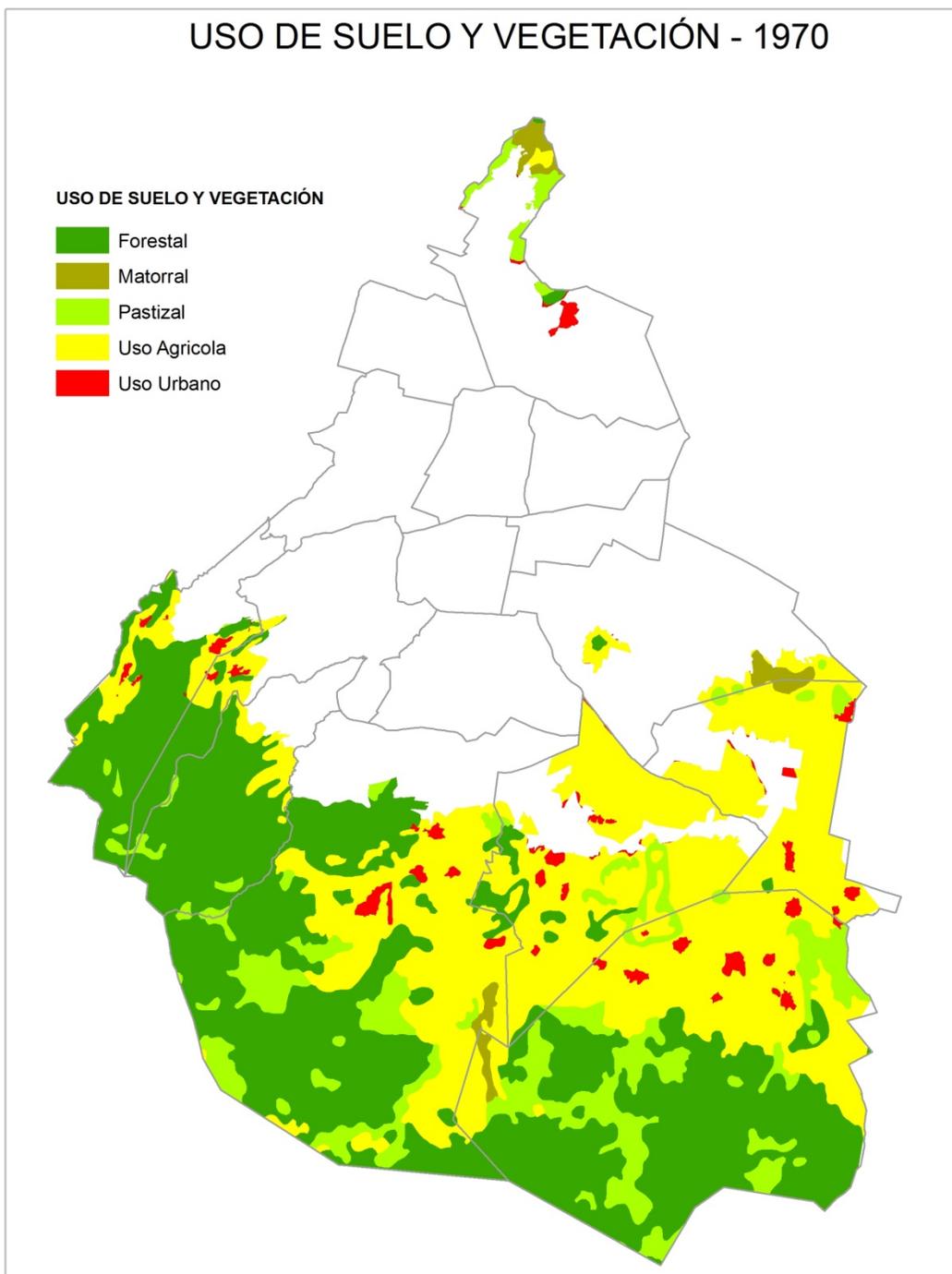


Figura 3. Mapa de Uso de Suelo y Vegetación 1970

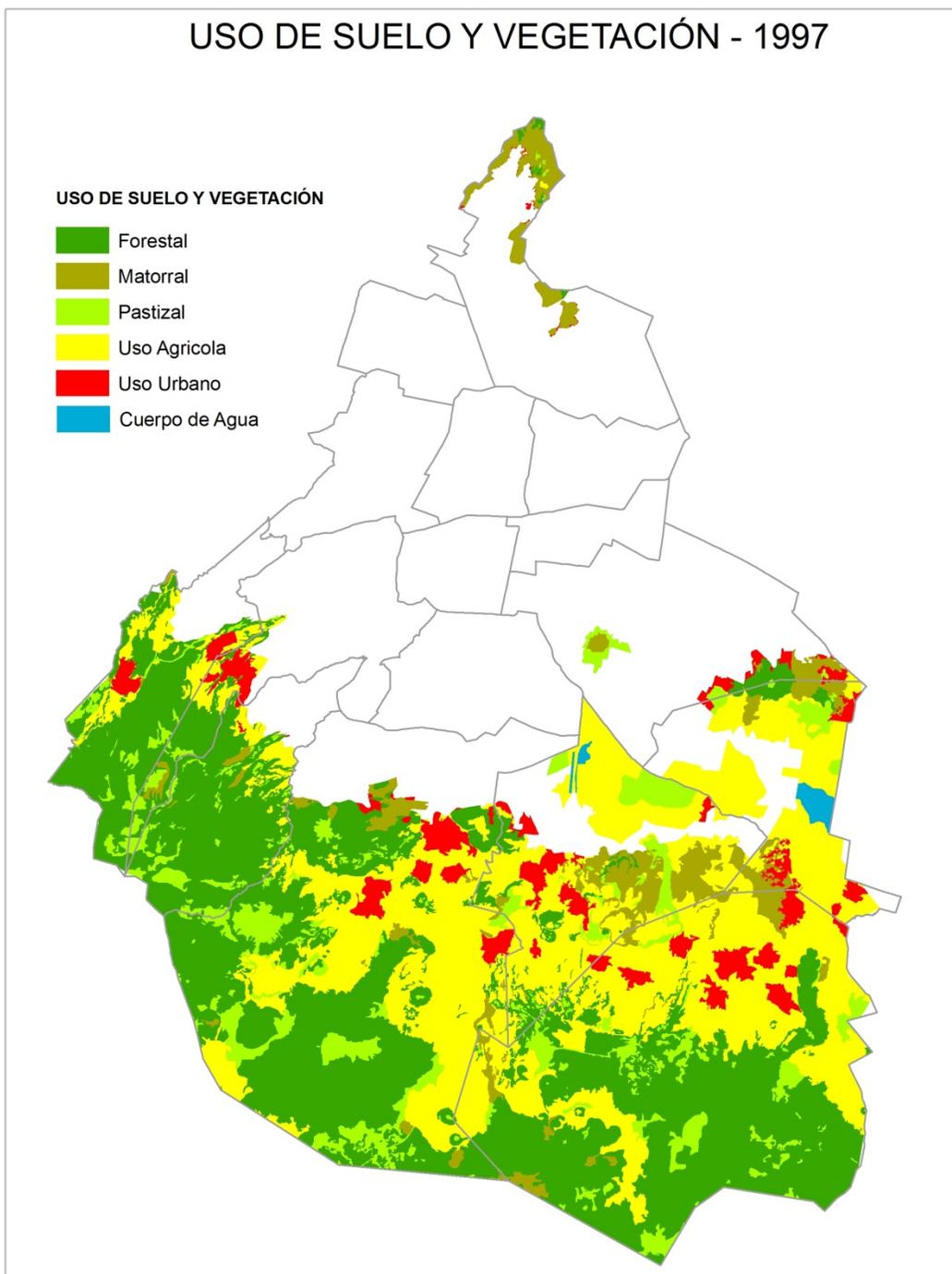


Figura 4. Mapa de Uso de Suelo y Vegetación 1997

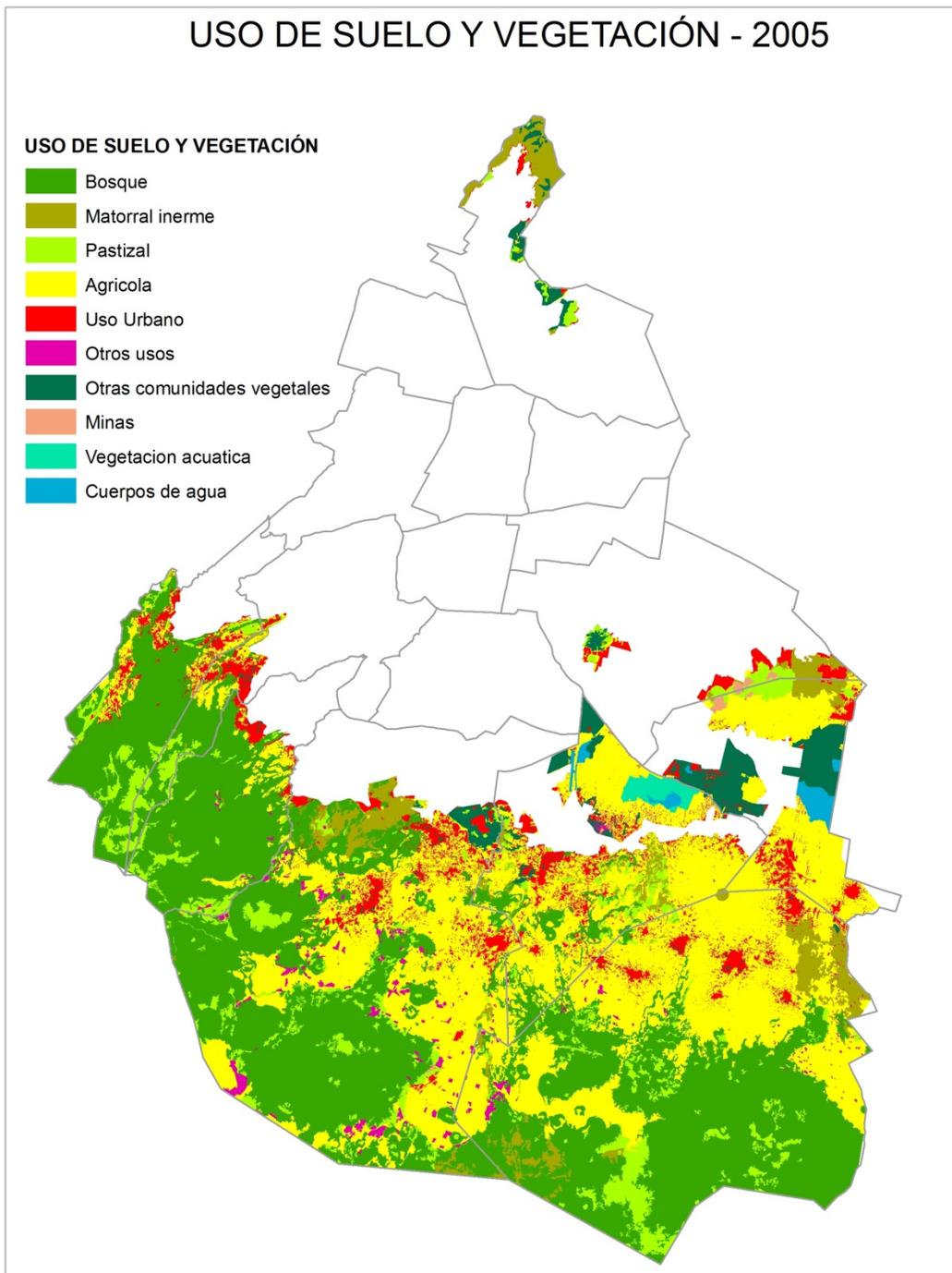


Figura 5. Mapa de Uso de Suelo y Vegetación 2005

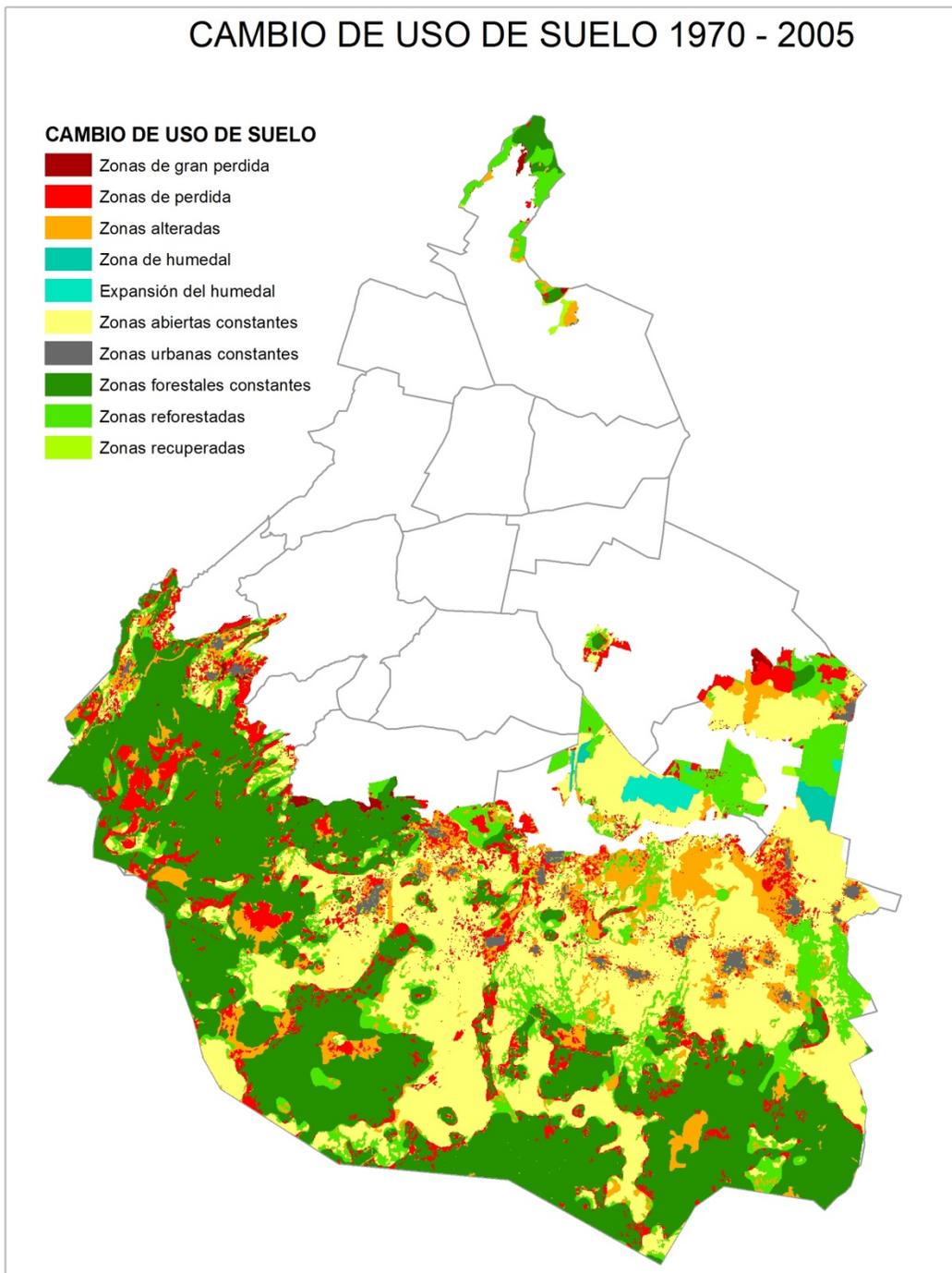


Figura 6. Mapa de Cambio de Uso de Suelo y Vegetación 1970-2005

A partir de esta regionalización en cuatro categorías, se procedió a construir un set de datos homogéneos en formato *raster*, de tal manera que para cada pixel se combinen las diferentes categorías para las tres fechas de estudio. De esta

manera se crea un mapa que contienen 34 combinaciones, que a su vez son reclasificadas en 10 zonas de cambio (Figura 6).

Zonas de cambio	Hectáreas	Porcentaje
Zonas de gran pérdida (de bosque a urbano)	358.000	0.4
Zonas de pérdida (de bosque a cualquier otro uso)	8,236.444	9.5
Zonas urbanas constantes	979.667	1.1
Zonas abiertas constantes	26,918.889	31.1
Zonas forestales constantes	30,947.556	35.8
Zonas reforestadas	9,695.111	11.2
Zonas recuperadas	335.889	0.4
Zonas alteradas	8,104.778	9.4
Zonas de humedal	363.667	0.4
Expansión del humedal	553.556	0.6
TOTAL	86,493.557	100.0

Tabla 1. Cambios de uso de suelo y vegetación 1970-2005

Cada una de las zonas presentes en el mapa de cambios de uso de suelo y vegetación 1970-2005 representan la dinámica observada de acuerdo con las cuatro categorías propuestas. De esta forma se observan en primera instancia zonas de cambio y zonas que permanecen constantes en el tiempo.

De acuerdo a las zonas mostradas en la Tabla 1. La definición de cada una de ellas se enuncia a continuación

- **Zonas de gran pérdida.** Son aquellas regiones que en algún momento presentaron cubierta forestal pero que cambió su uso de suelo a urbano.
- **Zonas de pérdida.** Son aquellas regiones que en algún momento presentaron cubierta forestal pero que cambió su uso de suelo a agricultura, pastizal o cualquier otra práctica productiva no forestal –zonas abiertas–.
- **Zonas urbanas constantes.** Regiones con uso de suelo urbano que han permanecido constantes a lo largo del tiempo.
- **Zonas abiertas constantes.** Regiones con uso de suelo de producción agrícola o de pastoreo, y no forestal que han permanecido constantes a lo largo del tiempo.

- **Zonas forestales constantes.** Regiones con doseles boscosos de vegetación que han permanecido constantes a lo largo del tiempo.
- **Zonas reforestadas.** Son aquellas regiones que en algún momento fueron zonas abiertas –agricultura, pastizal, etc.– y que en el último periodo de tiempo presentan vegetación boscosa.
- **Zonas recuperadas.** Son aquellas regiones que en algún momento presentaron un uso de suelo urbano y que en el último periodo de tiempo presentan vegetación boscosa.
- **Zonas de humedal.** Son las áreas de humedal que prácticamente han permanecido constantes a lo largo del tiempo.
- **Expansión del humedal.** Es el área de humedal que aumentó en superficie en el último periodo de tiempo.

Estos cambios de uso de suelo y vegetación 1970-2010 representados por delegación, presentan un comportamiento similar a los presentados por Suelo de Conservación en Magdalena Contreras, Tlalpan, Xochimilco y Tláhuac; mientras que se reportan mayores zonas de pérdida en Cuajimalpa, Álvaro Obregón e Iztapalapa; sin embargo las delegaciones de Gustavo A. Madero y Milpa Alta, presentan una tendencia menor (Tablas 2-9).

Los resultados mostrados en las tablas por delegación corresponden a su porción en Suelo de Conservación.

CUAJIMALPA	Hectáreas	Porcentaje
Zonas abiertas constantes	470.212	8.2
Zonas alteradas	580.575	10.1
Zonas de gran perdida	31.650	0.6
Zonas de perdida	993.237	17.3
Zonas forestales constantes	3239.665	56.3
Zonas recuperadas	45.175	0.8
Zonas reforestadas	326.661	5.6
Zonas urbanas constantes	65.804	1.1
TOTAL	5752.979	100.0

Tabla 2. Cambios de uso de suelo y vegetación 1970-2005, Cuajimalpa

MAGDALENA CONTRERAS	Hectáreas	Porcentaje
Zonas abiertas constantes	392.732	6.4
Zonas alteradas	362.311	6.0
Zonas de gran perdida	22.397	0.4
Zonas de perdida	707.689	11.6
Zonas forestales constantes	4276.845	70.3
Zonas recuperadas	0.666	0.0
Zonas reforestadas	324.625	5.3
TOTAL	6087.265	100.0

Tabla 3. Cambios de uso de suelo y vegetación 1970-2005, Magdalena Contreras

ÁLVARO OBREGÓN	Hectáreas	Porcentaje
Zonas abiertas constantes	214.656	10.9
Zonas alteradas	193.724	9.7
Zonas de gran perdida	42.997	2.2
Zonas de perdida	555.499	28.2
Zonas forestales constantes	754.820	38.3
Zonas recuperadas	21.372	1.1
Zonas reforestadas	137.410	7.0
Zonas urbanas constantes	51.750	2.6
TOTAL	1972.228	100.0

Tabla 3. Cambios de uso de suelo y vegetación 1970-2005, Álvaro Obregón

TLALPAN	Hectáreas	Porcentaje
Zonas abiertas constantes	8392.984	32.4
Zonas alteradas	1964.746	7.6
Zonas de gran perdida	139.251	0.5
Zonas de perdida	2444.322	9.4
Zonas forestales constantes	10573.587	40.8
Zonas recuperadas	42.541	0.2
Zonas reforestadas	2112.890	8.2
Zonas urbanas constantes	242.552	0.9
TOTAL	25912.873	100.0

Tabla 4. Cambios de uso de suelo y vegetación 1970-2005, Tlalpan

XOCHIMILCO	Hectáreas	Porcentaje
Expansión del humedal	512.212	5.1
Zona de humedal	79.889	0.8
Zonas abiertas constantes	4787.768	47.5
Zonas alteradas	1794.144	17.8
Zonas de gran pérdida	11.552	0.1
Zonas de pérdida	990.118	9.8
Zonas forestales constantes	371.645	3.7
Zonas recuperadas	68.081	0.7
Zonas reforestadas	1336.403	13.3
Zonas urbanas constantes	120.546	1.2
TOTAL	10072.358	100.0

Tabla 5. Cambios de uso de suelo y vegetación 1970-2005, Xochimilco

MILPA ALTA	Hectáreas	Porcentaje
Zonas abiertas constantes	9592.032	34.2
Zonas alteradas	2283.698	8.1
Zonas de pérdida	1559.651	5.6
Zonas forestales constantes	11216.654	40.0
Zonas recuperadas	26.212	0.1
Zonas reforestadas	3009.466	10.7
Zonas urbanas constantes	356.008	1.3
TOTAL	28043.721	100.0

Tabla 6. Cambios de uso de suelo y vegetación 1970-2005, Milpa Alta

TLÁHUAC	Hectáreas	Porcentaje
Expansión del humedal	41.238	0.7
Zona de humedal	283.387	4.5
Zonas abiertas constantes	2923.189	46.4
Zonas alteradas	682.328	10.8
Zonas de gran pérdida	7.330	0.1
Zonas de pérdida	444.597	7.1
Zonas forestales constantes	34.516	0.5
Zonas recuperadas	49.172	0.8
Zonas reforestadas	1691.985	26.9
Zonas urbanas constantes	140.486	2.2
TOTAL	6298.228	100.0

Tabla 7. Cambios de uso de suelo y vegetación 1970-2005, Tláhuac

GUSTAVO A. MADERO	Hectáreas	Porcentaje
Zonas alteradas	143.249	12.1
Zonas de gran pérdida	41.480	3.5
Zonas de pérdida	38.922	3.3
Zonas forestales constantes	359.602	30.3
Zonas recuperadas	77.232	6.5
Zonas reforestadas	522.448	44.1
Zonas urbanas constantes	2.443	0.2
TOTAL	1185.376	100.0

Tabla 8. Cambios de uso de suelo y vegetación 1970-2005, Gustavo A. Madero

IZTAPALAPA	Hectáreas	Porcentaje
Zonas abiertas constantes	139.055	12.3
Zonas alteradas	97.066	8.5
Zonas de gran pérdida	61.111	5.4
Zonas de pérdida	499.132	44.2
Zonas forestales constantes	102.594	9.1
Zonas recuperadas	5.172	0.5
Zonas reforestadas	225.740	20.0
TOTAL	1129.870	100.0

Tabla 9. Cambios de uso de suelo y vegetación 1970-2005, Iztapalapa

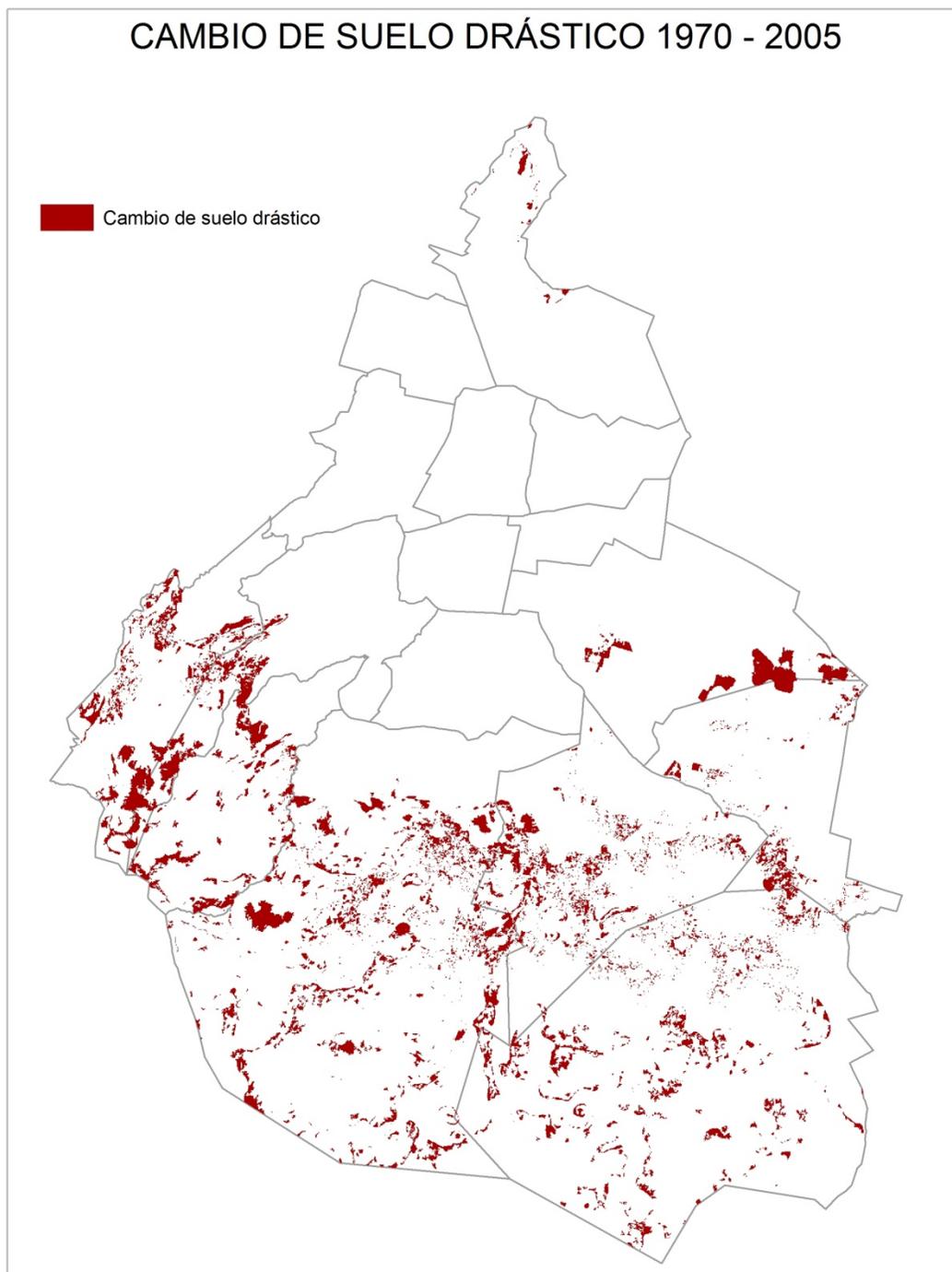


Figura 7. Mapa de Cambios drásticos 1970-2005

En el caso particular de las zonas de cambio observados en donde se presentan pérdidas, atendiendo a la naturaleza de las mismas, estas pueden ser esencialmente aquellas zonas conformadas por pérdida de clases forestales a manos de zonas urbanas (zonas de gran pérdida) y zonas abiertas (zonas de

perdida). Estas dos zonas en particular pueden ser clasificadas como zonas de cambio drástico (Figura 7)

Las categorías asignadas como zonas de cambio drástico, corresponden a 8 594 ha dentro de suelo de conservación, las cuales corresponden al 10 % del Suelo de Conservación del Distrito Federal, de ellas solo el 0.5% corresponden a zonas de gran pérdida, siendo el resto la mayoría zonas únicamente de pérdida.

Estas zonas caracterizadas por la pérdida de áreas boscosas, representan la pérdida de ecosistemas asociados con la prestación de servicios ambientales, principalmente cubierta forestal, hábitat disponible, captura de carbono, infiltración entre otros. De acuerdo con las zonas clasificadas como de cambio drástico, las principales áreas boscosas transformadas a zonas urbanas corresponden a bosques de encino, oyamel y pino; mientras que las áreas transformadas a zonas abiertas corresponden principalmente a bosques de pino y oyamel.

Conclusiones

De acuerdo con la metodología planteada, para el periodo de estudio 1970-2005, se construyó por categorías propuestas un mapa de zonas de cambio, las cuales caracterizan en 10 clases la dinámica de cambio observada en el Suelo de Conservación del Distrito Federal para un periodo de 35 años. A partir de esta zonificación, es posible identificar aquellos cambios de pérdida y gran pérdida de áreas forestales, en términos de la dinámica observada: Así las zonas de gran pérdida corresponden a ecosistemas forestales transformados directamente a zonas urbanas, mientras que las zonas de pérdida corresponden a ecosistemas forestales que primero fueron abiertos a pastizales o zonas urbanas, para posteriormente incorporarse a la dinámica urbana.

De los resultados observados, es importante mencionar que aunque se observa un moderado porcentaje de cambios de bosque a usos urbano a en Suelo de Conservación para el periodo de estudio, éste se vuelve representativo, en cuanto sólo se compara con las zonas de cambio y aún más importante, es de sobresalir los patrones de ubicación, los cuales hablan de un proceso extendido en todas las delegaciones del Suelo de Conservación casi por igual. Lo que representa un grave problema, ya que atenta de manera no diferenciada sobre los ecosistemas conservados a su alrededor, principalmente la frontera agrícola y los macizos forestales aún presentes.

Finalmente, es importante resaltar que el método propuesto para la estimación de cambios drásticos, permite categorizar los cambios en clases homogéneas, que después pueden ser analizadas a detalle para todas aquellas zonas que sean de interés, tal es el caso de las zonas recategorizadas como zonas de cambios drásticos, para los cuales es posible identificar, aquellos tipos de vegetación que fueron transformados a zonas abiertas o urbanas.

BIBLIOGRAFÍA

Gobierno del Distrito Federal. Secretaría del Medio Ambiente, Comisión de Recursos Naturales y Desarrollo Rural. México, D. F. 2002

Grether, R. 1996. Diagnostico Regional de Sur Poniente del Distrito Federal. UAM-I

Programa General de Ordenamiento Ecológico del Distrito Federal, 2000.

Programa de Desarrollo Rural Sustentable. La deforestación. 2003

Stehman, S. 2009. *Sampling designs for accuracy assessment of land cover. International Journal of Remote Sensing.* 30(20), 5243–5272

Wulder, M. 1998. *Optical remote-sensing techniques for the assessment of forest inventory and biophysical. Progress in Physical Geography* 22(4), 449-476

II. ANÁLISIS DE LAS TENDENCIAS ESPACIALES DE LOS ASENTAMIENTOS HUMANOS IRREGULARES

Hasta aquí, se analizaron los cambios de uso de suelo forestal, en donde el cambio de bosque a usos urbanos no va mucho más lejos de las 400 hectáreas. Ahora se tiene que pensar en los cambios que han significado los asentamientos humanos tanto para la agricultura, como para pastizales y matorrales. Es decir, el problema ahora refiere el sellamiento, que se convierte en la única amenaza que es común a todas las zonas de alto valor ecosistémico. El sellamiento ocurre, principalmente, por asentamientos humanos, mismos que se significan nuevas amenazas sobre los espacios intermedios o colindantes, afectando los servicios ecosistémicos y provocando pérdida de bosques, zonas de cultivo y sobre todo, áreas de recarga del acuífero, lo que atenta en contra de los derechos ambientales de todos los habitantes de la ciudad.

En la primera parte de este texto, se presenta un muy breve análisis del patrón de expansión de los asentamientos en el suelo de conservación, para posteriormente pasar al análisis cartográfico y las conclusiones del mismo.

1. Breve análisis del patrón de expansión de asentamientos en el suelo de conservación

La Ciudad de México tiene un patrón expansivo de crecimiento periférico sobre el sur de de la ciudad,¹ lugar en donde se localizan las zonas de mayor valor ecosistémico. El “suelo de conservación” se ha convertido en el objetivo fundamental de todo un proceso de crecimiento que pone en peligro aspectos tan básicos para la ciudad como su equilibrio hidrológico, climático y ecológico, sin olvidar la importancia de la cubierta forestal. Ello es así, por la escasez de suelo para vivienda, el costo infranqueable para muchos de acceder a la renta o compra de una vivienda, sumado a la falta de créditos para sectores sin recursos; y la tensión que existe sobre el mercado inmobiliario, ya que está atravesado por importantes ejes carreteros (autopistas a Cuernavaca y Toluca) que lo conectan con emplazamientos urbanos, turísticos e industriales.

Aunque a menores ritmos que en décadas anteriores, los asentamientos humanos han seguido proliferando. La ocupación sigue las mismas pautas que en el pasado: expansión urbana como continuación natural de la ciudad; intermediaciones

¹ Se ha entendido que el suelo es una mercancía más, y se le ha dejado al libre juego del mercado, lo que determina que el acceso al suelo se dé a partir de la capacidad de pago, lo que ha significado que sectores sin recursos e incluso clases medias opten por formas irregulares de construir viviendas en el sur del Distrito Federal, donde resulta más económico.

de los pueblos y de los asentamientos consolidados; relleno de espacios vacíos y conurbación de poblados; así como cercanía con las vías de comunicación. Aquellas áreas agrícolas de baja rentabilidad y poca vegetación arbórea son más susceptibles de ser fraccionados, más aún si se encuentran, en el entorno de vías de acceso y servicios. Actualmente, se puede hablar de una franja de asentamientos regulares e irregulares en el suelo de conservación.

El creciente avance de la mancha urbana ya no responde a invasiones masivas, tiene como punta de lanza la “ocupación hormiga”, que en ocasiones ocurre en lugares distantes para no ser detectados fácilmente, muchas veces en zonas boscosas o cañadas que los ocultan. Al principio se trata de viviendas muy precarias que con el tiempo van transformándose en viviendas bien estructuradas. Se observan también construcciones dispersas en las periferias de los pueblos, con amplias zonas verdes. Es el caso de Cuajimalpa donde los desarrollos inmobiliarios han logrado ocupar pendientes mediante soluciones tecnológicas. En síntesis, prevalecen intereses inmobiliarios de unos cuantos y la necesidad de un lugar donde vivir de muchos.

Los asentamientos humanos sobre suelo de conservación no sólo ponen en entredicho el futuro de la ciudad, sino que muchos de ellos se concentran en zonas con un alto potencial de riesgo, en sitios inestables y peligrosos en términos físicos: laderas con pendientes escarpadas, locaciones que presentan hundimientos diferenciales y agrietamientos, así como inundaciones.

El incremento de la superficie de los asentamientos humanos en el suelo de conservación se incrementó de 1970 a 1997, en 2,637ha, y de 1997 a 2005, se sumaron 2,404 ha.

Suelo de conservación del Distrito Federal: superficie de asentamientos humanos, 1970, 1997, 2005					
Entidad	1970	1997	1970-1997	2005	1997-2005
	Hectáreas	Hectáreas	Tasa de crecimiento	Hectáreas	Tasa de crecimiento
Distrito Federal	1,558.38	4,195.44	0.62	5,041.40	0.60
Álvaro Obregón	55.37	320.41	0.83	310.88	-0.03
Caujimalpa	129.82	323.66	0.60	510.13	0.37
Magdalena	0.00	24.69	1.00	310.20	0.92
Milpa Alta	485.19	1,230.76	0.61	844.44	-0.46
Tlalpan	378.86	1,112.18	0.66	1,360.81	0.18
Tláuac	246.36	460.17	0.46	611.31	0.25
Xochimilco	262.77	723.57	0.64	1,093.63	0.34
Fuente: elaboración propia con base en: Programa General de Ordenamiento Ecológico, 2000 y GDF, Secretaría de Desarrollo Rural y Equidad, 2006. Atlas de usos del suelo 2006.					

Análisis cartográfico de los patrones de localización de los asentamientos irregulares

A continuación, se presentan los resultados obtenidos, así como las metodologías que se utilizaron:

1. Datos generales

Para este análisis de Asentamientos Humanos Irregulares en Suelo de Conservación se utilizaron básicamente las capas de: Asentamientos Humanos irregulares, Programa General de Ordenamiento Ecológico del Distrito Federal (PGOEDF) y Vialidades. De la capa del PGOEDF tan sólo se usaron los polígonos pertenecientes a alguna de las siguientes categorías: Poblados Rurales, Programas Parciales, Zona Urbana y Equipamiento Rural.

Para la capa de asentamientos irregulares se realizó un proceso “*explode*” mediante la herramienta ET Geotools10 de tal forma que los elementos pasaron de multipolígonos a polígonos separados. Esto debido a que había elementos compuestos por polígonos separados por varios kilómetros entre sí, lo cual no servía para el presente análisis.

A continuación se presentan algunos datos generales referentes a la superficie designada en el PGOEDF para cada categoría, así como la superficie y número de polígonos que ocupan los asentamientos humanos irregulares:

Categoría PGOEDF	Superficie (Ha)	Número de polígonos
Poblados Rurales	4,733.56	22
Programas Parciales	2,732.93	82
Zona Urbana	222.50	7
Equipamiento Rural	710.59	63
Asentamientos Irregulares (multipolígono)	2,878.19	1,398

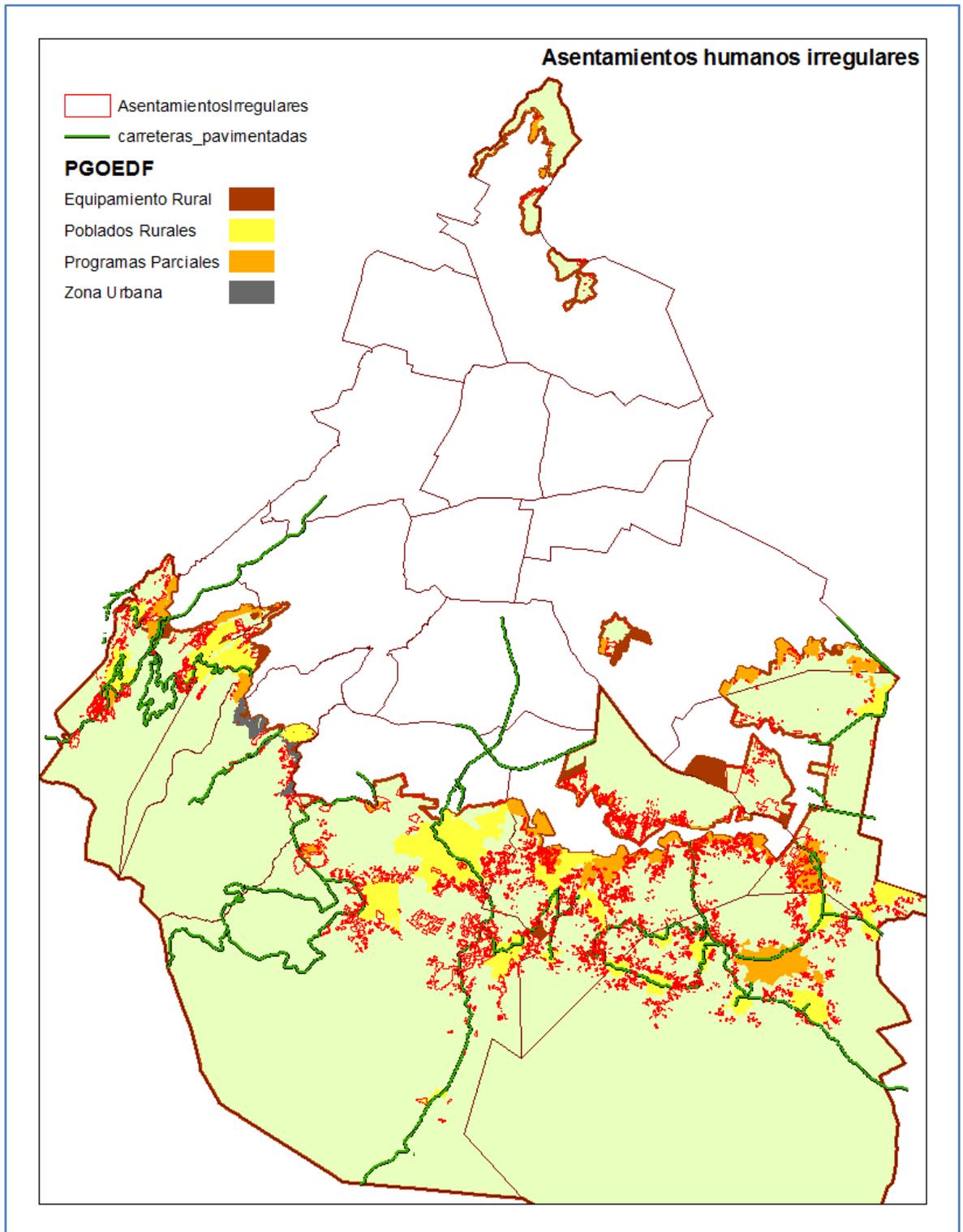


Ilustración 1 Asentamientos Humanos Irregulares

2. Superficie ocupada por polígonos de Asentamientos Humanos Irregulares dentro de Poblados Rurales, Programas Parciales, Equipamiento Rural y Zona Urbana.

A continuación se obtuvieron los polígonos de Asentamientos Humanos Irregulares enteramente contenidos en el área perteneciente a alguna de las categorías siguientes: Poblados rurales, Programas Parciales, Zona urbana, Equipamiento rural y frontera de la mancha urbana; en donde los polígonos dentro de la frontera de la mancha urbana son aquellos que no están en el suelo de conservación, pero que están cercanos a él y que forman parte de un patrón de asentamientos humanos que penetran en el suelo de conservación.

AHI dentro cada categoría	Superficie (Ha)	Número de polígonos
Poblados Rurales	26.09	64
Programas Parciales	80.38	265
Zona Urbana	0.17	3
Equipamiento Rural	1.34	11
Frontera Mancha Urbana	0.56	4
Total	108.54	347
Porcentaje del total de AHÍ	3.77%	7.46%

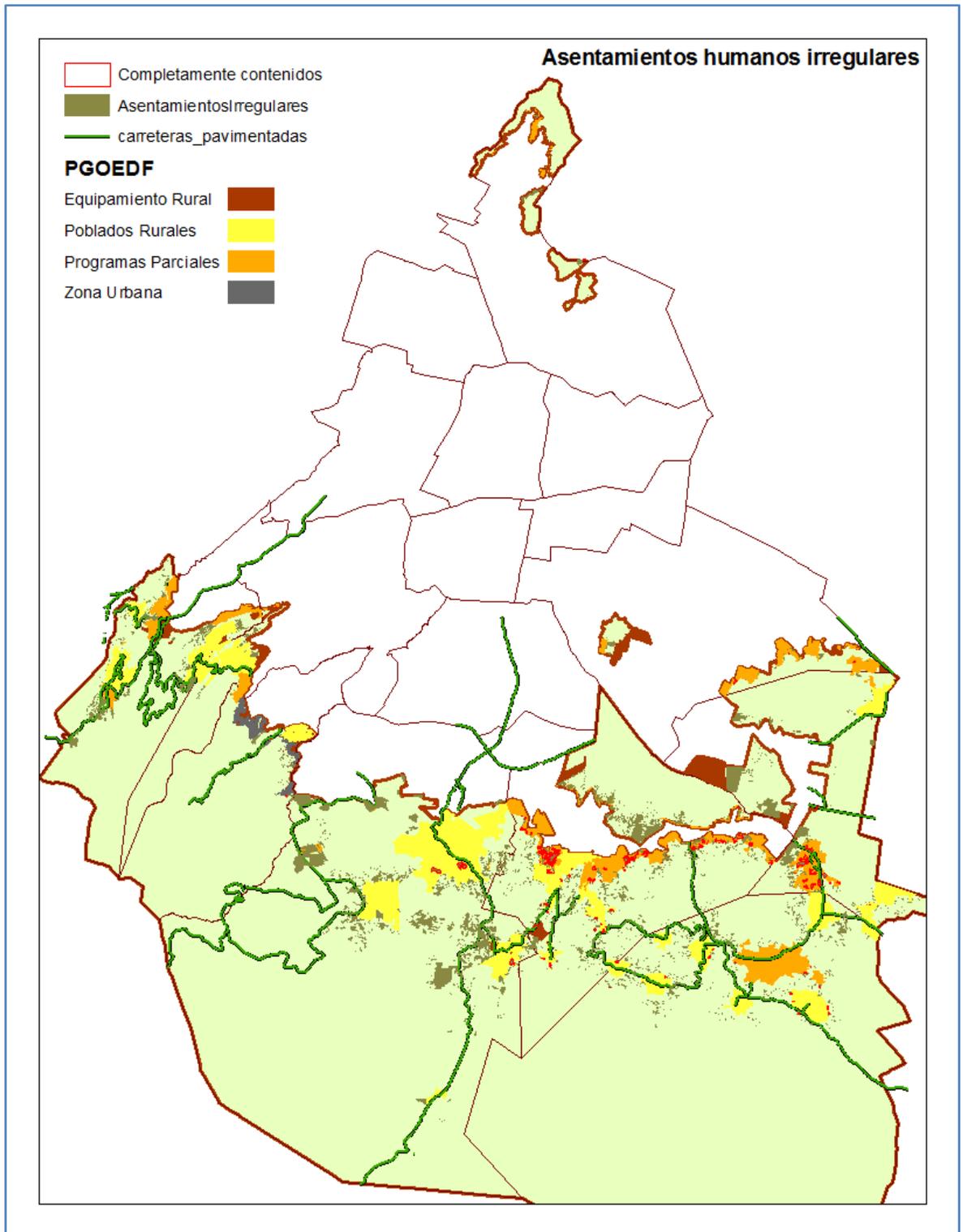


Ilustración 2 Asentamientos humanos irregulares completamente contenidos en Poblados Rurales, Programas Parciales, Zona Urbana, Equipamientos Rural o en la Frontera de Expansión de la Mancha Urbana

3. Polígonos de asentamientos que intersectan (en los límites de) zonas de Equipamiento Rural, Poblados Rurales, Programas Parciales, Zona Urbana o Frontera de la Mancha Urbana.

A continuación se obtuvieron los polígonos que están parcialmente contenidos en alguna de las cinco categorías citadas. En esta categoría no se incluyen los polígonos clasificados en el punto anterior. Para evitar ambigüedad, se hace la clasificación en el siguiente orden de prioridad (de mayor a menor): Poblados Rurales, Programas Parciales, Zona Urbana, Equipamiento Rural y Frontera de la Mancha Urbana. Esto significa que si un polígono intersecta áreas pertenecientes a dos categorías diferentes queda asignado a la categoría con mayor prioridad.

Polígonos de AHI en los límites de:	Superficie (Ha)	Número de polígonos
Poblados Rurales	358.14	225
Programas Parciales	390.01	217
Zona Urbana	40.48	14
Equipamiento Rural	200.57	35
Frontera Mancha Urbana	206.75	45
Total	1,195.95	536
Porcentaje del total de AHÍ	41.55%	11.52%

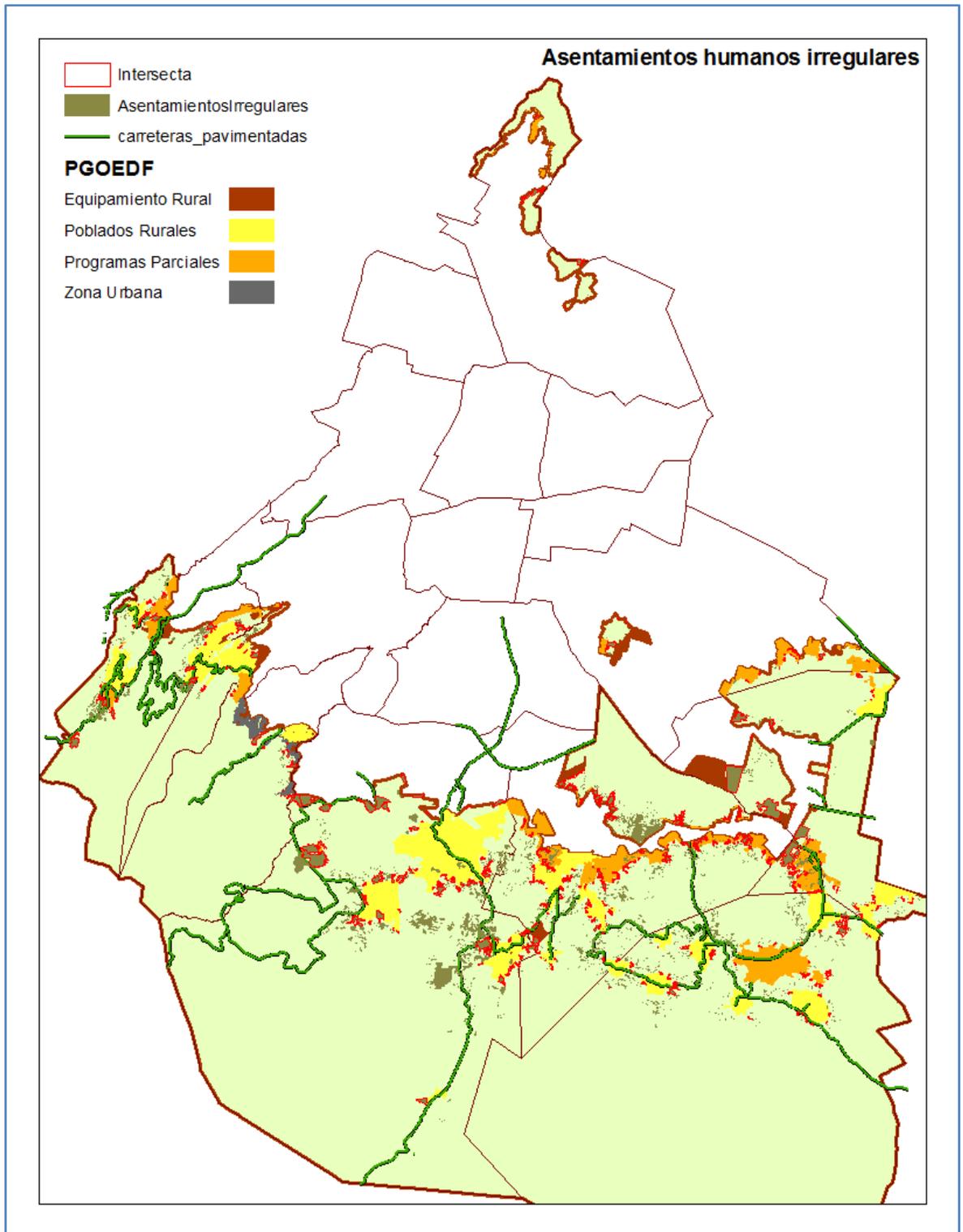


Ilustración 3 Asentamientos Irregulares en la periferia de Poblados Rurales, Programas Parciales, Zona Urbana, Equipamiento Rural o en la Frontera de Expansión de la Mancha Urbana.

4. Polígonos de Asentamientos Humanos a no más de 250m de zonas de Poblados Rurales, Programas Parciales, Zona Urbana, Frontera de la Mancha Urbana y Equipamiento Rural.

Para hacer la selección de estos polígonos se utiliza la función *Near de ArcGis*, la cual calcula la distancia mínima entre los elementos de una capa de entrada y los elementos de otra capa, en este caso se calcula la mínima distancia entre los asentamientos irregulares que no han sido clasificados y los polígonos del PGOEDF de Poblados rurales, Programas Parciales, Zona urbana, Equipamiento rural, además de la frontera de la mancha urbana (fuera del PGOEDF).

Polígonos de AHI a no más de 250m	Superficie (Ha)	Número de polígonos
Poblados Rurales	395.00	954
Programas Parciales	201.64	603
Zona Urbana	6.54	37
Equipamiento Rural	24.83	112
Frontera Mancha Urbana	147.20	184
Total	775.22	1,890
Porcentaje del total de AHÍ	26.93%	40.62%

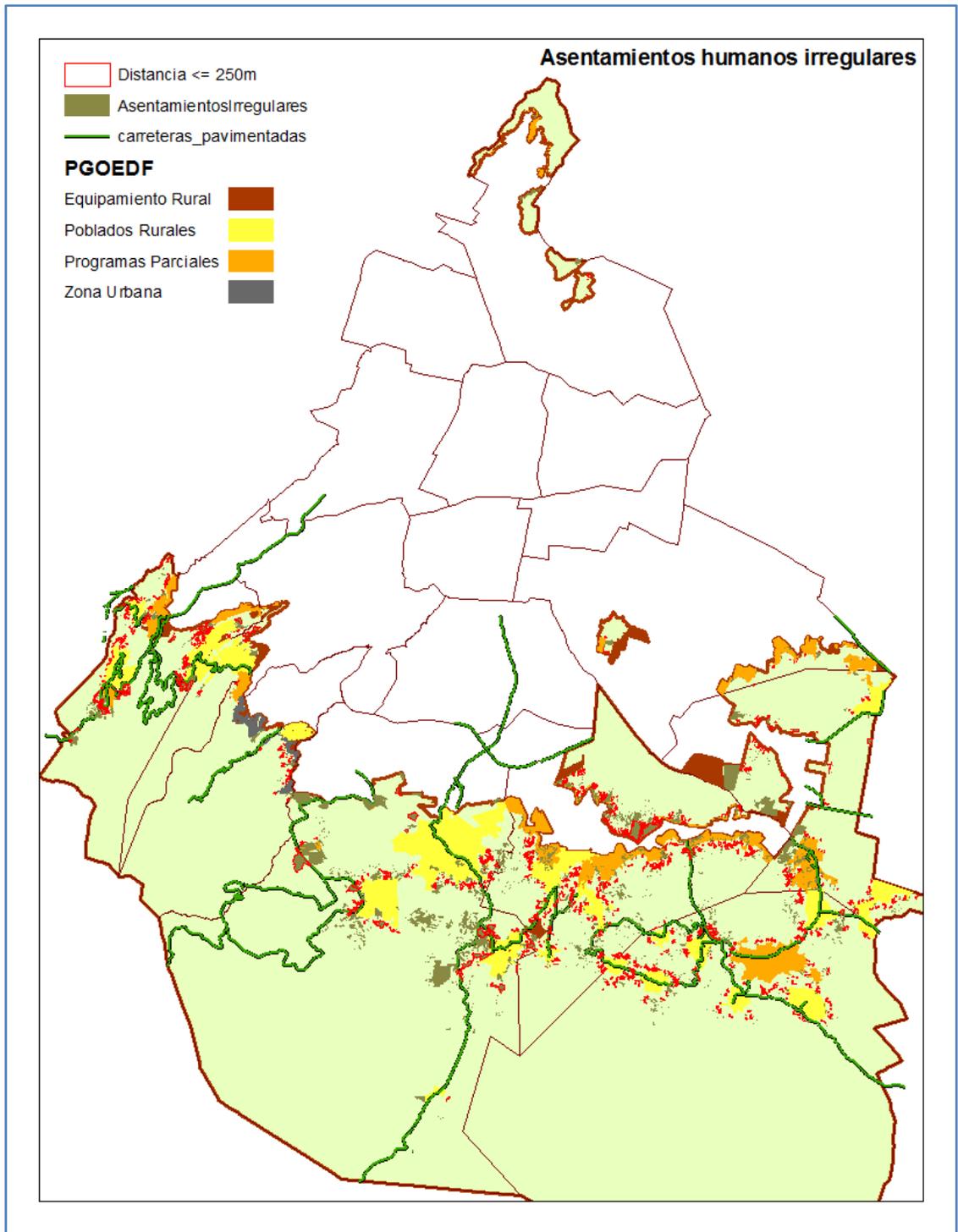


Ilustración 4 Asentamientos humanos irregulares a distancia menor o igual a 250m de Poblados Rurales, Programas Parciales, Zona Urbana, Equipamiento Rural o Frontera de Expansión de la Mancha Urbana.

5. Asentamientos Humanos Irregulares a distancia mínima menor o igual a 100m de Carreteras Pavimentadas.

Por el mismo método que en el punto anterior se seleccionan los polígonos de asentamientos irregulares que están a una distancia igual o menor a 100m de las carreteras pavimentadas. Si un polígono ha sido previamente clasificado no se incluye en el perfil.

Polígonos de AHI a no más de 100m de carreteras	Superficie (Ha)	Número de polígonos
Carreteras Pavimentadas	227.89	278
Total	227.89	278
Porcentaje del total de AHI	7.92%	5.97%

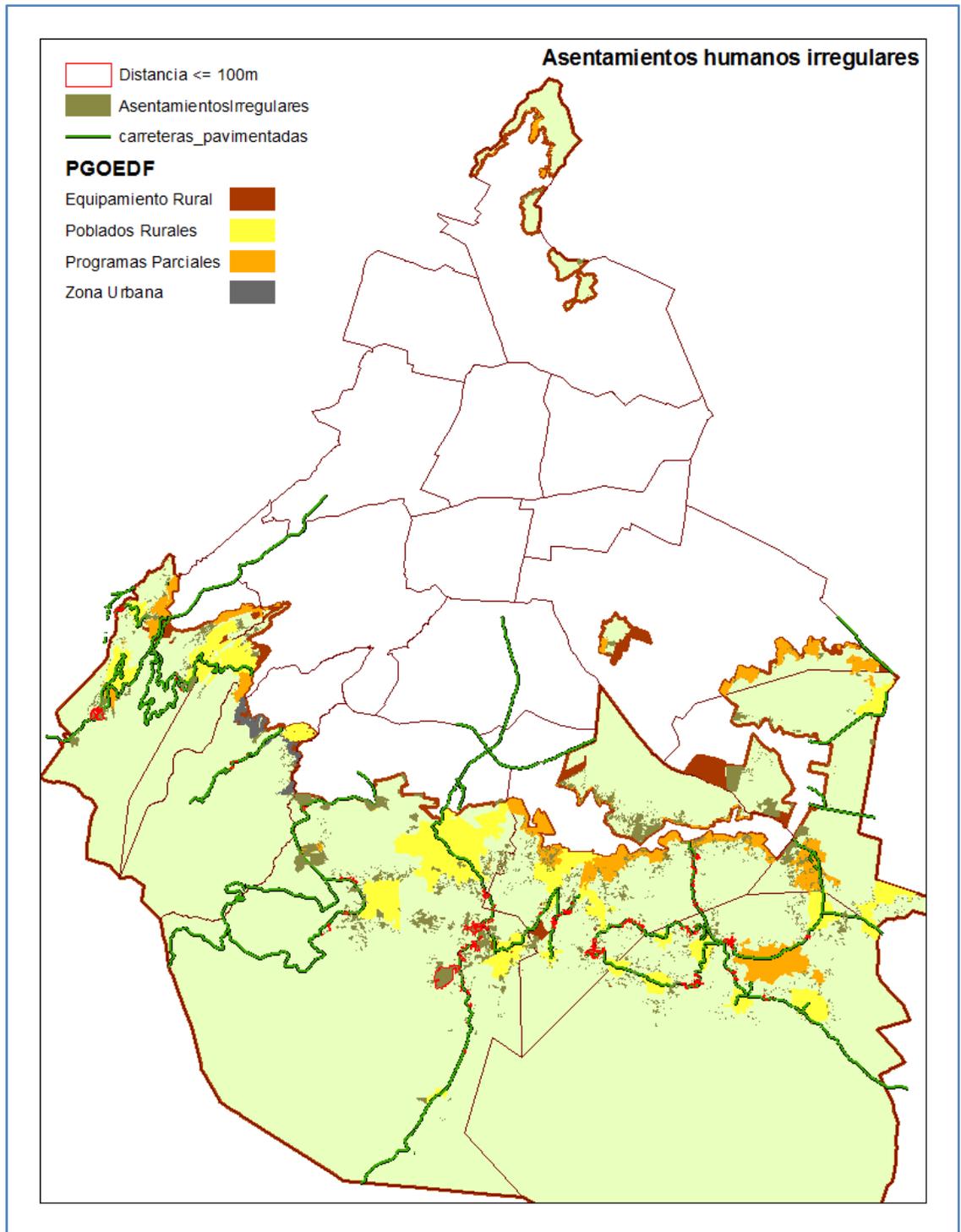


Ilustración 5 Asentamientos humanos irregulares a una distancia no mayor a 100m de alguna carretera pavimentada.

6. Asentamientos de tipo *conglomerado*

A continuación se realizó un histograma de frecuencia de los polígonos aun no clasificados, en donde las clases se refieren a la superficie por polígono. En el histograma se muestra que más de 1200 polígonos de los 1602 que aún quedan por clasificar, tienen una superficie menor a 1 hectárea. Los polígonos con un área mayor a 3 hectáreas representan un porcentaje mínimo del total de polígonos (aproximadamente el 2%).

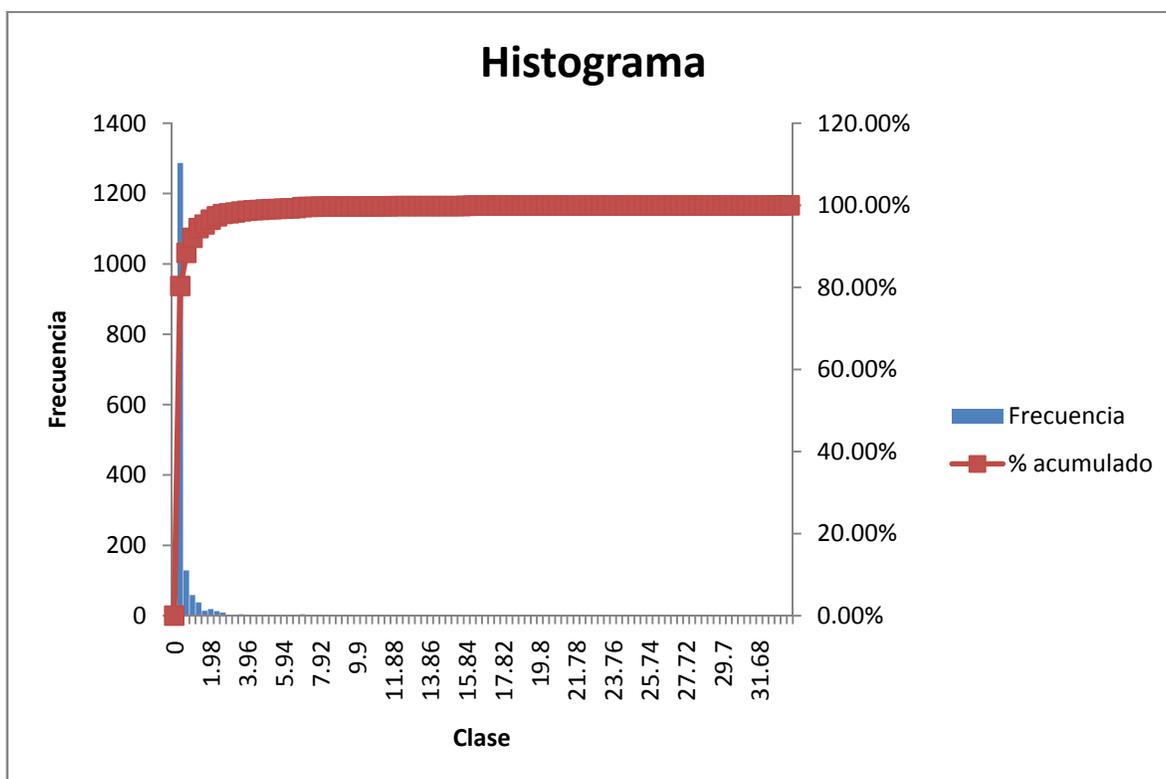


Ilustración 6 Histograma por superficie de polígono de asentamiento irregular.

Los polígonos que quedan por clasificar tienen al vecino más cercano en una distancia promedio de 105m, con un caso de distancia mínima de 8.5m y una distancia máxima de 2159.6m. Para definir los polígonos como de tipo conglomerado se establecen las siguientes condiciones. Los polígonos de asentamientos que quedan en esta clase cumplen con las siguientes condiciones.

- No han sido clasificados.
- Un polígono tiene una superficie igual o mayor a 3 ha queda como conglomerado.
- Un polígono tiene por lo menos un vecino a una distancia no mayor a 60m. Este número surge como una primera aproximación de tal forma que la distancia mínima entre polígonos es aproximadamente la mitad de la separación promedio entre 2 polígonos.
- Se agrupan los polígonos que cumplen con la condición anterior.
- Si los polígonos agregados suman entre sí una superficie mayor a 3 hectáreas, cada uno de ellos es clasificado como un polígono conglomerado. La razón para elegir una superficie de por lo menos 3ha es que los polígonos con área mayor a tres hectáreas tienen una frecuencia muy baja (son 31 polígonos).

Polígonos de AHI conglomerados	Superficie (Ha)	Número de polígonos
Conglomerados	373.54	445
Porcentaje del total de AHÍ	12.98%	9.56%

Los resultados conformaron un conjunto de 45 conglomerados de polígonos, con una superficie media del conglomerado de 8.3ha, un mínimo de 3ha y un máximo de 66ha. La superficie promedio ocupada por cada polígono (no agrupado) es de 0.84ha.

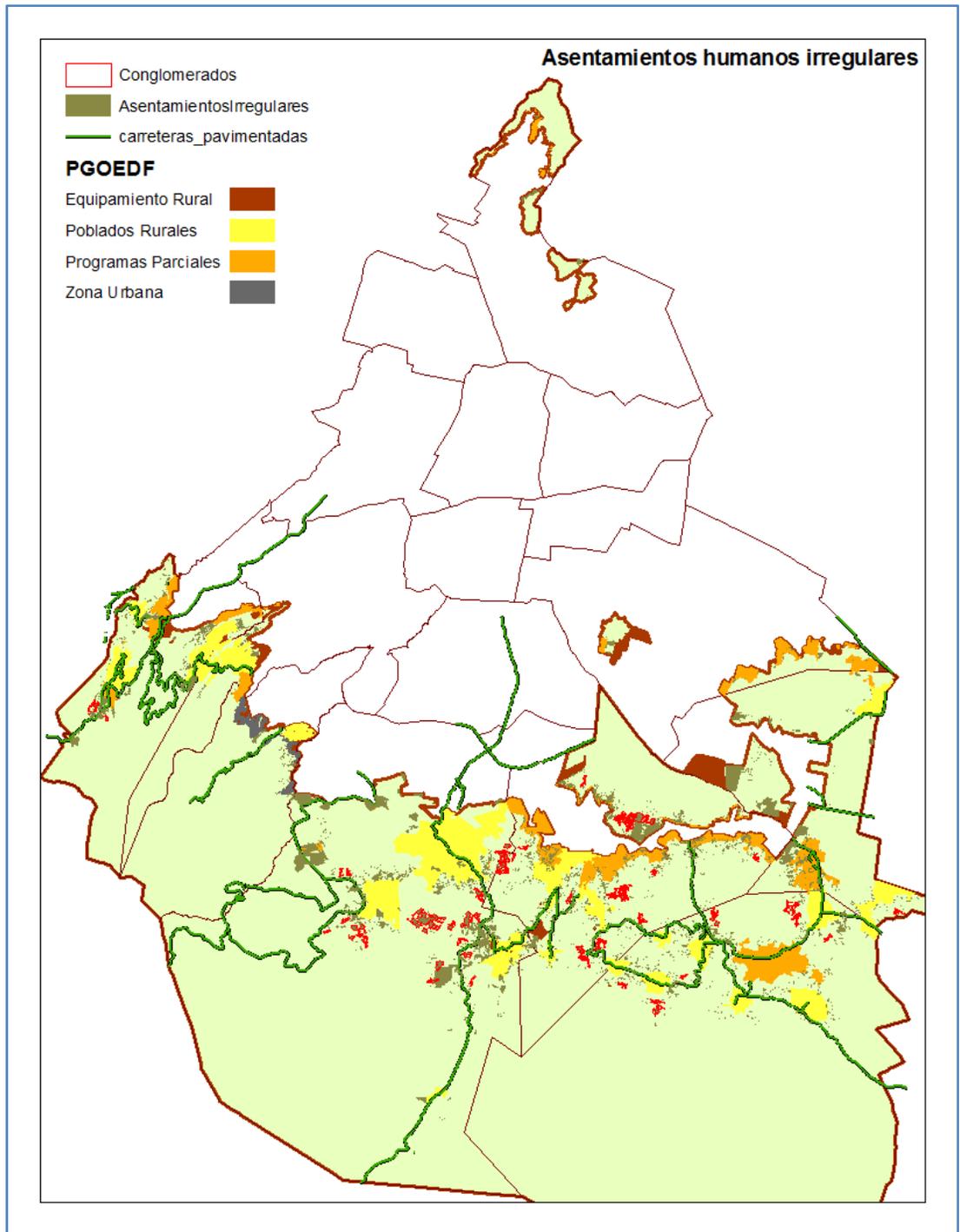


Ilustración 7 Asentamientos humanos irregulares en conglomerados.

7. Polígonos dispersos.

El resto de los polígonos se clasifican como dispersos.

Polígonos de AHI dispersos	Superficie (Ha)	Número de polígonos
Dispersos	197.05	1,157
Porcentaje del total de AHÍ	6.85%	24.87%

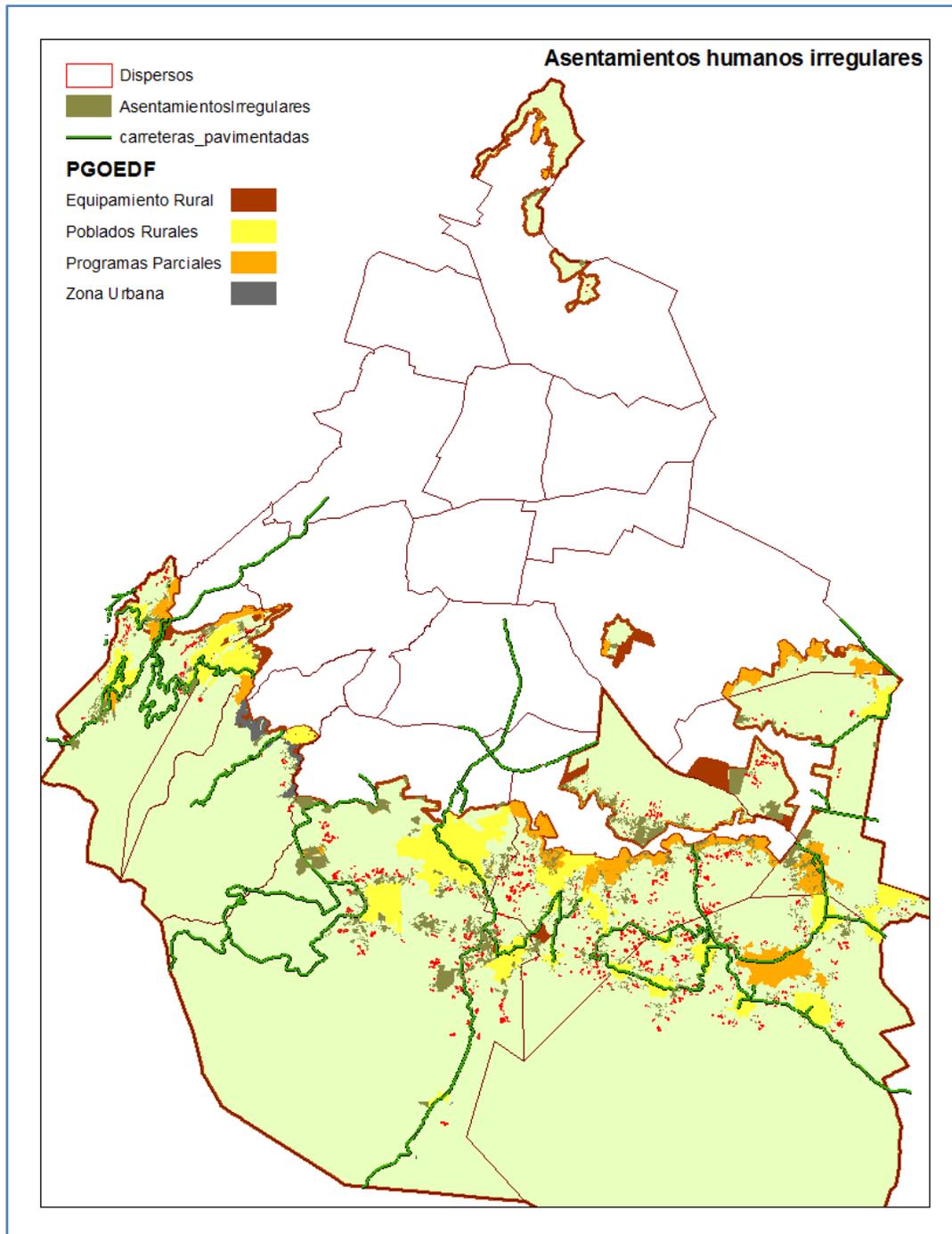


Ilustración 8 Asentamientos humanos irregulares dispersos.

En términos generales el perfil de polígonos dispersos se caracteriza por estar conformado por polígonos de tamaño muy pequeño en comparación con el promedio. En promedio un polígono del perfil disperso tiene una superficie de 0.17ha, mientras que el promedio general es de 0.6ha por polígono.

8. Conclusiones

A continuación se muestra una tabla en donde se muestra un resumen de las superficie y número de polígonos asociado a cada perfil.

Perfiles	Superficie (Ha)	Número de polígonos	Porcentaje superficie	Porcentaje polígonos
Contenidos	108.54	347	4%	7%
En los límites de Poblados Rurales, Programas Parciales, Equipamiento Rural, Zonas Urbanas y Colindantes con la Mancha Urbana.	1,195.95	536	42%	12%
A distancia menor o igual a 250m	775.22	1,890	27%	41%
A distancia menor o igual a 100m de carreteras pavimentadas	227.89	278	8%	6%
Conglomerados	373.54	445	13%	10%
Dispersos	197.05	1,157	7%	25%
Total	2,878.18	4,653	100%	100%

En la siguiente gráfica de pastel se despliega el porcentaje de la superficie total ocupada por asentamientos irregulares que representa cada perfil, en ella se puede observar que la gran mayoría de la superficie de asentamientos irregulares está en los límites o a una distancia mínima no mayor a 250m de los Poblados rurales, Programas Parciales, Zonas urbanas, Equipamiento rural o en la frontera entre la mancha urbana de la Ciudad y el Suelo de Conservación (69% de la superficie total ocupada por asentamientos). Lo que estos números indican es que la mayor parte de la dinámica de asentamientos irregulares se explica mediante el proceso natural de crecimiento de núcleos consolidados de asentamientos como son los que se encuentran en la Ciudad de México, los Poblados rurales y los Programas Parciales; estos últimos se podrían entender como producto de un proceso de expansión previo tanto de la mancha urbana de la la Ciudad de México, como de los Poblados rurales).

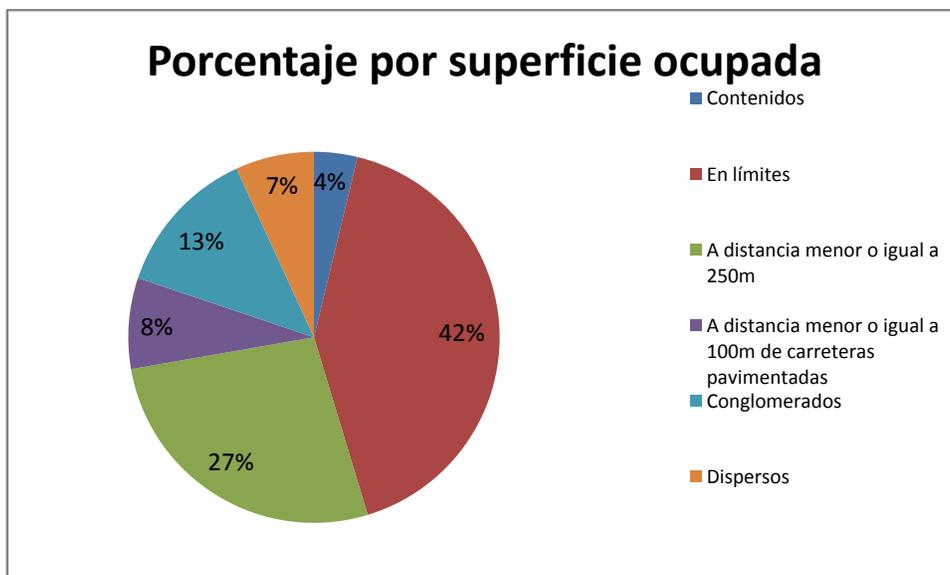


Ilustración 9. Porcentaje del total de la superficie total de asentamientos humanos irregulares ocupado por cada perfil.

La siguiente gráfica complementa a la anterior, en ella se muestra el porcentaje del total de polígonos de asentamientos humanos que abarca a cada perfil.

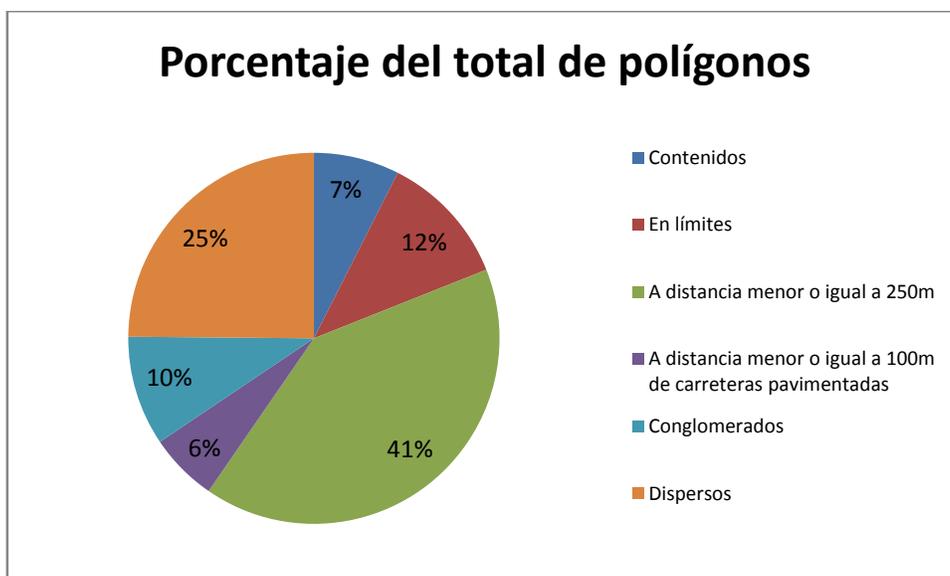


Ilustración 10. Porcentaje del número total de polígonos de asentamientos que ocupa cada perfil.

En conjunto, las dos gráficas anteriores confirman la tendencia referente a que la mayor parte de los asentamientos se encuentra en los límites y una zona no mayor a 250m de las zonas del Programa de Ordenamiento y en la

periferia de la mancha urbana de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (lugares en donde existen asentamientos humanos permitidos y consolidados).

Un caso particular lo representan los asentamientos humanos “dispersos” ya que, aunque ocupan un porcentaje de 7% de la superficie total de asentamientos, representan, en número de polígonos un 25% del total. Estos asentamientos generalmente se ubican en las zonas de “avanzada” de asentamientos humanos o tienden a conformar “archipiélagos” que conectan diversos núcleos de asentamientos humanos; presentan un alto riesgo de afectación al suelo de conservación debido a que, aunque ocupan una superficie menor, tienden a impactar una superficie mayor. En Xochimilco, Tláhuac y Milpa Alta es en donde se presenta la mayor parte de asentamientos dispersos.

A partir de los mapas presentados se observa también que las carreteras pavimentadas funcionan como atractores para los asentamientos irregulares. De manera natural, las carreteras se constituyen en conectores entre núcleos de población y en los mapas se puede observar que en muchos casos se establecen “circuitos” que tienden a llenarse de la periferia (conformada por carreteras y poblados) hacia el interior de la superficie rodeada por el circuito.

Referencias bibliográficas

Programa General de Ordenamiento Ecológico, 2000

GDF, Secretaría de Desarrollo Rural y Equidad, 2006. Atlas de usos del suelo 2006.

Estudio: *Evaluación de la vulnerabilidad ambiental que presenta el suelo de conservación por la pérdida de servicios ecosistémicos a consecuencia del cambio de uso de suelo*

INFORME FINAL
CUARTA SECCION

Noviembre 30, 2010

PRESENTACIÓN

Con la finalidad de facilitar la visualización del contenido y organización del **Informe Final**, la presentación de esta **cuarta sección** comienza con la tabla del Índice de Contenido:

SECCIÓN	ENTREGABLES
Primera sección	Análisis sobre los sitios de mayor aportación de servicios ambientales en términos de almacén de carbono e infiltración Integración de la información colectada en campo, con la ya existente sobre la cuantificación del almacén de carbono e infiltración.
Segunda sección	Diagnóstico general de las condiciones que se presentan en los sitios analizados. Mapa de zonificación de los sitios con mayor aportación de servicios ambientales
Tercera sección	Modelo utilizado para la evaluación del cambio de uso de suelo (selección de variables o categorías) así como la cartografía resultante (imágenes de satélite clasificadas, procesadas). Mapa de zonas con los cambios de uso de suelo más drásticos.
Cuarta sección	Análisis de la vulnerabilidad ambiental que presentan algunas zonas del suelo de conservación en relación a la pérdida de servicios ecosistémicos. Modelo de ponderación de la vulnerabilidad de los sitios. Mapa de vulnerabilidad ambiental del suelo de conservación en relación a la pérdida de servicios ecosistémicos por cambio de uso de suelo.

Respecto al contenido de cada uno de los entregables de esta **cuarta sección**, se tiene que:

Entregable: *Modelo de ponderación de la vulnerabilidad de los sitios;*

Se presenta un documento muy elaborado y trabajado conjuntamente con PAOT, que cumple con las indicaciones de los términos de referencia y del Plan de Trabajo sobre el tema; por lo cual, el documento se denomina igual que el entregable:

- *Modelo de ponderación de la vulnerabilidad de los sitios.*

Entregable: *Análisis de la vulnerabilidad ambiental que presentan algunas zonas del suelo de conservación en relación a la pérdida de servicios ecosistémicos;*

Este entregable se compone de un documento central con la ponderación de vulnerabilidad a partir del insumo principal, las zonas caracterizadas por presentar cambios drásticos; el cual se denomina igual que el entregable.

- *Análisis de la vulnerabilidad ambiental que presentan algunas zonas del suelo de conservación en relación a la pérdida de servicios ecosistémicos*

Con la finalidad de profundizar en el conocimiento de la vulnerabilidad en las zonas de mayor valor ambiental, este entregable incluye una serie de documentos referidos al *sellamiento por asentamientos*; a la ponderación de la vulnerabilidad sólo por asentamientos irregulares; y a elementos determinantes de la mitigación de la vulnerabilidad como son las reservas comunitarias.

- *Cambios drásticos sobre zonas de alto valor ecosistémico por infiltración, captura de carbono y provisión de hábitat*
- *Análisis de amenazas por asentamientos humanos en las zonas de alto valor ecosistémico*
- *Análisis del Sellamiento que presentan en el 2010 los asentamientos humanos, ubicados en el suelo de conservación*

Entregable: *Mapa de vulnerabilidad ambiental del suelo de conservación en relación a la pérdida de servicios ecosistémicos por cambio de uso de suelo.* Esta cartografía se entrega en impreso y digital.

Cabe aclarar que el Plan de Trabajo apunta a la elaboración de uno o unos mapas síntesis, en concreto señala: “para fines de una mejor transferencia y comunicación de los resultados de las líneas de investigación “pueden integrarse en uno o varios ‘mapas síntesis’, bajo un criterio rector: que expresen la vulnerabilidad de los sitios con mayor valor ambiental”.

De aquí que el resultado sea un conjunto de mapas, uno por *carbono almacenado*, otro por *infiltración* y uno último por *provisión de hábitat*. Los cuales corresponden al mencionado entregable.

Estudio: *Evaluación de la vulnerabilidad ambiental que presenta el suelo de conservación por la pérdida de servicios ecosistémicos a consecuencia del cambio de uso de suelo*

INFORME FINAL: CUARTA SECCION

Modelo de ponderación de la vulnerabilidad de los sitios

Noviembre 30, 2010

PRESENTACIÓN

El propósito de este esfuerzo consiste en conocer las áreas del suelo de conservación del Distrito Federal que aportan más servicios ecosistémicos, en términos de infiltración, almacenaje de carbono y provisión de hábitat,¹ e identificar aquellas que son más susceptibles al cambio de uso de suelo y con ello, a la pérdida de servicios ecosistémicos. De hecho, los Términos de referencia señalan:

“Se entiende por vulnerabilidad el grado de susceptibilidad que tiene un ecosistema, como resultado del cambio de uso de suelo, entonces existen muchos factores que vuelven vulnerable un ecosistema; estos cambios pueden implicar una conversión total de un uso de suelo dado, o bien pueden ser modificaciones a pequeña escala.”

El denominado en los términos de referencia: Modelo de vulnerabilidad de los sitios, responde con creces a los criterios establecidos en el Plan de Trabajo: *Diseño preliminar de un modelo de vulnerabilidad de los sitios más conservados y con mayor potencial de almacenamiento de carbono e infiltración.*

Como todo modelo, debe tener un marco conceptual que le dé fortaleza estructural, así como un enfoque, mismo que en este caso, está dado por la perspectiva de PAOT, esto es: los servicios ecosistémicos que este proyecto *espacializa*, vistos desde el punto de vista de su importancia en términos del cumplimiento de los derechos ambientales de la población.

En efecto, un modelo de vulnerabilidad que pretende tanto determinar la localización de las zonas con mayor aptitud para la aportación de servicios

¹ Cabe señalar que en los Términos de referencia se menciona que se trata de áreas conservadas, pero la generalización del término significó que se cambiara por provisión de hábitat, a fin de ser consecuentes con el marco conceptual basado en servicios ecosistémicos, en común acuerdo entre el CentroGeo y PAOT

ecosistémicos² que se abordan en este trabajo, así como la vulnerabilidad que presentan en términos de cambios de uso de suelo, requiere de un marco conceptual que permita liar tanto la enorme relevancia de los ecosistemas para el bienestar de la población y el cumplimiento de los derechos ambientales, como la importancia de los procesos inductores del cambio, tanto negativos como positivos. Razón por la cual, se inicia esta sección con el Marco conceptual, mismo que se sustenta en *Millenium Assessment Ecosystem* (2005).

En el segundo apartado, se presenta el *Modelo de Vulnerabilidad para la identificación de los sitios de alto valor ecosistémico que presentan condiciones de vulnerabilidad* y que se sustenta teóricamente en el apartado que lo precede. Se incluyen convenciones conceptuales que permiten vincular la vulnerabilidad de los sitios de alto valor ecosistémico, ante las amenazas a las que están expuestos. Lo anterior, puede significar el riesgo de cambio de usos de suelo y la consecuente pérdida de servicios ecosistémicos. Se cuenta con un esquema metodológico que permite entender las diferentes fases del *Modelo*, y que condujo a los resultados de este trabajo. Dada la importancia de este apartado, que se conforma como el soporte de todo el estudio, cabe señalar que el Modelo se trabajó de manera muy estrecha con PAOT.

1. MARCO CONCEPTUAL

El denominado suelo de conservación es el único espacio con el que cuenta el Distrito Federal para que su población obtenga servicios ecosistémicos que resultan indispensables, tanto para el bienestar de la población, como en términos de derechos ambientales y para el desarrollo urbano de la ciudad. En este espacio tiene lugar el proceso más importante para la recarga de acuíferos, cuya importancia no es sólo la provisión de agua potable para el Distrito Federal y parte de los municipios conurbados, sino dadas las condiciones del suelo, se configura como el soporte físico de gran parte del suelo de la ciudad.; y dentro de los primeros, zonas importantes para el almacenaje de carbono, más importante para la recarga del acuífero. Asimismo, prevalecen ecosistemas que propician un hábitat favorable para la biodiversidad, como bosques y humedales, éstos últimos se considerados como ecosistemas frágiles.

Este espacio constituye un patrimonio natural privilegiado para los habitantes de la ciudad; incluso, la pérdida o deterioro de sus ecosistemas y servicios, atenta

² En este texto se habla de servicios de los ecosistemas o servicios ecosistémicos, para emular el concepto tal cual lo traduce el modelo del *Millenium Ecosystem Assessment*, que da soporte conceptual a este trabajo. Según Balbanera y Cotler, ambos términos pueden utilizarse indistintamente, aunque difieren en su contexto. Cuando se usa servicios ecosistémicos se quiere enfatizar que es el ecosistema el que permite que los seres humanos se beneficien. Servicios ambientales, otorga más peso al medio ambiente en el cual no se explicitan las interacciones necesarias para proveer dichos servicios. Para algunos autores conlleva la ventaja de que servicios ambientales no considera los llamados bienes ambientales.

contra el derecho constitucional de toda la población a: “un medio ambiente adecuado para su desarrollo y bienestar”.³

A pesar del amplio reconocimiento de los beneficios que se obtienen del suelo de conservación, este espacio está sujeto a numerosas presiones y amenazas que colocan a muchas de sus zonas de alto valor ambiental en una situación de vulnerabilidad ante posibles amenazas de cambios de uso de suelo y pérdida de cobertura forestal y ecosistemas frágiles. De hecho, las actividades humanas han deteriorado de manera creciente los ecosistemas, y con ello han mutilado los servicios ecosistémicos, lo que ha incidido desde diferentes puntos de vista en la pérdida de derechos ambientales de la población. Esto es, se trata de entender no sólo la estrecha relación entre el funcionamiento de los ecosistemas, las inadecuadas decisiones que se toman sobre los mismos, tanto conscientes como inconscientes y las consecuencias sobre el bienestar. De ahí la convicción de utilizar para este trabajo el enfoque que a continuación se plantea.

El marco conceptual que ofrece *Millennium Ecosystem Assessment* (MEA),⁴ coloca al **bienestar humano** como el foco central de cualquier evaluación, y plantea la estrecha relación de dependencia que se da entre la integridad ecológica de los ecosistemas y los distintos componentes del bienestar humano, siendo los servicios ecosistémicos el vínculo entre ambos conceptos.

Los ecosistemas sustentan todas las actividades y la vida de los seres humanos, ya que sus servicios son vitales para el bienestar y el desarrollo económico y social del presente y del futuro, lo que está estrechamente vinculado a los derechos ambientales de la población.

De hecho, el enfoque sistémico que aporta, ayuda a entender que los servicios ecosistémicos no se pueden manejar por separado y que el daño a uno de ellos afecta a todo el ecosistema. Asimismo, permite apreciar que el deterioro no siempre es lineal, en tanto que puede ser acumulativo en el tiempo, lo que pone en juego el bienestar y los derechos ambientales de esta generación, y de las subsiguientes.

La comprensión de los vínculos que hay entre los servicios de los ecosistemas y el bienestar humano, proporciona a los gobiernos argumentos sólidos para justificar la urgencia de cuidar la funcionalidad de los ecosistemas. En paralelo, les permite considerar la sostenibilidad ambiental como política transversal y estratégica para el bienestar presente y futuro de la población. Incluso aporta diferentes respuestas

³ Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos. Artículo 4º.

⁴ Iniciativa auspiciada por la ONU que incorpora a más de una docena organismos internacionales: PNUMA, PNUD, UNESCO, además de la participación de otras organizaciones y el apoyo de convenciones de carácter global (Convención sobre la Diversidad Biológica, la Convención contra la Desertificación, la Convención de Cambio Climático y la Convención de RAMSAR sobre Humedales). En: *Millennium Ecosystem Assessment. 2005. Ecosystems and human well-being. Island Press, Washington, D.C.*

que se pueden adoptar en las escalas local, nacional o global con el fin de mejorar el manejo de los ecosistemas.⁵

Entre las ventajas que ofrece el Modelo se pueden citar:

- a. Permite entender que el bienestar humano puede mejorar mediante interacciones humanas sostenibles con los ecosistemas.⁶
- b. Invita a reflexionar sobre: ¿Qué se puede hacer para conservar los ecosistemas? ¿Cuáles son los hallazgos más sólidos y las principales incertidumbres que afectan la prestación de servicios de los ecosistemas?
- c. Allana el camino para identificar los servicios ecosistémicos que aporta el suelo de conservación, y de éstos, identificar cuáles tienen un carácter estratégico para la ciudad y son decisivos para el cumplimiento de los derechos ambientales.
- d. Posibilita el análisis de cuáles son los servicios ecosistémicos que funcionan cuando los ecosistemas están sanos, y aquéllos que se perciben sólo cuando el deterioro de los mismos se traduce en amenazas y posibles riesgos para la población vulnerable.
- e. Con base en lo anterior, ayuda a distinguir los procesos que determinan, de manera directa o indirecta, el deterioro de los ecosistemas (inductores del cambio).

De hecho, y es lo que hace a este Modelo atractivo para este proyecto, es que ofrece a los gobiernos argumentos sólidos para defender el bienestar social y los derechos ambientales, a partir de la protección de los servicios ecosistémicos, lo anterior se justifica en los siguientes párrafos.

Perspectiva PAOT en el marco conceptual: la preservación de os servicios ecosistémicos está totalmente articulada con la defensa de los derechos ambientales

Cualquier modelo ecológico moderno debería incluir consideraciones sobre la intervención humana en los ecosistemas, a fin de entender los procesos ecológicos en curso y, en consecuencia, tener una mejor dirección en la solución de los problemas inherentes.

Lo anterior se puede entender mejor si se acepta que el medio natural de una región interactúa bajo diversas modalidades con el medio construido, dando lugar

⁵ Millennium Ecosystem Assessment. 2003. *Ecosistemas y bienestar humano: marco para la evaluación.*

⁶ Millenium Ecosystem Assessment, 2005 (a)

a una funcionalidad territorial que algunos autores denominan *Ecosistema Urbano*. La Organización de las Naciones Unidas (ONU) lo define como: “*Una comunidad biológica donde los humanos representan la especie dominante o clave y donde el medioambiente edificado constituye el elemento que controla la estructura física del ecosistema*”.

Este enfoque “facilita el reconocimiento y valoración de los vínculos entre la dinámica urbana y su dependencia de los servicios ecosistémicos y permite comprender el papel determinante de la ciudad sobre la intensidad y las modalidades tanto de los procesos de deterioro de los ecosistemas y sus servicios como de las acciones para su conservación y uso sustentable”.⁷ Resulta fundamental aceptar que las mayores tensiones sobre los servicios de los ecosistemas provienen de las ciudades, lo que como se verá más adelante, ayuda a definir los procesos directos e indirectos que determinan cambio de usos del suelo.

La perspectiva de ecosistema urbano es una herramienta que permite trascender la estereotipada relación campo-ciudad, en la que existe un franco desequilibrio a favor de las zonas urbanas, propiamente dichas, y los espacios de donde provienen los servicios ecosistémicos, mismos que no se han sabido valorar, tal como ocurre en la Ciudad de México y el denominado suelo de conservación, cuyo tratamiento parecería ser de segunda en relación a la “ciudad”. De ahí la importancia de repensar las ciudades como parte integral del ecosistema.

De hecho, el Distrito Federal se encuentra jurídica y artificialmente dividido en suelo urbano y suelo de conservación, siendo que las nuevas acepciones de “lo urbano y lo rural” conciben que los componentes de ambos espacios interactúan y se modifican mutuamente. Bajo este criterio se entiende que la ciudad y el campo han llegado a fusionarse y confundirse, y han rebasado la mítica frontera que los separaba.

El Distrito Federal, en toda su extensión, es totalmente dependiente de los servicios de los ecosistemas que ahí se generan. De ahí la importancia de considerar al suelo de conservación como parte integrante y esencial de la ciudad. El gran reto consiste en la revaloración de ese territorio desde una perspectiva de servicios ecosistémicos.

Por tanto, resulta indispensable empezar por identificar y clasificar los servicios de los ecosistemas, con el único afán de esclarecer cuáles resultan estratégicos para la ciudad y pueden ser considerados como derechos colectivos de la población.

Identificación de los servicios ecosistémicos que determinan directamente los derechos ambientales

⁷ Alejandro Mohar, autor y Yosú Rodríguez (coautor), 2008.

MEA reconoce alrededor de 17 servicios de los ecosistemas.⁸ Sin embargo, es conveniente a partir de los atributos estructurales y funcionales de los ecosistemas con los que cuenta el Distrito Federal, identificar los que corresponden a este espacio. Posteriormente se analizan cuáles de estos servicios son estratégicos para el bienestar y los derechos ambientales de la población, lo que sin duda aporta elementos para una mejor toma de decisiones.

En el esquema siguiente, se presenta una clasificación de los servicios de los ecosistemas del MEA 2005, pero ajustada al ámbito del suelo de conservación y considerando, además, sólo aquéllos servicios que se estima que:

- i. son estratégicos para la viabilidad de la ciudad;
- ii. son básicos para asegurar el bienestar y los derechos ambientales, y por tanto, se conforman como derechos colectivos, toda vez que la protección es para evitar la merma a derechos de un grupo de personas en un lugar y tiempo determinado.

El resto de los servicios de los ecosistemas, particularmente los de abasto (alimentos, madera, medicamentos, combustibles entre otros) no se pueden considerar estratégicos, ya que su producción, dado el tamaño del suelo de conservación, no es relevante para toda la población; si en cambio los de soporte, que son aquellos indispensables para la existencia de los demás servicios de los ecosistemas. Por ejemplo: provisión de hábitat, producción de biomasa, de oxígeno, formación y retención del suelo, el ciclo de los nutrientes, el ciclo del agua.⁹

⁸ Según Millenium Ecosystem Assessment, 2005 Los servicios de los ecosistemas son: regulación de calidad del aire, regulación del clima, ciclo del agua, abastecimiento de agua fresca, regulación del flujo del agua, purificación del agua, recursos genéticos, regulación de plagas y enfermedades, polinización, alimentos, fibras y materias primas no alimenticias, biomasa, medicamentos, regulación de erosión, ciclo de nutrientes, regulación de peligros naturales, recreación y ecoturismo.

⁹ Millennium Ecosystem Assesment 2005.

A continuación, se describen los servicios estratégicos de los ecosistemas desde dos perspectivas: aquéllos que se perciben cuando los ecosistemas están en buenas condiciones, que se pueden denominar explícitos, y los que se “descubren” cuando los ecosistemas están deteriorados y se relacionan con amenazas y posibles riesgos naturales para la población vulnerable. Incluso, el deterioro de los ecosistemas se puede traducir en el incremento de la intensidad de las amenazas naturales. De hecho, estos últimos sólo se hacen visibles en la ciudad, cuando por causas de deterioro o mal uso de los ecosistemas se hacen evidentes, tales como hundimientos del suelo, inundaciones, y los efectos que genera la contaminación. Incluso, no sólo cumplen con sus funciones sino que incrementan el problema.

Según definen los términos de referencia de este estudio, se trata de identificar las zonas que tengan aptitud para:

- a. Infiltración de agua: refiere los siguientes servicios: disponibilidad de agua en cantidad y calidad, y mitigación de hundimientos e inundaciones.
- b. Almacén de carbono: mitigación de gases de efecto invernadero.
- c. Bosques densos y humedales: provisión de hábitat para la biodiversidad.

Queda claro que los servicios ecosistémicos no se pueden fraccionar y que se trata de ecosistemas complejos, en donde el todo es más que la suma de sus partes, y en donde lo que ocurra en cualquiera de sus partes afecta al todo; sin embargo, su disección es útil para el análisis y la gestión de los mismos. Asimismo, procurar la protección de aquéllas zonas más importantes para ciertos servicios, conlleva la protección del todo. Este estudio se ocupa de los servicios ecosistémicos que a continuación se detallan:

a. Relacionados con la filtración de agua

El suelo de conservación posee un valor estratégico inconmensurable para la ciudad, dada su capacidad para la recarga del acuífero que provee la mayor parte del agua que consume el Distrito Federal y algunos municipios conurbados, ello en función de que en este espacio coinciden los siguientes atributos:

- La mayor parte de la precipitación se recibe en la parte oeste y sureste de la cuenca; es decir, en las sierras de las Cruces, Ajusco y Nevada, donde se llegan a registrar más de 1,200 mm de lluvia al año, mientras que en las partes más bajas y centrales, se reciben entre 500 y 800 mm. al año.¹⁰
- El sustrato permeable de las montañas que se localizan en el suelo de conservación permite la filtración de agua a los acuíferos.
- La presencia de cubierta vegetal y suelos de bosque son elementos que aseguran las posibilidades de infiltración para captar y retener la gran cantidad de agua que llega en poco tiempo.
- La mayor superficie de suelo sin sellar se localiza en el suelo de conservación.
- Ahí también se localizan 17 de los 18 manantiales con los que cuenta el Distrito Federal.

Disponibilidad de agua en cantidad y calidad

La recarga del acuífero es el servicio de los ecosistemas que presenta con mayor claridad e intensidad su carácter de bien e interés público, ya que significa la respuesta a una necesidad vital de los habitantes de toda la ciudad. Como se señaló, en el suelo de conservación es donde más agua se infiltra de la ciudad y de los municipios que sirve la misma red. De hecho, durante los últimos años, de los acuíferos que recargan mayoritariamente en el suelo de conservación, se atiende el consumo de entre 60 y 70 por ciento de los habitantes de esta región.

Más aún si se considera que cada vez más, el agua se coloca como uno de los recursos más críticos para la ciudad, desde diferentes puntos de vista:

- i. La falta de agua constituye el mayor limitante para el desarrollo urbano; incluso ya es insuficiente y su dotación es inequitativa.
- ii. La insuficiencia del DF en este rubro y la importación del recurso de otras cuencas, con los consabidos impactos ambientales y políticos.

¹⁰ Estudio sobre el acuífero

Mitigación de hundimientos

Un nivel adecuado de los mantos acuíferos sobre los cuáles se asienta la ciudad, permite su estabilidad física;¹¹ sin embargo, como se trata de acuitados (antiguo lecho lacustre en el fondo de la cuenca) comprensibles en función de la cantidad de agua, se presentan hundimientos diferenciales. Ello es así porque:

Las arcillas de la Cuenca de México (miden entre 10 y 130 m) tienen entre 8 y 10 partes de agua por cada porción sólida (son excepcionalmente comprimibles cuando no tienen agua”, lo cual se considera como excepcionalmente poroso. Esta propiedad hace que el acuitado quede especialmente susceptible a compactarse y agrietarse ante la pérdida de humedad. Una construcción sobre arcillas, que normalmente experimentaría contracciones de 2.5 cm. en otras regiones del mundo, en la Ciudad de México, se compactaría 25 centímetros.¹²

O sea, el bombeo profundo y la sobre explotación de los acuíferos, sumados al progresivo sellamiento de zonas de recarga,¹³ y las fuerzas verticales de las construcciones generan fracturas y hundimientos diferenciados en la ciudad, con las consecuentes amenazas a la integridad física de las personas, así como su **bienestar, patrimonio y economía.**

De hecho el problema ambiental más grave del Distrito Federal y de algunos de los municipios conurbados es el hundimiento del terreno.¹⁴ Lo anterior, ha significado la construcción de obras de drenaje sumamente complejas que se vuelven insuficientes cuando hay lluvias torrenciales. De ahí la importancia de favorecer la infiltración de agua en el suelo de conservación.

Mitigación de inundaciones

La mayor parte de los 700 milímetros de agua de lluvia que caen anualmente en la región se concentra en unas cuantas tormentas intensas provocando inundaciones en diferentes sitios de la ciudad. En particular, la parte de la ciudad que se

¹¹ Parte de las formaciones superficiales del suelo de la Ciudad de México, tanto la zona lacustre como la llamada de transición, está compuesto por arcillas sumamente comprimibles

¹² Elena Burns, 2010. Repensar la Cuenca: la gestión del ciclo del agua en el Valle de México. Universidad Autónoma Metropolitana, México, DF

¹³ El hundimiento varía entre 6 y 28 centímetros al año. Una tercera parte de este problema se atribuye a la impermeabilización y dos terceras partes a la extracción (Sheinbaum, 2009).

¹⁴ Gilberto Vela Correa, 2009.

construyó sobre lagos es susceptible a inundarse (zona de acumulaciones de flujos provenientes de las partes altas). En estas zonas el problema se puede presentar por las escorrentías, fallas en el sistema de drenaje y alcantarillado (obstrucción por residuos, rompimiento de ductos, etc.) o en casos de una lluvia extraordinaria donde el sistema de drenaje de alguna zona en específico se sobrecargue.

“La urbanización de las zonas de recarga daña la capacidad de la cuenca para amortiguar los picos de lluvia. El agua que normalmente habría sido infiltrada por las zonas agrícolas ó forestales, avanza violentamente sobre las zonas urbanas, llegando con fuerza y basura a los poblados de la cuenca baja.”¹⁵

De ahí la importancia del servicio ambiental de regulación de los escurrimientos superficiales que propinan los bosques del suelo de conservación, misma que se vuelve deficiente por la deforestación.

Sin retención suficiente, se acelera el escurrimiento superficial, tanto de las lluvias, como de algunas corrientes de agua, lo que genera poca retención y excesivo escurrimiento, y con ello, el deslave de cerros con las consecuentes afectaciones a viviendas que se localizan en zonas de riesgo por este motivo.

Captura de carbono (CO₂)

La captura de carbono es un servicio global que se considera como una medida de mitigación ante el cambio climático. Este servicio se define como: “la extracción y almacenamiento de carbono de la atmósfera en sumideros de carbono a través de un proceso físico o biológico como la fotosíntesis”.¹⁶

El suelo de conservación es el único espacio del Distrito Federal en el que de alguna manera se pueden efectuar procesos de captura y almacenaje de carbono, por lo que el cuidado de los ecosistemas y la recuperación de bosques resultan indispensables para mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero. De alguna manera, la población local se beneficia de este servicio.

El cuidado de este servicio ecosistémico se refleja en la protección de cuencas, bosques y esfuerzos de forestación y reforestación, asimismo, los proyectos de cambio climático generan beneficios para los dueños de los bosques, como el pago por servicios. La alarma temprana sobre el cambio climático es una oportunidad que se debe aprovechar, ya que se ha convertido en un tema político

¹⁵ Elena Burns, 2010

¹⁶ Prompex, 2007, citado en: Zenia Saavedra.

a nivel nacional e internacional y existen fondos internacionales que facilitan el cuidado de las zonas con aptitud para el almacenamiento de carbono.

Provisión de hábitat

Las tendencias espaciales y temporales de los ecosistemas para proporcionar servicios ecosistémicos dependen de qué tanto es posible mantener la elevada biodiversidad, tanto en número como en tipos de especies.

Un hábitat adecuado fortalece a los ecosistemas, e incluso tienden a verse menos afectados por disturbios, tanto humanos como naturales, y a recuperarse más rápido después de éstos. Mientras mayor sea la riqueza y diversidad del ecosistema, los sistemas biológicos tendrán mayor capacidad de mantener la integridad de sus relaciones básicas (resiliencia). Asimismo, la biodiversidad garantiza la presencia de servicios ecosistémicos fundamentales para el bienestar social y los derechos ambientales de la población.

La destrucción y fragmentación de hábitat son procesos fatales para la biodiversidad. De hecho, la biodiversidad está amenazada y ya se ha perdido gran parte de ella. Los cambios en los usos del suelo, como la intensificación de la agricultura y la urbanización, la sobreexplotación de recursos naturales, la contaminación, el cambio climático y la introducción de especies que compiten con la flora y fauna autóctonas, son todos ellos causantes de daños a los ecosistemas naturales.¹⁷

Es en los bosques densos y los humedales donde se encuentra la mayor diversidad de especies y el mayor número de especies endémicas.

¹⁷ Conabio, 2009.

Además de la importante función que cumple la biodiversidad de proveer los servicios de los ecosistemas, la diversidad de las especies orgánicas tiene un valor intrínseco, independiente de toda consideración humana.

Deterioro de los ecosistemas y sus servicios, y su vinculación con riesgos para la población

Los ecosistemas se utilizan para obtener uno o varios servicios, en muchas ocasiones, uno a expensas de otro. Todos los servicios de los ecosistemas estratégicos para la ciudad y que conforman derechos colectivos compiten con otros servicios de los ecosistemas que benefician sólo a algunas comunidades o a ciertos intereses y reducen el flujo de servicios de los ecosistemas estratégicos, atentando contra los derechos colectivos. Es el caso de los taladores clandestinos; de quienes utilizan el suelo de conservación como suelo urbano, trátase de asentamientos irregulares o desarrollos inmobiliarios, e incluso de actividades agropecuarias que utilizan malas prácticas, como uso de fertilizantes químicos o compactación de suelos y que afectan los servicios ecosistémicos que se obtienen del suelo (sostén y suministro de nutrientes, captura de carbono, hábitat para muchos organismos e incluso cimiento para infraestructura urbana).¹⁸ Naturalmente, los usos urbanos y el sellamiento de la superficie constituyen la pérdida irreversible de los servicios de los ecosistemas.

¹⁸ Lo anterior no significa que se deba optar por acabar con la agricultura, pero sí, modificar los sistemas agropecuarios que permitan que los predios dedicados a esta actividad sean proclives a la generación de servicios de los ecosistemas.

Los servicios de los ecosistemas que se obtienen del suelo de conservación, están siendo afectados por actividades humanas más allá de la capacidad auto reguladora de los ecosistemas.¹⁹ Estos procesos afectan los derechos ambientales de la población, tanto por el deterioro y escasez de algunos servicios, como porque el mismo deterioro de los mismos puede traducirse en amenazas y riesgos para la población, en particular la más vulnerable. Atender y abordar estos procesos es esencial para evitar posibles riesgos para la población.²⁰

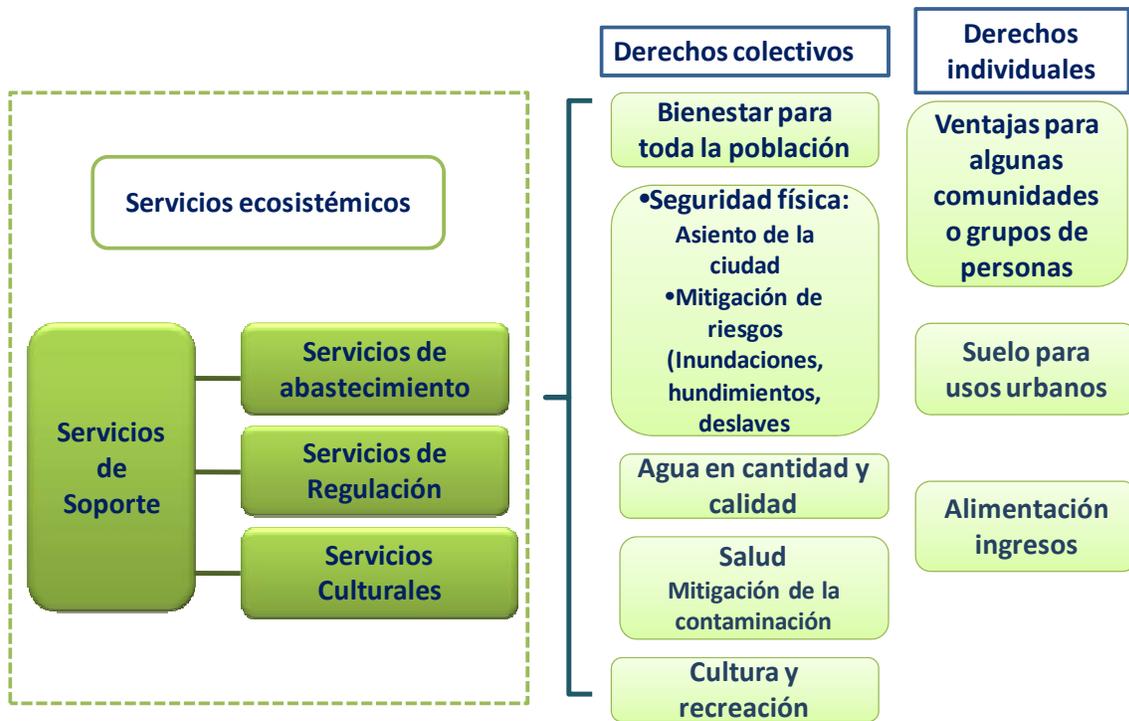
“Las condiciones culturales, económicas y políticas de las sociedades determinan el tipo de decisiones que se toman para manejar los ecosistemas y así promover o afectar (de forma consciente y premeditada o de forma involuntaria) los distintos servicios”.²¹ Este argumento justifica abordar la confrontación que existe entre servicios de los ecosistemas colectivos y los particulares.

En el siguiente gráfico, se presenta una visión de cuáles son los componentes del bienestar que benefician a toda la población, y que se consideran parte del derecho a un medio ambiente adecuado, por lo que también se consideran derechos colectivos para la sociedad. En la otra columna se exponen los servicios de los ecosistemas que, si bien pueden significar medios de vida, ofrecen ventajas sólo a unos cuantos.

¹⁹ Rodrigo Tarté, 2008.

²⁰ C Montes y O Salas. 2007.

²¹ Oscar A. Escolero Fuentes 2009.



Fuente: Adaptación propia de Millennium Ecosystem Assessment. 2005. *Ecosystems and human well-being*. Island Press, Washington, D.C.

El mal uso de los ecosistemas de alto valor ambiental se traduce en riesgos para la población, como pueden ser: a) hundimientos diferenciados de la ciudad; b) inundaciones; c) incremento de la falta de agua para el consumo de la población.

Procesos inductores de cambio en el suelo de conservación

En este espacio convergen intereses antagónicos y actores diversos que generan condiciones para el cambio de uso de suelo, tanto los positivos, como los negativos. Los inductores del cambio funcionan a diferentes escalas y tiempos, y pueden ser directos o indirectos. Los primeros operan *in situ* y pueden ser procesos tales como la tala, el sellamiento que provocan los asentamientos humanos, el uso de agroquímicos, o bien la agroforestería, la reforestación, el cuidado de distintos ecosistemas.

Los procesos indirectos son más difusos y operan como activadores de los directos, pueden tratarse de agentes que actúen en el contexto del suelo de conservación o estar fuera de éste. Es el caso de procesos tales como: Demografía (tasa de crecimiento, distribución de la población, migraciones), entre otros); económico: flujo de capitales, intereses inmobiliarios, actividades económicas; Social (ingresos, opciones de vivienda y crédito para todos los estratos); políticos (intereses electorales, clientelares), entre otros.

Para cumplir con los términos de referencia de este estudio, los inductores de cambio de la metodología que aporta la Evaluación del Milenio, se adecuan conforme al siguiente esquema:

Evaluación del Milenio	Adecuación a este estudio
Inductores de cambio negativos	Amenazas
Inductores de cambio positivos	Protección social

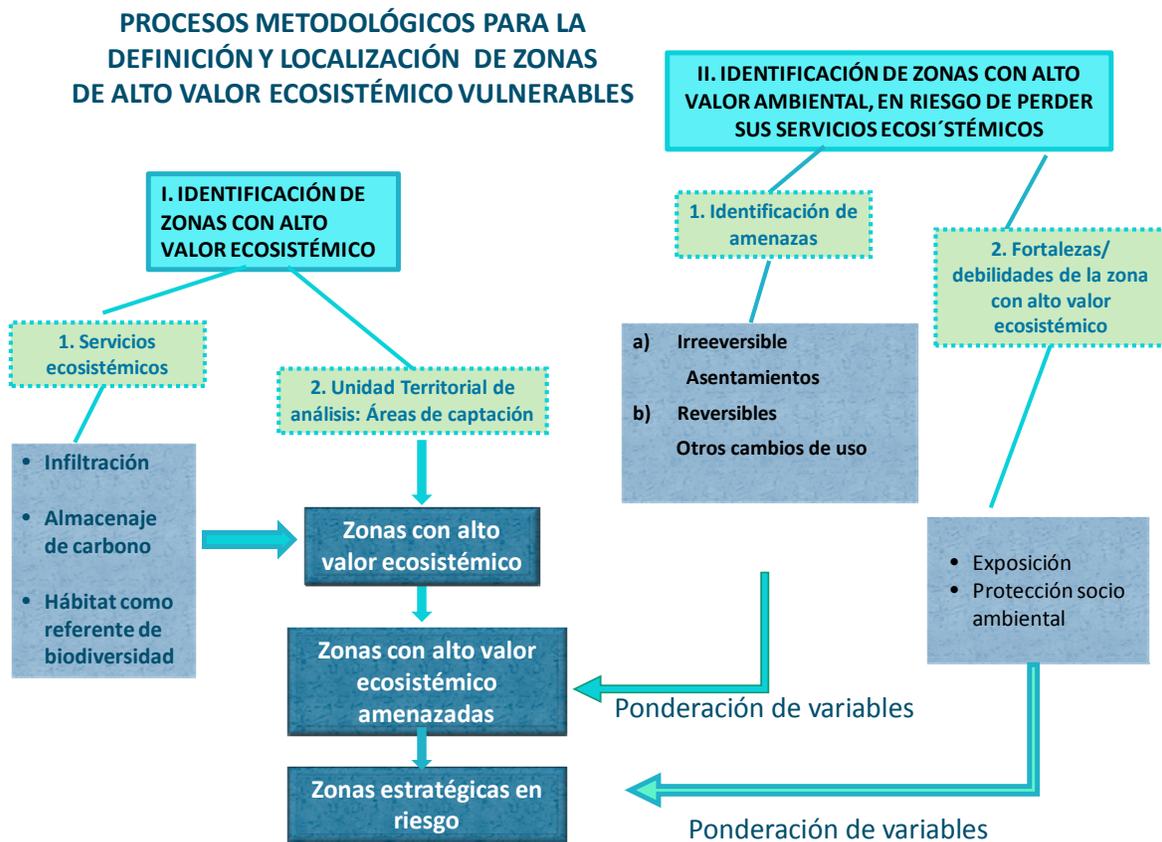
Derivado de este marco conceptual, en el siguiente apartado se presenta el modelo propiamente dicho.

2. MODELO DE VULNERABILIDAD

Este capítulo viene siendo la parte medular de este trabajo, por lo que es importante reiterar que se trabajó de manera mancomunada entre el CentroGeo y la PAOT.

Esquema del modelo de vulnerabilidad

En el esquema siguiente se muestran los resultados tal cual se fueron procesando, ya que como se puede observar, responden a procesos o fases metodológicas.



Se trata de dos grandes bloques, cada uno con dos componentes, mismos que a continuación se desarrollan.

PRIMER BLOQUE: IDENTIFICACIÓN DE ZONAS CON ALTO VALOR ECOSISTÉMICO

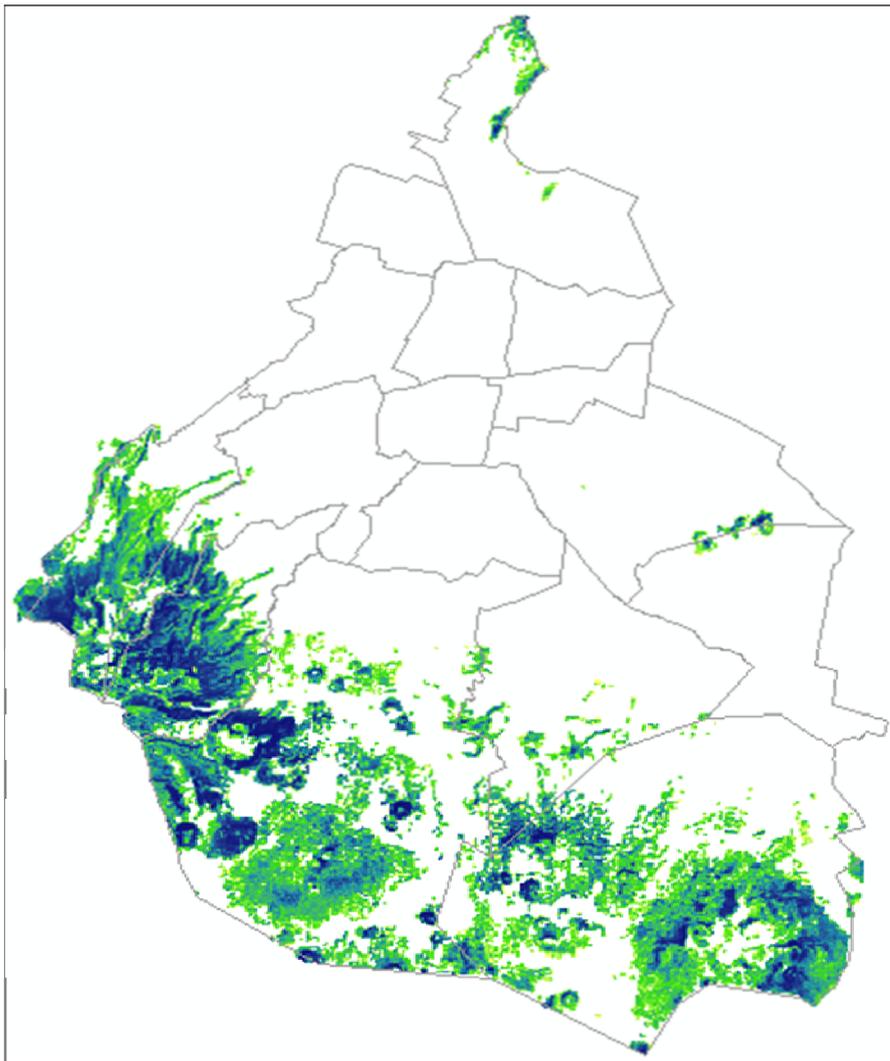
Este bloque se conforma de dos componentes: Localización de zonas de alto valor ecosistémico y zonificación de zonas de alto valor ecosistémico

a. Localización de zonas de alto valor ecosistémico

En esta primera fase, que es la que conlleva la mayor complejidad técnica y que involucró estudios previos de PAOT y la *expertise* de especialistas calificados del CentroGeo, se reconocen los sitios de alto valor ecosistémico, en función de los tres valores que se persiguen: filtración de agua, almacenaje de carbono y provisión de hábitat, que como se mencionó, se expresa a través de bosques de calidad y humedales. Este análisis ofrece información a nivel de píxeles de 1 hectárea, y las metodologías, así como los resultados se presentan en la primera sección de esta entrega.

Con las escalas de valores sugeridas para cada servicio, se procede a crear mapas con gradientes de aptitud en términos de su proclividad para la aportación del servicio que se analice. Un ejemplo se observa en el siguiente mapa

Provisión de hábitat



a. Zonificación de zonas de alto valor ecosistémico

Como parte fundamental del desarrollo e implementación de un sistema de monitoreo, se requiere de la definición de un modelo geográfico que permita la representación de indicadores para diferentes áreas geográficas.²² Por tanto, para este estudio resulta fundamental establecer que para calificar cada polígono, en términos de los tres componentes de zonas de alto valor ecosistémico, se utilizará como plataforma básica la zonificación de áreas de captación, y en cada uno de estos polígonos, se podrán identificar los valores generalizados de dichos componentes. Esta plataforma posibilita que este estudio se replique en el tiempo, y permite la comparación espacial y temporal.

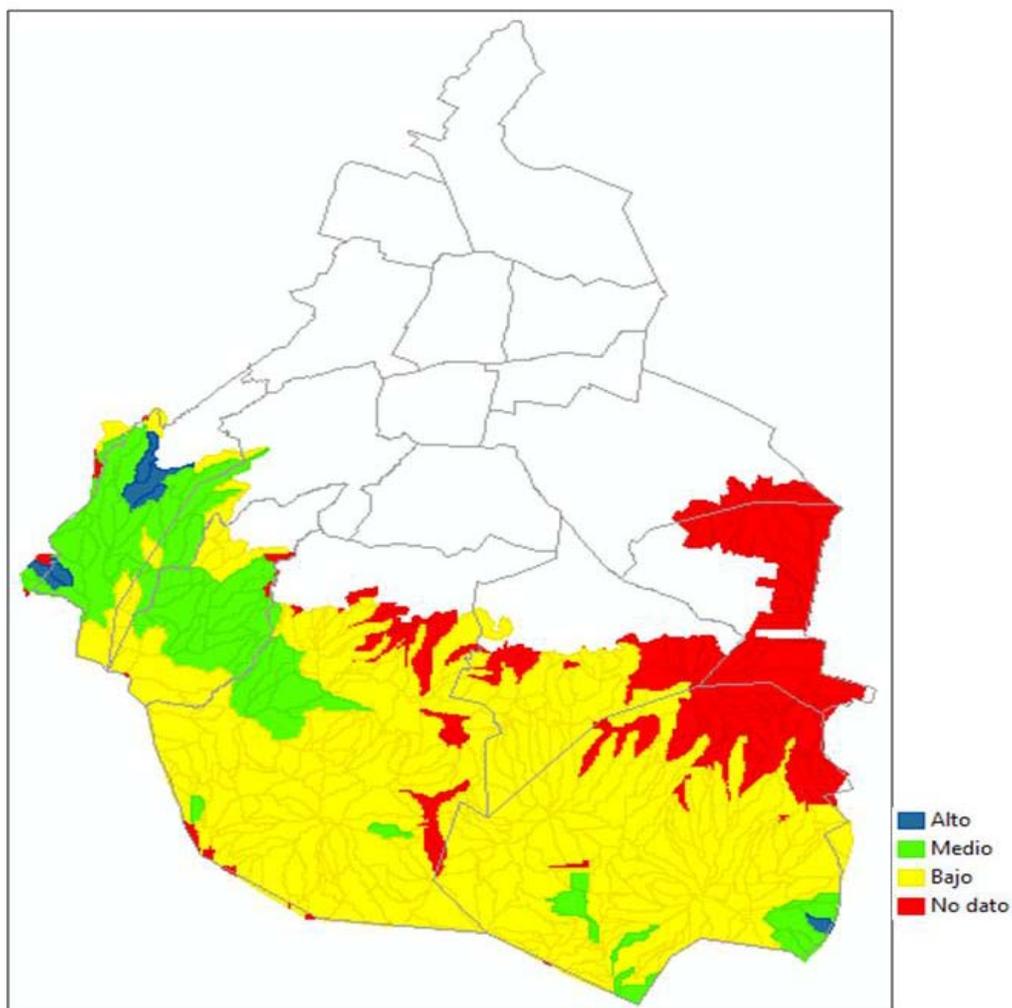
El CentroGeo presentó dos propuestas de áreas de captación. La primera de un promedio de 5 Km, y la segunda con un promedio de 1km. Tanto el CentroGeo como PAOT coincidieron en que los resultados se expresaban mejor con las más pequeñas. La metodología se incluye en la Segunda Sección de esta entrega.

Posteriormente, los valores del primer bloque se exponen a partir de las áreas de captación, mediante un ejercicio de generalización de dichos valores. Esta metodología se presenta en la Segunda Sección de esta entrega. De aquí se

²² Mora et al. 2007

obtuvieron tres mapas, uno por cada servicio ecosistémico, el siguiente mapa es un ejemplo que se incluye con la idea de mejorar la comprensión de este proceso

Almacén de carbono



Asimismo, mediante una matriz tridimensional, se genera un mapa que sintetiza los tres mapas anteriores. Este último mapa no se vuelve a utilizar y sólo queda como un resultado que PAOT puede utilizar para otros usos, no para este proyecto, ya que las amenazas que afectan a los tres servicios ecosistémicos que aquí se analizan, son diferentes para cada uno de ellos. La metodología se incluye en la Segunda Sección de esta entrega.

SEGUNDO BLOQUE: IDENTIFICACIÓN DE ZONAS CON ALTO VALOR ECOSISTÉMICO QUE PUEDEN SER VULNERABLES AL CAMBIO DE USOS DE SUELO

La revisión de metodologías sobre vulnerabilidad develó que son pocos los estudios sobre el tema que tienen como objetivo a los ecosistemas, ya que por lo general se refieren a la fragilidad que puede tener un asentamiento humano de sufrir daños por causas ambientales; de aquí la pertinencia de alinear la propuesta metodológica con el objetivo de este trabajo consiste en: evaluar la vulnerabilidad de pérdida de servicios ecosistémicos por acciones antrópicas relacionadas principalmente con cambios de uso del suelo.

A fin de esclarecer qué se entiende en este estudio por cada uno de los conceptos que se manejan, en especial los polisémicos, se procedió a realizar una propuesta a fin de contar con convenciones del significado de cada concepto. Hay que precisar que se decidió, en los casos que fue necesario, *adaptar* las definiciones conceptuales que abordan los estudios sobre riesgos ambientales y desastres naturales, que estudian las afectaciones a los seres humanos.

Ahora bien, para que ocurra un daño o pérdida parcial o total de un ecosistema asociado a una zona de alto valor ecosistémico, se requieren dos factores: un estado de vulnerabilidad de dicha zona, y una amenaza. Un ecosistema no puede ser vulnerable si no está amenazado y no existe una condición de amenaza si no existe un ecosistema vulnerable a dicha amenaza. En el esquema se expresa este concepto, en el entendido de que desastre natural equivale a cambio de uso de suelo y pérdida de servicios ecosistémicos.

Dicho de otra manera, el riesgo es la probabilidad de que ocurra un desastre, en este caso la pérdida de servicios ecosistémicos, debido a que ese ecosistema no posee la capacidad de protegerse de la fuerza amenazante.²³

En los siguientes incisos se presentan los dos componentes de este bloque: Vulnerabilidad y Amenazas, para posteriormente llegar al proceso de fusión de estos factores con las zonas de alto valor ecosistémico.

Hay que precisar que se decidió, en los casos que fue necesario, *adaptar* las definiciones conceptuales que abordan los estudios sobre riesgos ambientales y desastres naturales, que estudian las afectaciones a los seres humanos.

1. Vulnerabilidad

En los términos de referencia, se entiende por vulnerabilidad el grado de susceptibilidad que tiene un ecosistema, como resultado del cambio de uso de suelo, siendo así, existen muchos factores que vuelven vulnerable un ecosistema; estos cambios pueden implicar una conversión total de un uso de suelo dado, o bien pueden ser modificaciones a pequeña escala.

Esta definición va de la mano con la definición general y flexible, que es adoptó para este proyecto:

*Vulnerabilidad es la propensión interna de una zona de alto valor ecosistémico, o de algunos de sus componentes, a sufrir daños ante la amenaza de cambio de uso del suelo y su consecuente degradación.*²⁴

La revisión de metodologías sobre vulnerabilidad develó que son pocos los estudios sobre el tema que tienen como objetivo a los ecosistemas, ya que por lo general, se refieren a la fragilidad que puede tener un asentamiento humano de sufrir daños por causas ambientales; de ahí la pertinencia de alinear la propuesta metodológica con el objetivo de este trabajo, misma que consiste en: evaluar la vulnerabilidad de pérdida de servicios ecosistémicos por acciones antrópicas relacionadas principalmente con cambios de uso del suelo.²⁵

²³ Vargas 2002

²⁴ Derivada de la definición de Jorge Enrique Vargas, 2002: *Propensión interna de un ecosistema o de algunos de sus componentes a sufrir daño ante la presencia de una determinada fuerza o energía potencialmente destructiva.*

²⁵ CEPAL, 2001.

La vulnerabilidad es un concepto multidimensional que incluye diversos componentes,²⁶ mismos que adecuándolos a los fines de este estudio se sintetizan en:

- i. **Exposición** de la zona de alto valor ecosistémico por estar en el área de influencia de la amenaza. A mayor cercanía, mayor vulnerabilidad
- ii. **Instrumentos e iniciativas de protección socio-ambiental:**

Como la no vulnerabilidad se mide en términos de la protección interna del sitio en cuestión, se consideró que las reservas comunitarias, los proyectos ecoturísticos, la cohesión social del núcleo agrario, los programas públicos, privados o sociales, tales como forestación, reforestación o actividades relacionadas con el rescate o protección, entre otros, significan mayor protección, con la participación de dueños y usuarios de la zona de alto valor ecosistémico; sin estos instrumentos e iniciativas especiales crece la vulnerabilidad.

Hay que aclarar que para este estudio sólo se pudo obtener información de las reservas comunitarias, por lo que es el único elemento con el que se cuenta para acreditar la fortaleza o debilidad de una zona de alto valor ecosistémico.

- iii. **Resiliencia:** no opera para este estudio, ya que no se puede evaluar la capacidad de recuperación de las áreas de más alto valor ecosistémico en lo inmediato.

Identificación de Amenazas

Se explica como un factor de riesgo externo de un sujeto o sistema, representado por un peligro latente asociado con un fenómeno o la combinación de varios fenómenos de origen natural, social o tecnológico, o provocados por el hombre, que puede manifestarse en un sitio específico y en un tiempo determinado, produciendo efectos adversos en las personas, los bienes y/o el medio ambiente.²⁷

En la literatura sobre el tema, se habla de categorías básicas de amenazas: naturales, socio-naturales, antrópico-contaminantes y antrópico-tecnológicas.²⁸ Este estudio, sólo considera las socio-ambientales, y dentro de éstas, la metodología se centra en cambios de usos del suelo, en zonas de alto valor que signifiquen pérdidas importantes de servicios ecosistémicos.

²⁶ Vargas, 2003.

²⁷ Omar Darío Cardona A. 1996

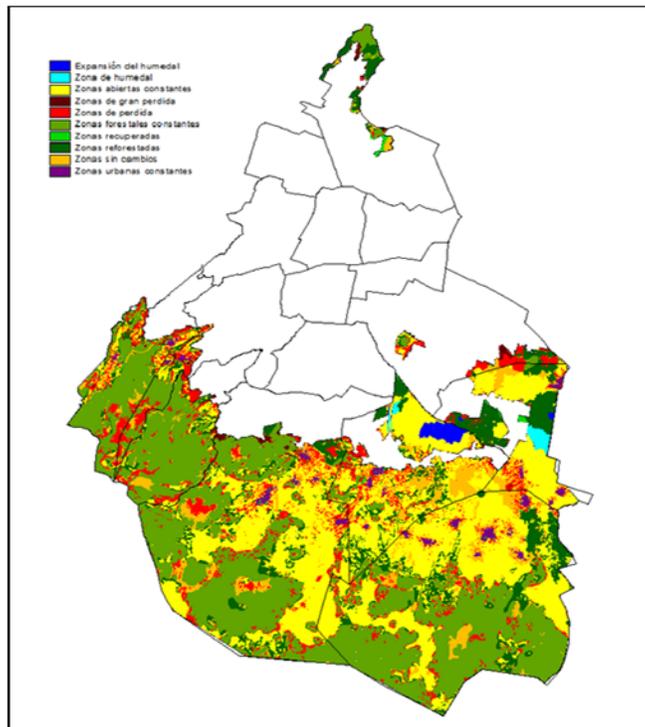
²⁸ Allan Lavell, 1996. “

Por tanto, para este estudio se entenderá como amenaza:

La probabilidad de ocurrencia de que un ecosistema vulnerable pueda ser transformado o dañado por el cambio de uso del suelo, con lo que pierda su capacidad total o parcial para generar uno o varios servicios ecosistémicos considerados como estratégicos para la sustentabilidad de la ciudad y la preservación de los derechos ambientales de sus habitantes.

Para este estudio, se considera que los *cambios drásticos* que refieren los términos de referencia son aquéllos que han significado la pérdida forestal que ha ocurrido de 1970 al 2005, ya sea por cambios de usos de suelo a forestal a urbano, como de forestal a lo que para este estudio se denomina suelo abierto, que puede ser agricultura, pastizales, matorrales, suelo abandonado, etcétera. El resultado de este esfuerzo se observa en el siguiente mapa, en donde las zonas en rojo significan los bosques que se han perdido.

Cambios drásticos



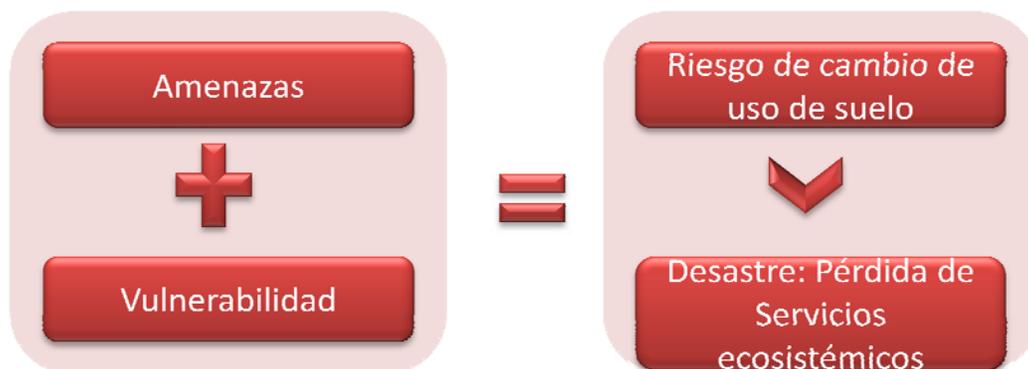
Clasificación de amenazas

Cómo se explicó, las amenazas para este estudio son aquéllas que pudieran generar cambios de uso del suelo. Se clasifican en: irreversibles y reversibles.²⁹ En el caso de estas últimas, hay que considerar que se trata de un proceso de mediano o largo plazo.

- i. Amenazas irreversibles: sellamiento de suelo, lo que comúnmente ocurre por la expansión o densificación de asentamientos humanos, y en menor medida las carreteras. En este rubro también se considera la erosión alta.
- ii. Amenazas reversibles: extensión de la superficie agropecuaria, incendios y tala. Estos procesos se pueden distinguir en el mapa anterior de cambios drásticos, que se entiende en este estudio como pérdida de bosques.

Hasta esta fase del Modelo de Vulnerabilidad, se han determinado cuáles son las zonas de alto valor ecosistémico que se encuentran amenazadas y de éstas, cuáles son aquéllas que se encuentran protegidas (por reservas comunitarias). El paso siguiente consiste en determinar cuáles son las zonas que se encuentran en riesgo. Para ello se abordan los siguientes puntos: riesgo de pérdida de servicios ecosistémicos por cambio de uso de suelo; desastre o pérdida de servicios ecosistémicos; cambios de uso de suelo y finalmente se aborda la ponderación de las variables que permiten valorar la vulnerabilidad de las zonas de alto valor ecosistémico.

No está de más recordar el siguiente esquema:



Riesgo de Pérdida de servicios ecosistémicos

En este trabajo se entiende por Riesgo, la probabilidad de que exista un cambio de usos de suelo, ya que la preocupación esencial de este estudio es la

²⁹ Zenia Saavedra, Lina Ojeda, Faustino López Barrera.

degradación relevante de servicios ecosistémicos en zonas de alto valor, por este motivo. Este concepto se entenderá como:

El cambio de uso de suelo que signifique daño a una zona de alto valor ecosistémico o a cualquiera de sus partes, que signifique una alteración importante a la funcionalidad ecológica del mismo, y con ello se pierdan o degraden los servicios ecosistémicos que brinda.

Asimismo, riesgo es la probabilidad de que ocurra un desastre, en este caso la pérdida de servicios ecosistémicos, debido a que ese ecosistema no posee la capacidad de protegerse de la fuerza amenazante.³⁰

Desastre/pérdida de servicios ecosistémicos

La preocupación esencial de este estudio es la degradación relevante de servicios ecosistémicos en zonas de alto valor, por este concepto se entenderá:

El daño a un ecosistema o a cualquiera de sus partes, asociado a una unidad territorial, que signifique una alteración importante a la funcionalidad ecológica del mismo, y con ello se pierdan o degraden los servicios ecosistémicos que brinda.

Cambio de usos del suelo

Como se menciona en el *Modelo de cambios de uso de suelo*, el sur del Distrito Federal es un sistema frágil que está sujeto a complejas presiones urbanas y cambios de uso de suelo. Se pierden bosques ante la extensión de la frontera agropecuaria; tierras agrícolas son abandonadas y se convierten en espacios idóneos para nuevos asentamientos humanos. Estos fenómenos se ven acompañados de incendios –muchos de ellos intencionales–, así como tala y erosión. Si bien el proceso de deforestación se ha contenido (ver resultados del proyecto: Modelo de análisis tendencial sobre la pérdida de cubierta forestal en el suelo de conservación del Distrito Federal).

El resultado es una cada vez mayor fragmentación de bosques y pérdida de conectividad y calidad de las masas forestales.

Por su parte, se multiplican los asentamientos humanos que sellan espacios vitales para la ciudad por su capacidad para la recarga y se convierten en elementos de presión para el cambio de usos de suelo.

³⁰ Vargas 2002

Estos cambios de uso del suelo afectan fuertemente la calidad de los ecosistemas, que al verse dañados, reducen su capacidad global de generación de servicios ecosistémicos, lo que limita las posibilidades de garantizar los derechos ambientales de los habitantes del Distrito Federal.

Establecidas las grandes componentes del Modelo de cambio de uso de suelo bajo un enfoque de servicios ecosistémicos, más acorde con el Modelo de ecosistema humano y con el enfoque PAOT, se puede ahora, adecuar el esquema de categorías de cambios de usos de suelo comúnmente utilizado. El concepto de cambios de uso de suelo se entiende como el cambio en la cobertura del suelo de una categoría a otra, bajo una lógica más de ecología del paisaje. Para este estudio, el análisis de las categorías se centra en: agropecuario (tierras agrícolas y pastizales), forestal y urbano. Bajo el entendido de que, por lo general, los estudios sobre el tema integran tierras agrícolas abandonadas a pastizales o matorrales, por lo cual, en algunos casos se recurrirá a una categoría más amplia denominada zonas abiertas que comprende las zonas de NO BOSQUE, con algún tipo de cobertura vegetal.

Ponderación de variables

Una vez determinados cuáles son las amenazas que se pueden traducir en cambios de uso del suelo, lo conducente es “cruzar” las zonas de alto valor ecosistémico con sus posibles amenazas. Este paso se tiene que hacer para los tres mapas que contienen las zonas de alto valor ecosistémico, pues como se señaló, trabajar con el mapa síntesis sería inapropiado, ya que las zonas de alto valor ecosistémico son susceptibles a diferentes amenazas. Por ejemplo, un incendio no afecta el proceso de infiltración.

El otro recurso que se usó fue el mapa de cambios de uso de suelo, del cual se extrajo las zonas de pérdida forestal, consideradas en este estudio como cambios drásticos. Está claro que esta pérdida forestal es producto de la extensión agrícola, la tala y los incendios.

Este ejercicio se inició con la intersección, para cada uno de los tres mapas de alto valor ecosistémico, con los cambios drásticos. Se eliminaron las áreas de captación que no se ven afectadas, para posteriormente ponderar el grado de amenaza para cada una de las áreas de captación, en función del porcentaje de superficie que ha sido afectada. De esta manera, cada área de captación presenta un color diferente.

Asimismo, se confrontaron los asentamientos de suelo de conservación con las zonas de alto valor ecosistémico por cada uno de los servicios ecosistémicos.

La última parte del proceso resulta de “confrontar” las zonas de alto valor ecosistémico amenazadas con las reservas comunitarias, con lo que se mitiga la amenaza.

Referencias bibliográficas

- Burns Elena (coord.), 2010. Repensar la Cuenca: la gestión del ciclo del agua en el Valle de México. Universidad Autónoma Metropolitana, México, DF.
- Cardona A. Omar Darío, 1996. "Manejo ambiental y prevención de desastres: dos temas asociados". *Ciudades en riesgos. Degradación ambiental, riesgos urbanos y desastres*. Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina. USAID.
- CEPAL, 2001 Seminario internacional: Las diferentes expresiones de la vulnerabilidad social en América Latina y el Caribe", José Javier Gómez. Vulnerabilidad y medio ambiente, Santiago de Chile, junio.
- CONABIO, 2009. *Capital Natural y bienestar social*. México, DF.
- Escolero Fuentes, Oscar, Martínez, A Sandra E. Kralisch Stefanie, Perevochtchikova María, 2009. *Vulnerabilidad de las fuentes de abastecimiento de agua potable de la Ciudad de México* en el contexto de cambio climático. Centro Virtual de Cambio Climático del Distrito Federal.
- Lavell Allan, 1996. "Degradación ambiental, riesgo y desastre urbano. Problemas y conceptos: hacia la definición de una Agenda de investigación", en *Ciudades en Riesgos*. Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina. USAID.
- México. Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos.
- Millennium Ecosystem Assessment. 2003. *Ecosistemas y bienestar humano: marco para la evaluación*.
- Millennium Ecosystem Assessment, 2005. *Informe de Evaluación (a)*
- Millennium Ecosystem Assessment. 2005. Ecosystems and human well-being. Island Press, Washington, D.C*
- Mohar Alejandro, autor y Rodríguez Yosú (coautor), 2008. "El papel de las ciudades en los procesos causales que determinan el uso y la conservación de la biodiversidad", en: *Capital natural de México, vol. III: Políticas públicas y perspectivas de sustentabilidad*. Conabio, México.
- Montes C y Salas O. 2007."La evaluación de los ecosistemas del Milenio. La relación ente ecosistemas y bienestar humano". En: *Revista Ecosistemas*, septiembre. España.
- Saavedra Zenia, Ojeda Lina, López Barrera Faustino, 2009 "Identificación de áreas de valor ambiental amenazadas y su prioridad de atención en el suelo de conservación del Distrito Federal". Texto inédito de próxima publicación en la revista *Investigaciones Geográficas*, de la UNAM.

- Gobierno del Distrito Federal, Secretaría del Medio Ambiente, 2000. Estudio para la recarga del acuífero. Documento de trabajo.
- Sheimbaum, 2009. Problemática ambiental de la Ciudad de México. UNAM, Instituto de Ingeniería. México DF.
- Tarté Rodrigo, 2008. Reflexiones sobre el tema de los servicios de los ecosistemas y su desarrollo, 28 octubre.
- Vargas Jorge Enrique, 2002. "Políticas públicas para la reducción de la vulnerabilidad, frente a los desastres naturales y socio naturales". *Serie Medio ambiente*, no. 50, Santiago de Chile, CEPAL.
- Vela Correa, Gilberto, 2009. Vulnerabilidad del suelo de conservación del Distrito Federal ante el cambio climático. Posibles medidas de adaptación. Centro Virtual de Cambio Climático de la Ciudad de México.

Estudio: *Evaluación de la vulnerabilidad ambiental que presenta el suelo de conservación por la pérdida de servicios ecosistémicos a consecuencia del cambio de uso de suelo*

INFORME FINAL: CUARTA SECCION

Análisis de tendencias espaciales de asentamientos irregulares

Noviembre 30, 2010

Presentación

En este documento se realiza un análisis de la amenaza que significan los asentamientos humanos para las zonas de alto valor ecosistémico: almacén de carbono, infiltración y provisión de hábitat. En la primera parte del documento, se presenta el Objetivo de este análisis, seguido de la Metodología y al final se incluyen los mapas resultantes expresados en áreas de captación, de donde se pudieron extraer comentarios analíticos y estadísticas. Asimismo, se pueden apreciar mapas de porcentaje de asentamientos humanos por área de captación.

Objetivo:

El presente análisis tiene la finalidad de determinar la amenaza que representan los asentamientos humanos para las zonas de alto valor ecosistémico por almacén de carbono, por infiltración y por provisión de hábitat; todas expresadas en áreas de captación.

Metodología

La metodología básica para definir las amenazas que representan los asentamientos humanos en las zonas de alto valor ecosistémico se realiza de la siguiente forma:

- 1) Determinar las zonas amenazadas por asentamientos humanos.
 - i) Se realiza la intersección de la capa de asentamientos humanos (unión entre la capa de asentamientos irregulares y la capa de suelo urbano obtenida de los usos de suelo 2005) con las capas de zonas de alto valor ecosistémico por almacén de carbono, infiltración y provisión de hábitat (la intersección se realiza con cada capa por separado).
 - ii) Se calcula la superficie (en hectáreas) de los polígonos generados en la intersección.
 - iii) En la capa resultante de la intersección se realiza un *summarize* sobre el campo que identifica a los polígonos de las zonas

- vulnerables (*DRAINID*) incluyendo la suma de los valores sobre el campo superficie.
- iv) En caso de que la tabla correspondiente a alguna capa de zonas de alto valor ecosistémico contenga varios polígonos con un mismo valor del campo *DRAINID*, se hace un *dissolve* en la capa sobre ese campo y se calcula la superficie por área de captación.
 - v) Mediante un *join* se liga la tabla obtenida en el punto anterior con la tabla de atributos de la capa de zonas de alto valor ecosistémico correspondiente (por el campo *DRAINID*).
 - vi) Como una medida de la amenaza por asentamientos humanos para las áreas de captación de las zonas de alto valor ecosistémico se crea un campo "Porcentaje" que se calcula como el porcentaje que representa la superficie ocupada por asentamientos humanos dentro de un área de captación del total de la superficie del área de captación.
 - vii) Se crea una escala cualitativa para determinar la afectación dentro de las áreas de captación (campo "Amenaza") de acuerdo al porcentaje expresado en el campo "Porcentaje", estos valores son:
 - *Porcentaje* >25 %..... Muy crítica
 - Mayor a 20% y menor o igual a 25% Crítica
 - Mayor a 15% y menor o igual a 20% Muy alta
 - Mayor a 10% y menor o igual a 15% Alta
 - Mayor a 5% y menor o igual a 10% Media
 - Mayor a 0% y menor o igual a 5% Baja

2) Determinación de las zonas amenazadas por cercanía de asentamientos irregulares.

- i) Se calcula la distancia mínima entre los polígonos de la capa de zonas de alto valor ecosistémico al polígono de la capa de asentamientos humanos más cercanos.
- ii) Para las áreas de captación que aun no tienen definido un nivel de afectación (*Porcentaje* igual a 0%) se observa la distancia al polígono de asentamientos humanos más cercano. Si la distancia es menor o igual a 250m se considera que el área de captación está amenazada. Así, a las categorías del campo *Amenaza* se agrega el valor:
Si la distancia al polígono de asentamientos humanos más cercano es menor o igual a 250m.....Amenazado por cercanía de asentamientos humanos.
- iii) Aquellas áreas de captación que no tengan un valor para el campo amenaza, son clasificadas como "No amenazadas por asentamientos humanos".

Resultados:

1. Amenazas por asentamientos humanos en las zonas de alto valor ecosistémico por almacén de carbono

En la ilustración 1 se muestra la sobreposición de la capa de asentamientos humanos con la de zonas de alto valor ecosistémico por almacén de carbono. Como se puede ver, los asentamientos humanos tienen un mayor impacto para las zonas de alto valor ecosistémico que tienden a estar dentro de la región poniente del suelo de conservación, en los territorios de las delegaciones Cuajimalpa, Álvaro Obregón, Magdalena Contreras y parte de la delegación Tlalpan (ilustración 2).

La dinámica de crecimiento urbano en esta región se explica principalmente por la expansión de la mancha urbana de la zona metropolitana de la Ciudad de México en el territorio de las delegaciones mencionadas, así como el crecimiento de otros núcleos de población en el suelo de conservación, como son los poblados rurales y zonas destinadas a programas parciales en el Programa General de Ordenamiento Ecológico del Distrito Federal.

Asentamientos humanos y zonas de alto valor ecosistémico por almacén de carbono

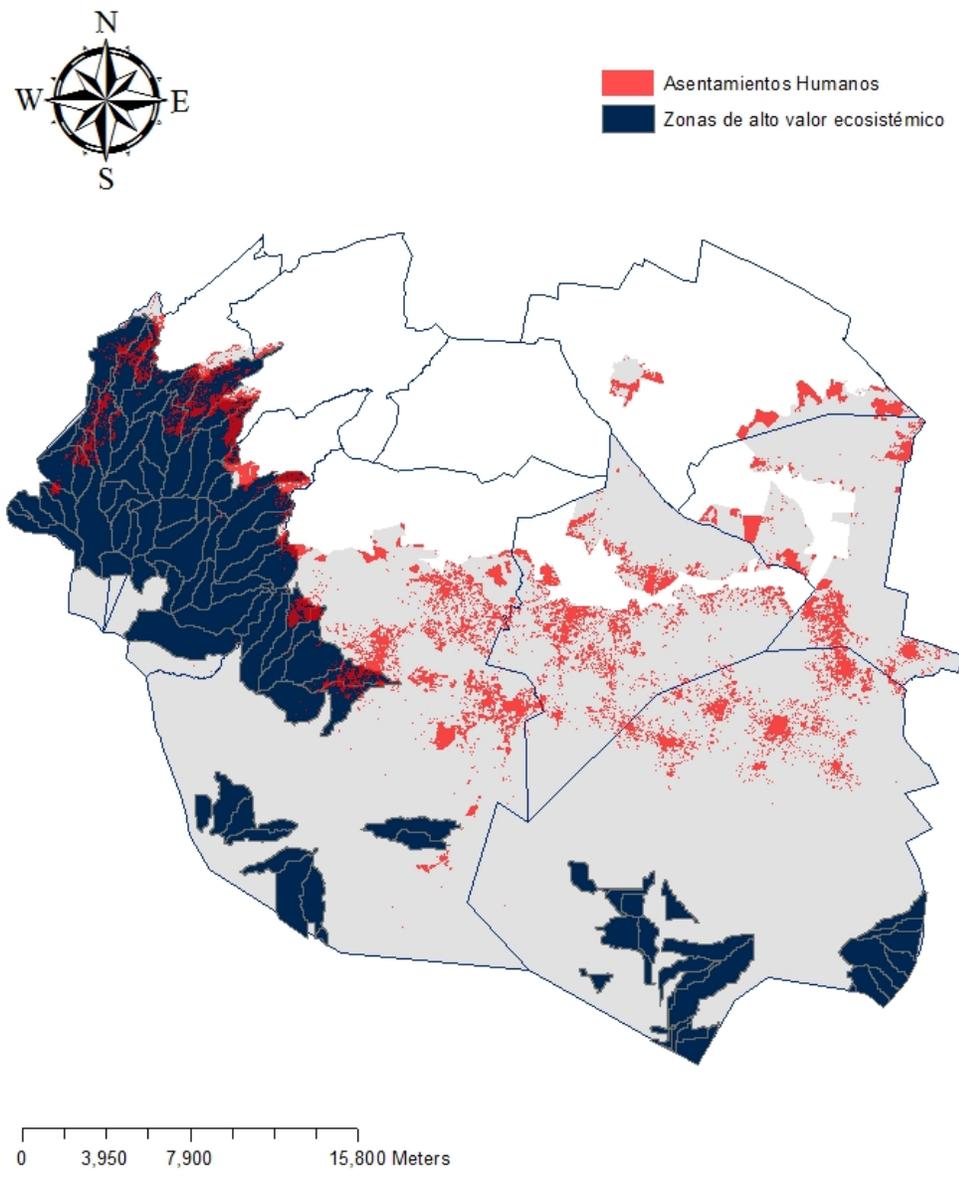


Ilustración 1. Asentamientos humanos y zonas de alto valor ecosistémico por almacén de carbono

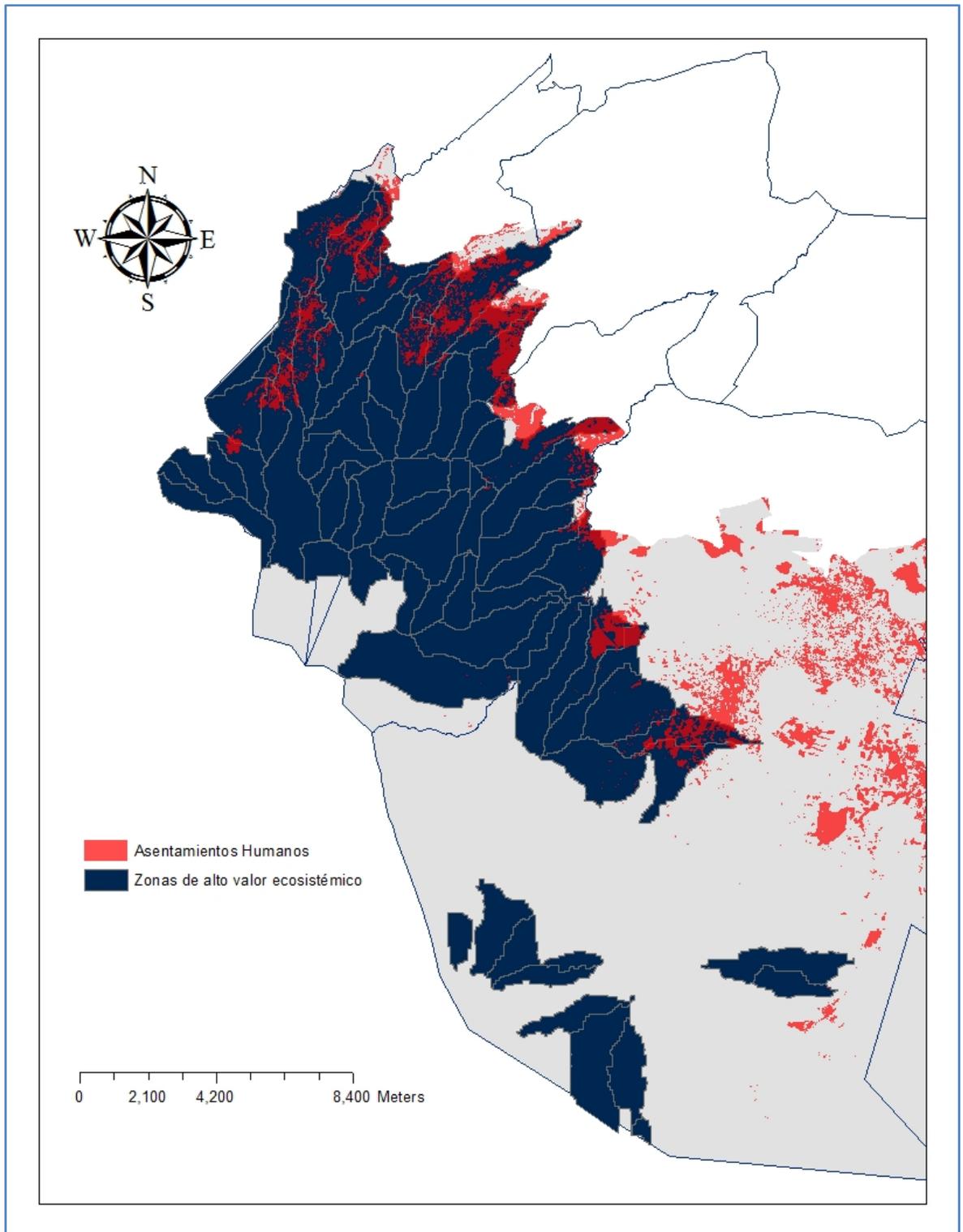


Ilustración 2. Asentamientos humanos y zonas de alto valor ecosistémico por almacén de carbono (Detalle)

Después de aplicar la metodología descrita al inicio del presente documento, se obtuvieron dos mapas referentes a las zonas de alto valor

ecosistémico por almacén de carbono; en uno se expresa el gradiente por el campo *Porcentaje* y en el otro, por la clasificación del grado de amenaza que los asentamientos humanos representan para un área de captación determinada.

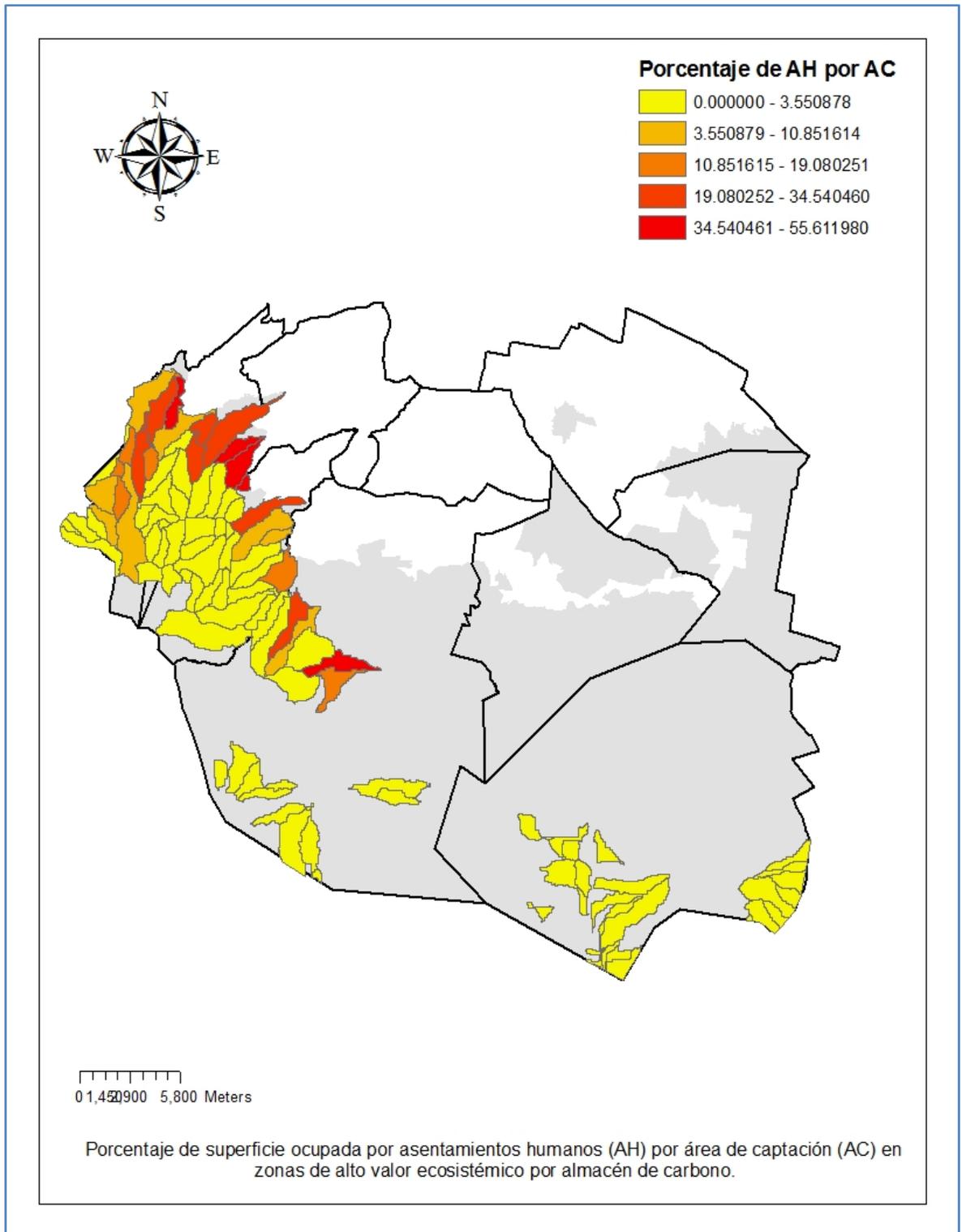


Ilustración 3. Porcentaje de la superficie del área de captación ocupada por asentamientos humanos en zonas de alto valor ecosistémico por almacén de carbono

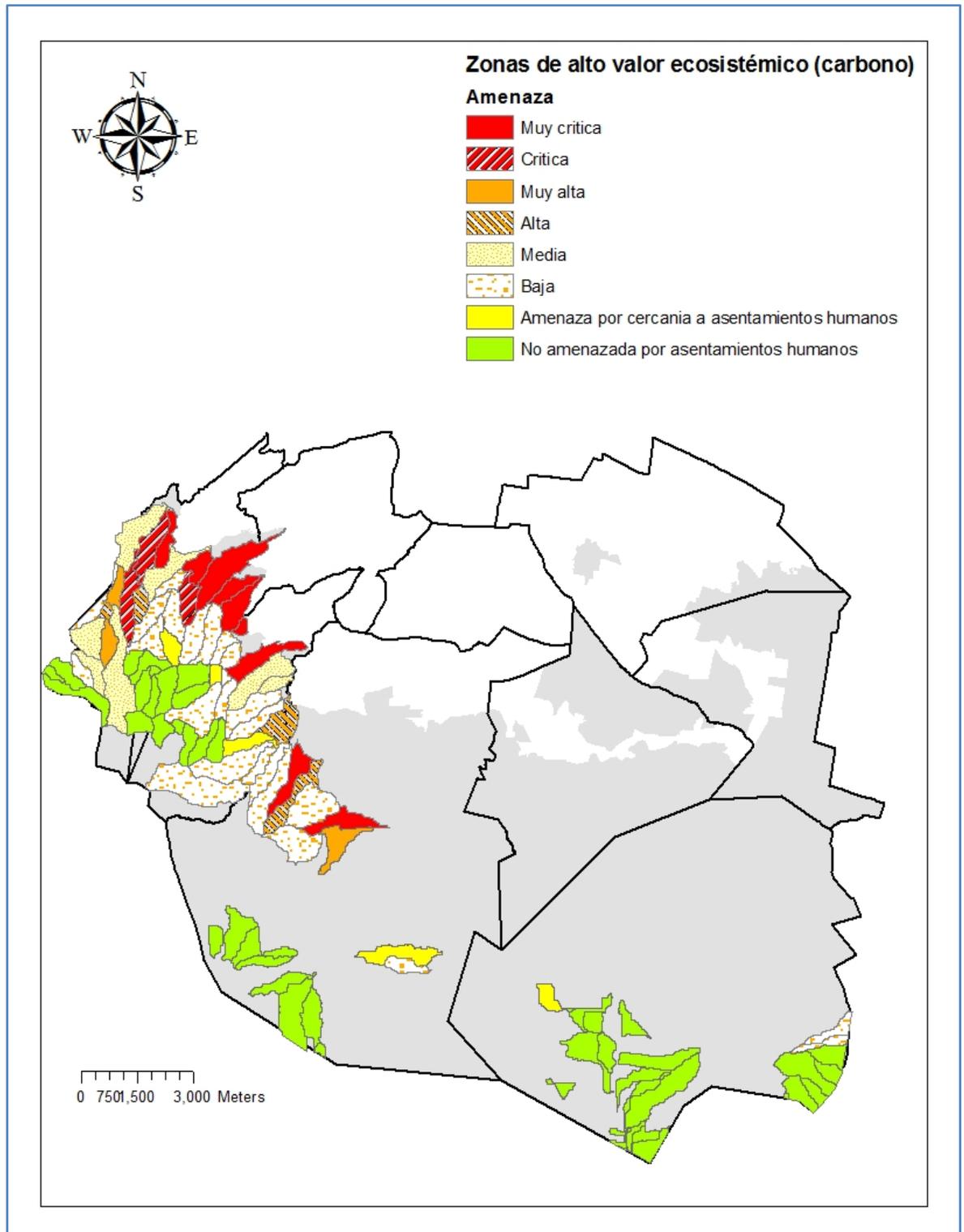


Ilustración 4 Grado de amenaza por asentamientos humanos en las zonas de alto valor ecosistémico por almacén de carbono

En la ilustración anterior, el hecho de que un área de captación determinada aparezca como no amenazada se refiere únicamente a

amenaza por asentamientos humanos. Esto quiere decir que pueden existir amenazas de otro tipo, como puede ser el cambio de uso de suelo a agrícola.

Conclusiones

- La superficie ocupada por las áreas de captación en las zonas de alto valor ecosistémico por almacén de carbono es de aproximadamente 20,296.5ha
- Un total de 12,378.4ha (el 61%) ya tiene asentamientos humanos:
- Las áreas de captación que están a menos de 250m de algún tipo de asentamiento humano suman 820.5ha, lo que representa el 4% del total de la superficie del total de las zonas de alto valor ambiental por almacén de carbono.
- Un 35% de la superficie total de las zonas de alto valor ecosistémico por almacén de carbono, esto es, 7097.5ha no están amenazadas por asentamientos humanos.
- En la zonas de alto valor ecosistémico por almacén de carbono hay 1,380.4 ha ocupadas por asentamientos humanos.

2. Amenazas por asentamientos humanos en las zonas de alto valor ecosistémico por infiltración

En la siguiente figura, se muestra la sobreposición de la capa de asentamientos humanos y la de zonas de alto valor ecosistémico por infiltración.

Asentamientos humanos y zonas de alto valor ecosistémico por infiltración



Asentamientos Humanos
Zonas de alto valor ecosistémico

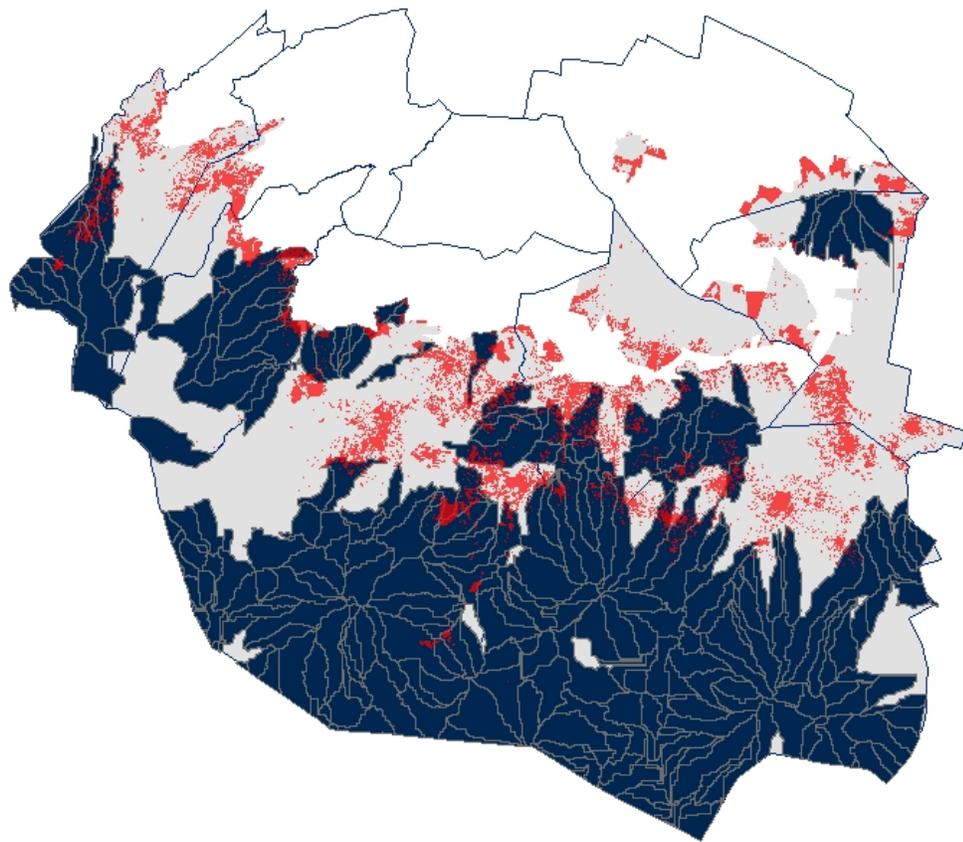


Ilustración 5. Asentamientos humanos y zonas de alto valor ecosistémico por infiltración

Las zonas de alto mayor ecosistémico por infiltración ocupan una superficie mayor y están más uniformemente distribuidas en comparación con las zonas de alto

valor ecosistémico por almacén de carbono. Se observa que la mayor concentración de áreas de captación con alto valor ecosistémico por infiltración se encuentra en la parte sur del suelo de conservación. En la ilustración 6 se muestra que la mayor parte de las áreas de captación con un alto porcentaje de superficie ocupada por asentamientos humanos se encuentra en el suelo de conservación de las delegaciones Cuajimalpa, Magdalena Contreras, Tlalpan y Xochimilco.

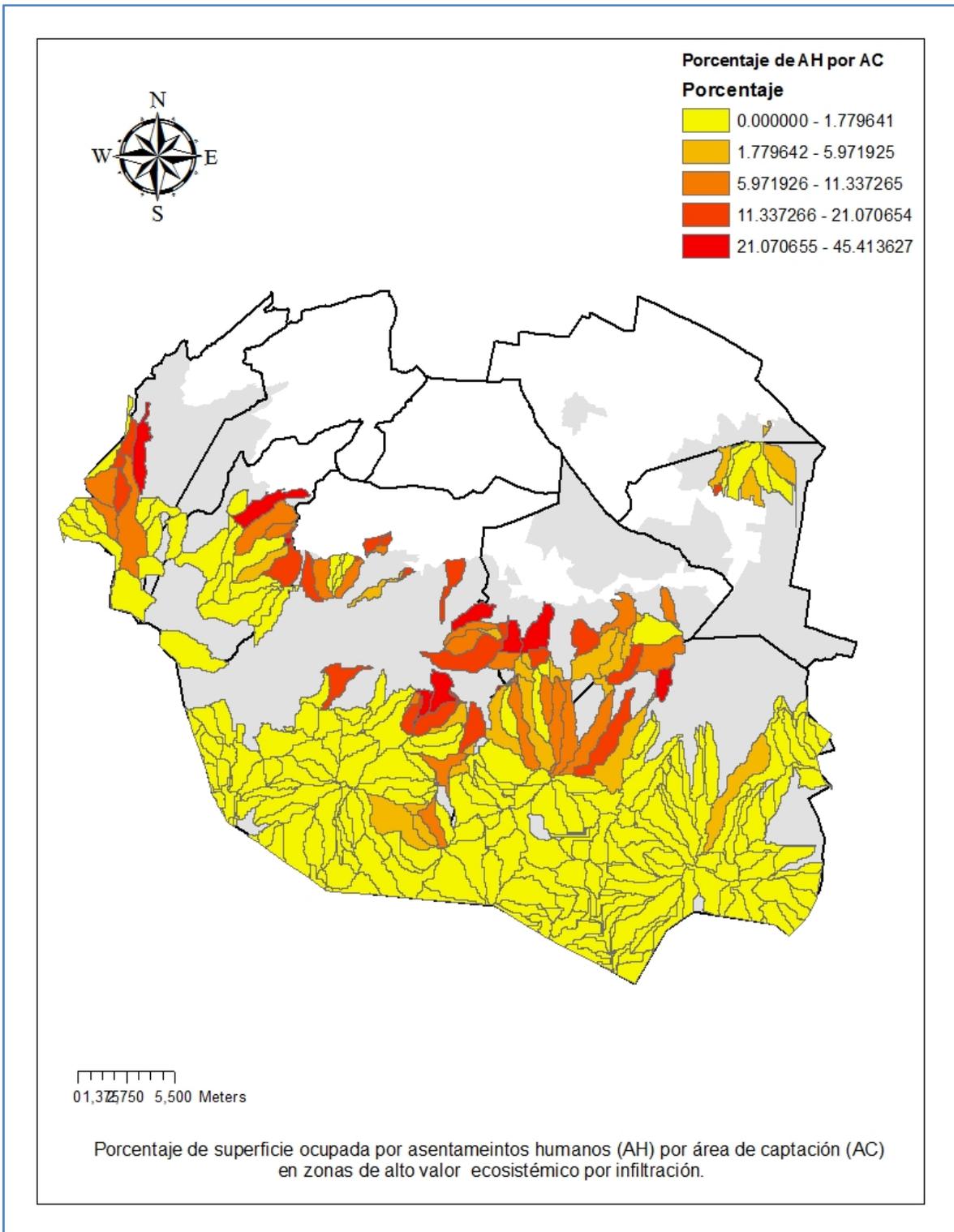


Ilustración 6. Porcentaje de la superficie total del área de captación ocupada por asentamientos humanos en zonas de alto valor ecosistémico por infiltración

En la ilustración 7, se puede observar que en términos generales, al ir recorriendo el suelo de conservación de norte a sur, las amenazas por asentamientos

humanos en las zonas de alto valor ecosistémico por infiltración van disminuyendo en grado, teniendo una buena cantidad de superficie al sur que no está amenazada por asentamientos humanos. Esta lógica responde a la dinámica de crecimiento de la mancha urbana de la ciudad de México que va del norte al sur. También se observa que en los linderos establecidos entre las delegaciones Tlalpan y Xochimilco existe una cantidad considerable de áreas de captación con algún nivel de amenaza por asentamientos humanos (ilustración 8), estas amenazas se deben a la expansión de núcleos de población establecidos en estas delegaciones.

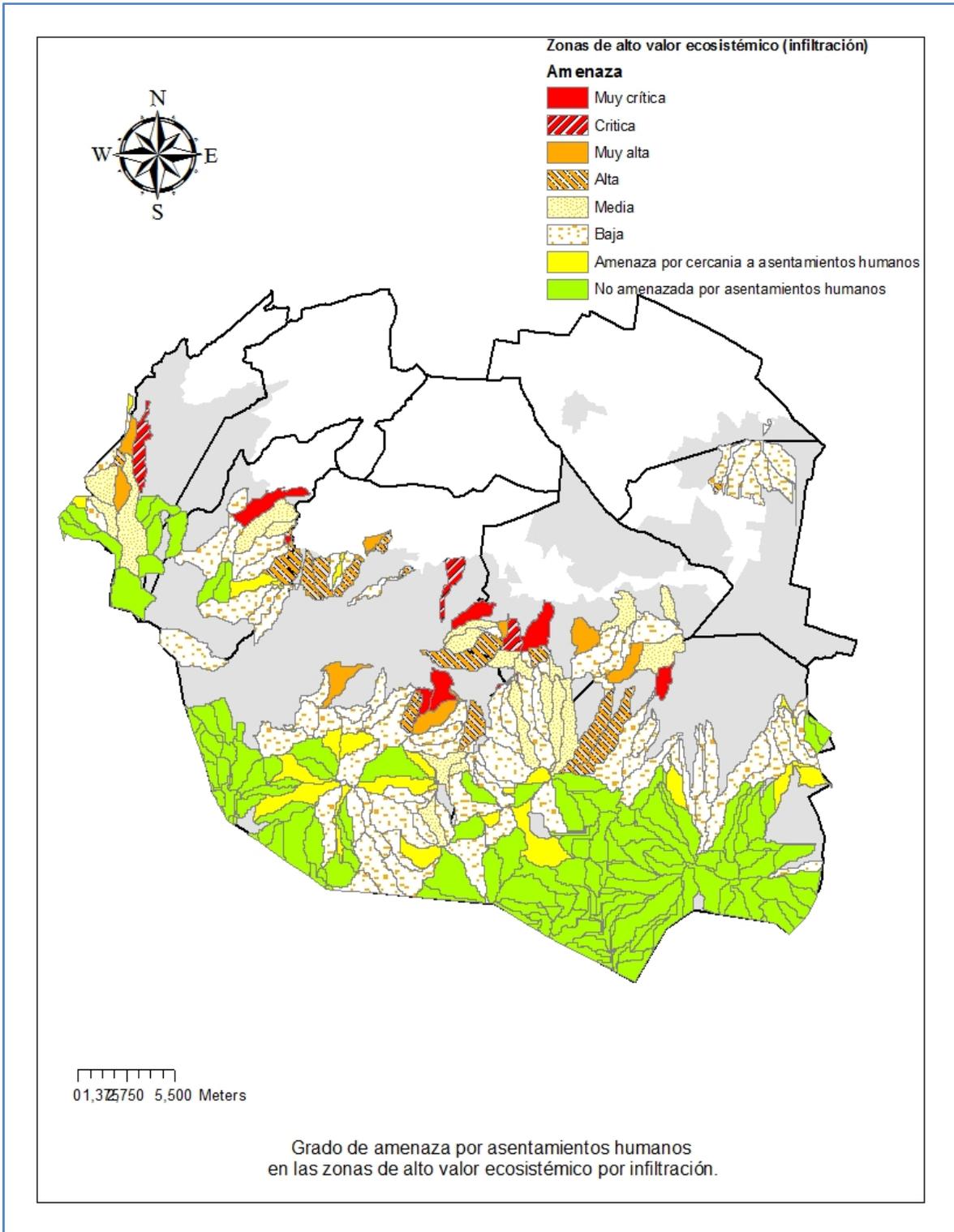


Ilustración 7. Grado de amenaza por asentamientos humanos en las zonas de alto valor ecosistémico por infiltración

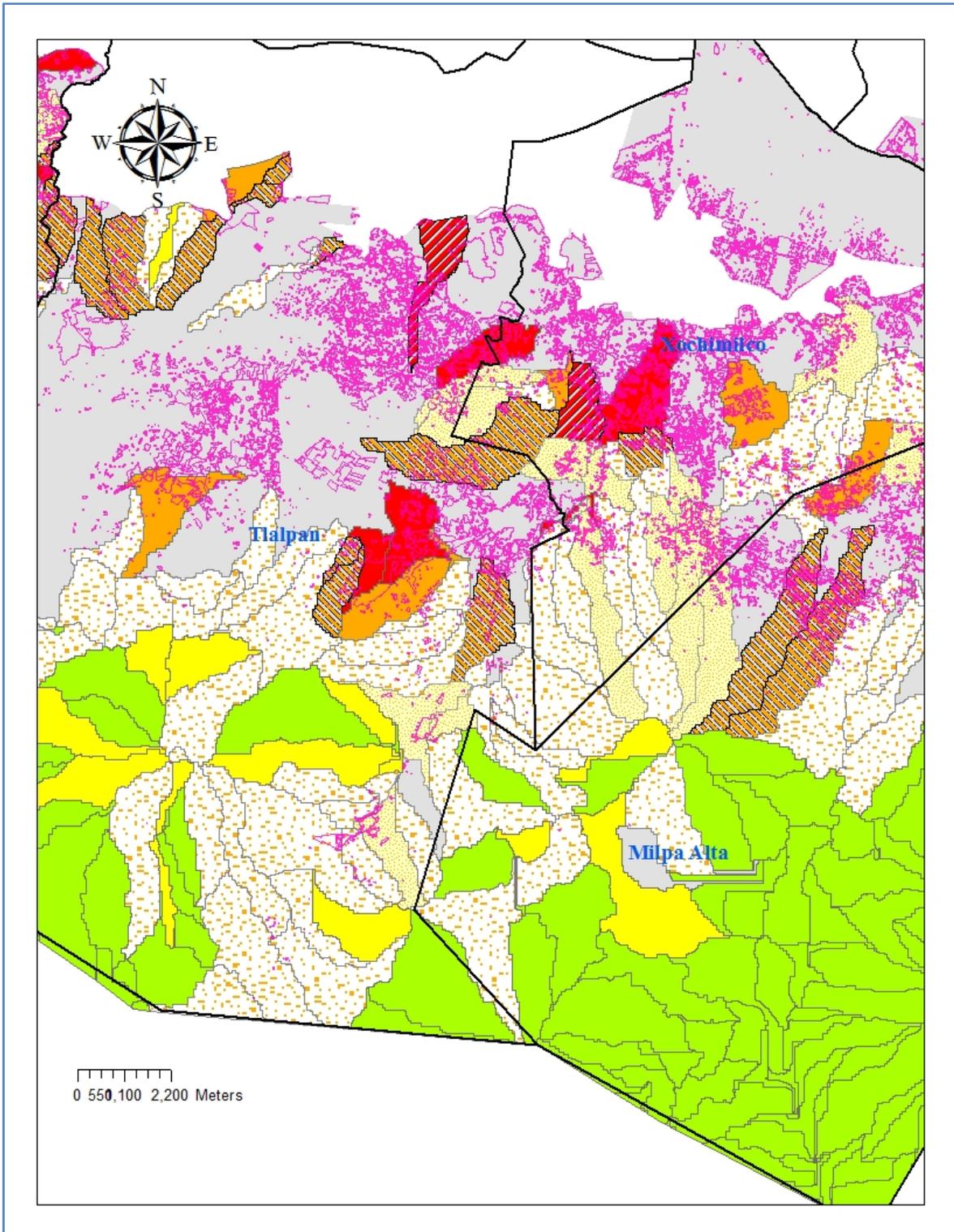


Ilustración 8. Asentamientos humanos en zonas de alto valor ecosistémico por infiltración (Detalle).

Conclusiones

- Las zonas de alto valor ecosistémico por infiltración ocupan una superficie de aproximadamente 51,839.7 ha;
- Las áreas de captación que tienen dentro de sí asentamientos humanos suman una superficie de 28,440.5 ha, aproximadamente el 55% del total de la superficie de zonas de alto valor ecosistémico por infiltración.
- Hay 3,204.1 ha (6%) que ocupan las áreas de captación que, por su cercanía a algún asentamiento humano, pueden verse amenazadas.
- Aproximadamente el 20,195.1 ha (39%) de la superficie total de las zonas de alto valor ambiental por infiltración no está amenazada por asentamientos humanos, cantidad bastante mayor en comparación con la superficie no amenazada por almacén de carbono.
- Existen 1615.1 ha ocupadas por asentamientos humanos en las zonas de alto valor ecosistémico por infiltración.

3. Amenazas por asentamientos humanos en las zonas de alto valor ecosistémico por provisión de hábitat

En la ilustración 9 se muestran los asentamientos humanos y las zonas de alto valor ecosistémico por provisión de hábitat. En la imagen se puede ver que la mayoría de las zonas de alto valor ecosistémico por provisión de hábitat no se traslapan con las zonas de asentamientos humanos. Una hipótesis para explicar este hecho puede ser que son justamente los asentamientos humanos los que amenazan y van destruyendo estas zonas de alto valor ambiental por provisión de hábitat.

- En Cuajimalpa hay zonas de alto valor ambiental por provisión de hábitat que tienen asentamientos humanos dentro de ellas, hecho que indica que son áreas que están sufriendo un proceso de degradación.
- En las delegaciones Álvaro Obregón y Magdalena Contreras, hay zonas de alto valor por provisión de hábitat que son colindantes con la mancha urbana.
- En Tlalpan y Milpa Alta parece que ya se llevó a cabo un proceso de pérdida de hábitat por el crecimiento de diversos poblados y zonas de asentamientos irregulares en esas demarcaciones. Por otro lado, en Xochimilco y Tláhuac, el crecimiento urbano también ha afectado los hábitats (ilustración 12).

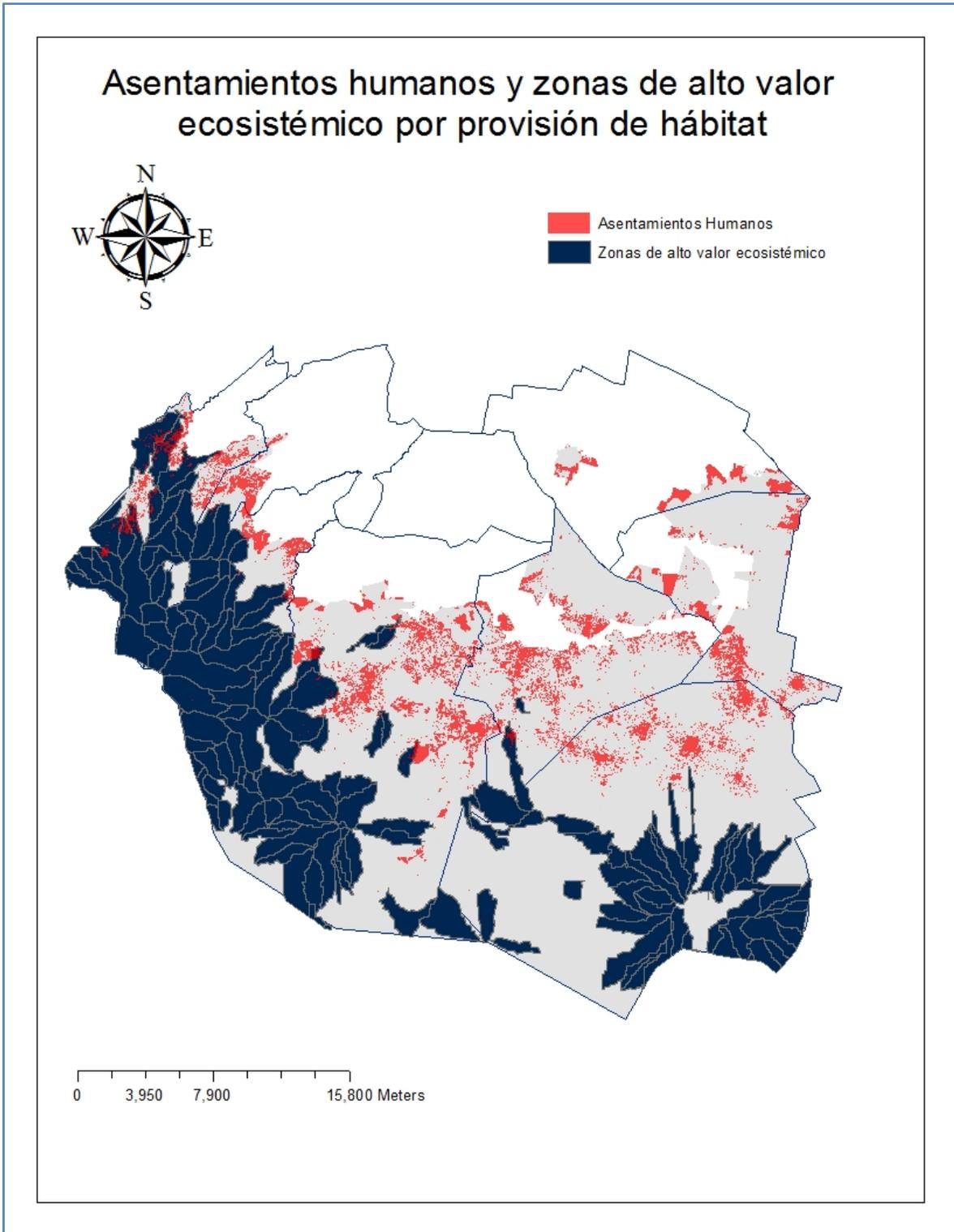


Ilustración 9. Asentamientos humanos y zonas de alto valor ecosistémico por provisión de hábitat

En las ilustraciones 10 y 11 se observa que la mayoría de las zonas de alto valor ecosistémico por provisión de hábitat que están amenazadas de manera crítica

por los asentamientos humanos se encuentran en la delegación Cuajimalpa. En menor medida, también hay zonas amenazadas de manera crítica por asentamientos humanos en Tlalpan.

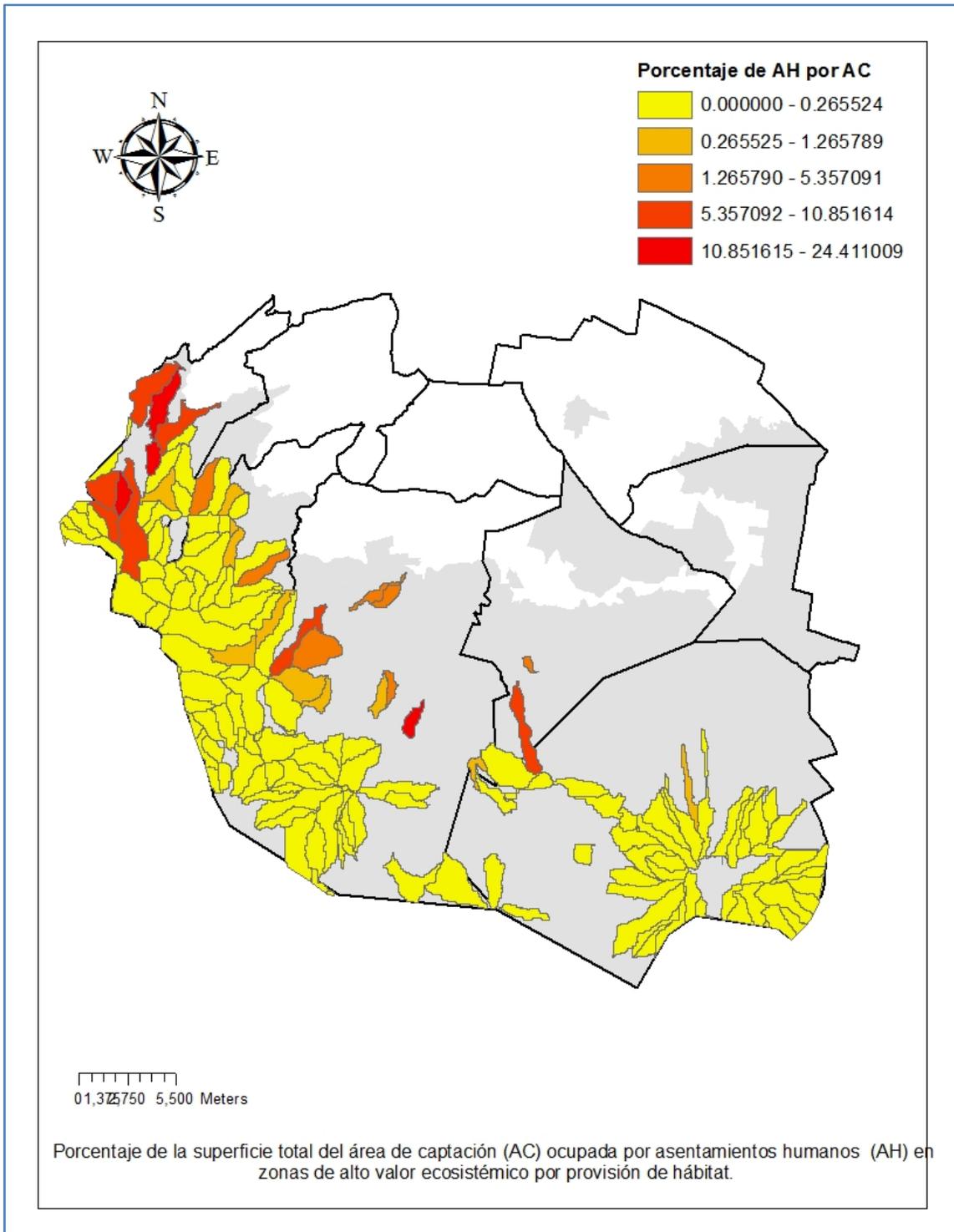


Ilustración 10 Porcentaje de la superficie del área de captación ocupada por asentamientos humanos en zonas de alto valor ecosistémico por provisión de hábitat

En la ilustración 11, se pone de manifiesto el panorama para las zonas de alto valor ecosistémico por provisión de hábitat. En el mediano plazo, una buena cantidad de la superficie ocupada por estas zonas puede pasar a un estado de amenaza crítica.

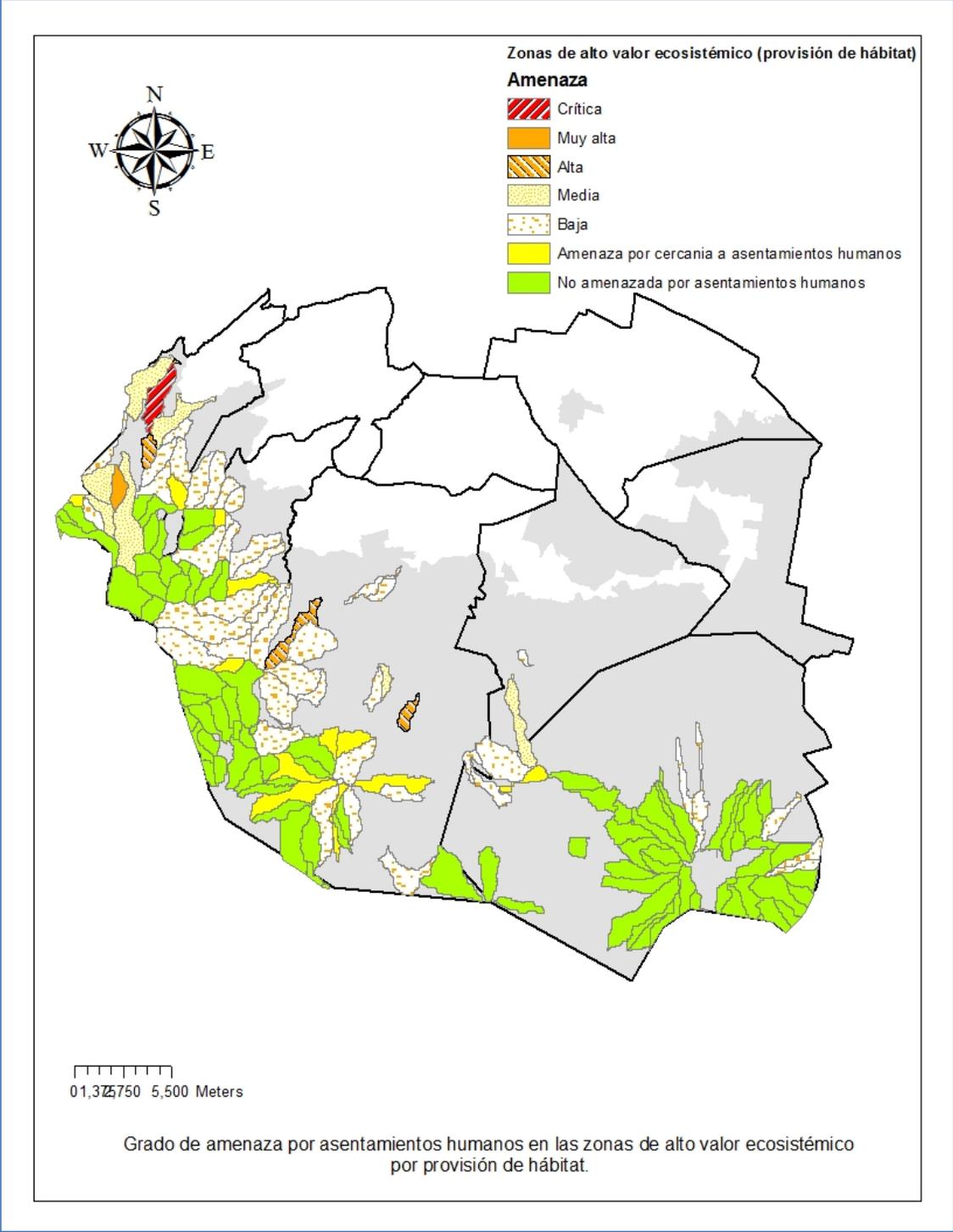


Ilustración 11. Grado de amenaza por asentamientos humanos en las zonas de alto valor ecosistémico por provisión de hábitat

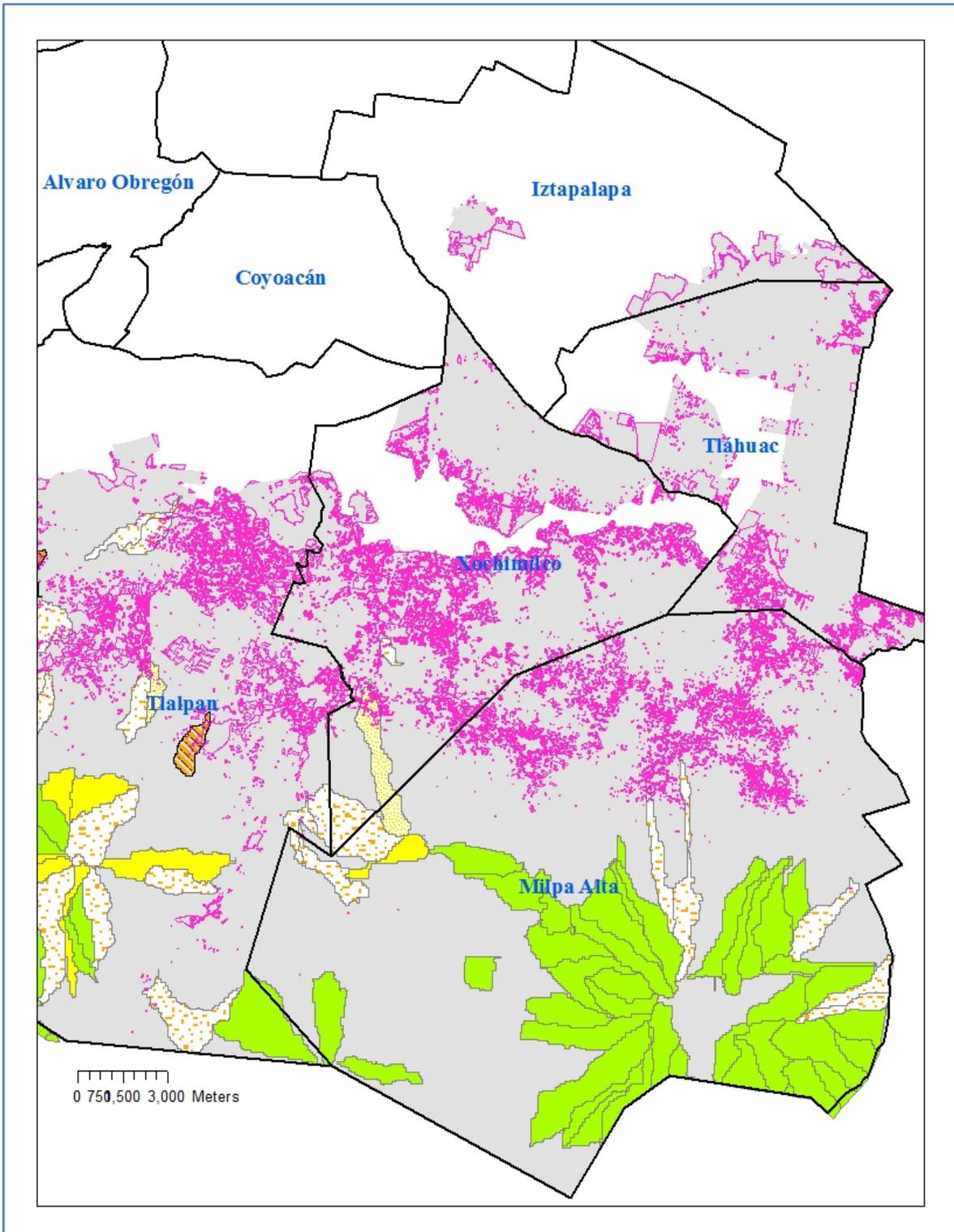


Ilustración 12. Ilustración 10 Asentamientos humanos y zonas de alto valor ecosistémico por provisión de hábitat (Detalle)

Conclusiones

Existen 30,434.2 ha de zonas de alto valor ecosistémico por provisión de hábitat;

Un total de 13,527.3 ha (44%) están en áreas de captación que han sido ocupadas en diferente grado por asentamientos humanos.

En el mediano y largo plazo hasta 2,013.8 ha (7%) podrían verse comprometidas ya que se encuentran en áreas de captación cercanas a algún asentamiento irregular.

Hasta el momento hay aproximadamente 14,893.1 ha (49%) que no están amenazadas por asentamientos humanos. Como se mencionó, la presencia de asentamientos humanos puede ser un hecho indicativo de la destrucción del hábitat, tan solo hay 371.4079 ha de asentamientos humanos en las zonas de alto valor ecosistémico por provisión de hábitat.

Estudio: *Evaluación de la vulnerabilidad ambiental que presenta el suelo de conservación por la pérdida de servicios ecosistémicos a consecuencia del cambio de uso de suelo*

INFORME FINAL: CUARTA SECCION

**Análisis del Sellamiento que presentan en el 2010
los asentamientos humanos, ubicados en el suelo de conservación**

Noviembre 30, 2010

INTRODUCCIÓN

Una de las características más notables del proceso de expansión urbana hacia sus bordes rurales en suelos agrícolas, pastizales e incluso zonas forestales en suelo de conservación del Distrito Federal ha sido la tendencia cada vez mayor a la urbanización. Esto conlleva obviamente, a una aguda y expansiva concentración de la población, generando con ello sellamiento o pérdida de suelos, la destrucción de la vegetación, la extinción de fauna nativa o la contaminación de las aguas y el aire.

El concepto de sellamiento como un proceso de transformación de zonas rurales, implica la eliminación de la vegetación existente, cambios en el uso de tierras para pastoreo o cultivos y la tendencia a pavimentar innecesariamente grandes áreas con calles y aceras y a utilizar sistemas constructivos pesados, asentados sobre el suelo en toda el área de la vivienda, lo que genera concentración urbana, disminución de la recarga por impermeabilización del suelo, invasión del hábitat de especies nativas, provocación de inundaciones aguas abajo y deterioro de servicios ambientales en general

METODOLOGÍA

La contribución de la percepción remota a la planeación y manejo de áreas urbanas se ha estudiado activamente durante los últimos veinte años. En el presente trabajo el modelo V-I-S es empleado para el mapeo de áreas urbanas y la estimación del porcentaje de sellamiento en asentamientos humanos del suelo de conservación del Distrito Federal. Dicha metodología desarrolla el concepto de sellamiento como una combinación lineal de sus tres componentes principales: vegetación, superficie impermeable y suelo desnudo.

El modelo V-I-S (Vegetación-Superficies Impermeables-Suelo Desnudo) describe el ambiente de sellamiento en áreas urbanas como combinación lineal de la vegetación, la superficie impermeable y el suelo desnudo. Como tal, se trata de un modelo que relaciona datos de la cobertura terrestre obtenidos con percepción remota y los aspectos biofísicos de los ambientes urbanos (Ridd, 1995)

En este trabajo en particular el modelo V-I-S fue aplicado a imágenes SPOT-5 de 2010 para la zona sur del Distrito Federal dentro de un esquema jerárquico de decisiones, en el cual cada componente del modelo V-I-S puede ser segmentado con el propósito de identificar áreas urbanas precarias (Figura 1).

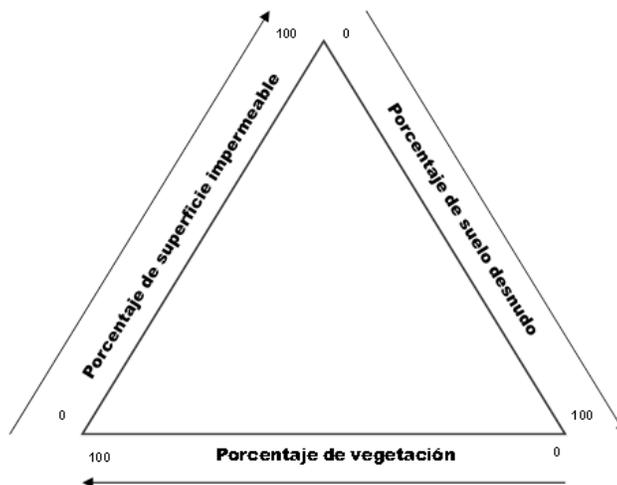


Figura 1. Modelo V-I-S (vegetación, superficies impermeables, suelo desnudo)

El triángulo formado por los diferentes porcentajes de suelo desnudo, superficie impermeable y vegetación, describen diversos ambientes urbanos, que pueden ser clasificados de acuerdo con el concepto de sellamiento. Para ello la metodología propuesta, consiste en elaborar máscaras de vegetación, superficie impermeable y suelo desnudo, a partir de la segmentación de la imagen multiespectral, para con ello estimar los porcentajes de vegetación, superficie impermeable y suelo desnudo que permitan mapear en primera instancia ambientes urbanos y posteriormente sellamiento en asentamientos urbanos mediante el cambio de la composición de los tres componentes del modelo V-I-S.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

La metodología se aplicó utilizando la imagen procesada SPOT 2010, y se valoraron sólo las zonas (polígonos) derivados de dos insumos cartográficos fundamentales:

- Atlas de usos de suelo 2005;
- Y asentamientos humanos irregulares;

De acuerdo con los resultados generados, se obtuvo la estimación del porcentaje de sellamiento para 18 946 polígonos urbanos, que representan el 8.5% del total de suelo de conservación del Distrito Federal.

- Los valores de sellamiento en dichos polígonos cubren un rango de 10 a 71% con un promedio de 24.3% (Figura 2)
- Las delegaciones que muestran un mayor porcentaje de sellamiento corresponden a Álvaro Obregón (28.2%) y Tlalpan (26.5%).
- Mientras que el resto de las delegaciones se encuentra por debajo de la media reportada.
- En cuanto a la extensión que ocupan y el número de polígonos presentes, Xochimilco presenta el mayor número de polígonos urbanos con 5,975 (cerca de la tercera parte del total);
- Tlalpan ocupa la mayor extensión de los mismos con 2 152 ha.
- En suma estas dos delegaciones representan más del 50% de la extensión de polígonos urbanos y son los que mayoritariamente definen el promedio de sellamiento obtenido.

-

En cuanto a los patrones observados en los resultados, se puede identificar un efecto en expansión de la disminución del porcentaje de sellamiento vs el aumento en el número de polígonos cuantificados. Es decir, el sellamiento, se caracteriza por una gran zona urbana central (generalmente Pueblos rurales) con valores altos de sellamiento, rodeada de varios polígonos muy pequeños (asentamientos irregulares), cuyos porcentajes de sellamiento son considerablemente menores

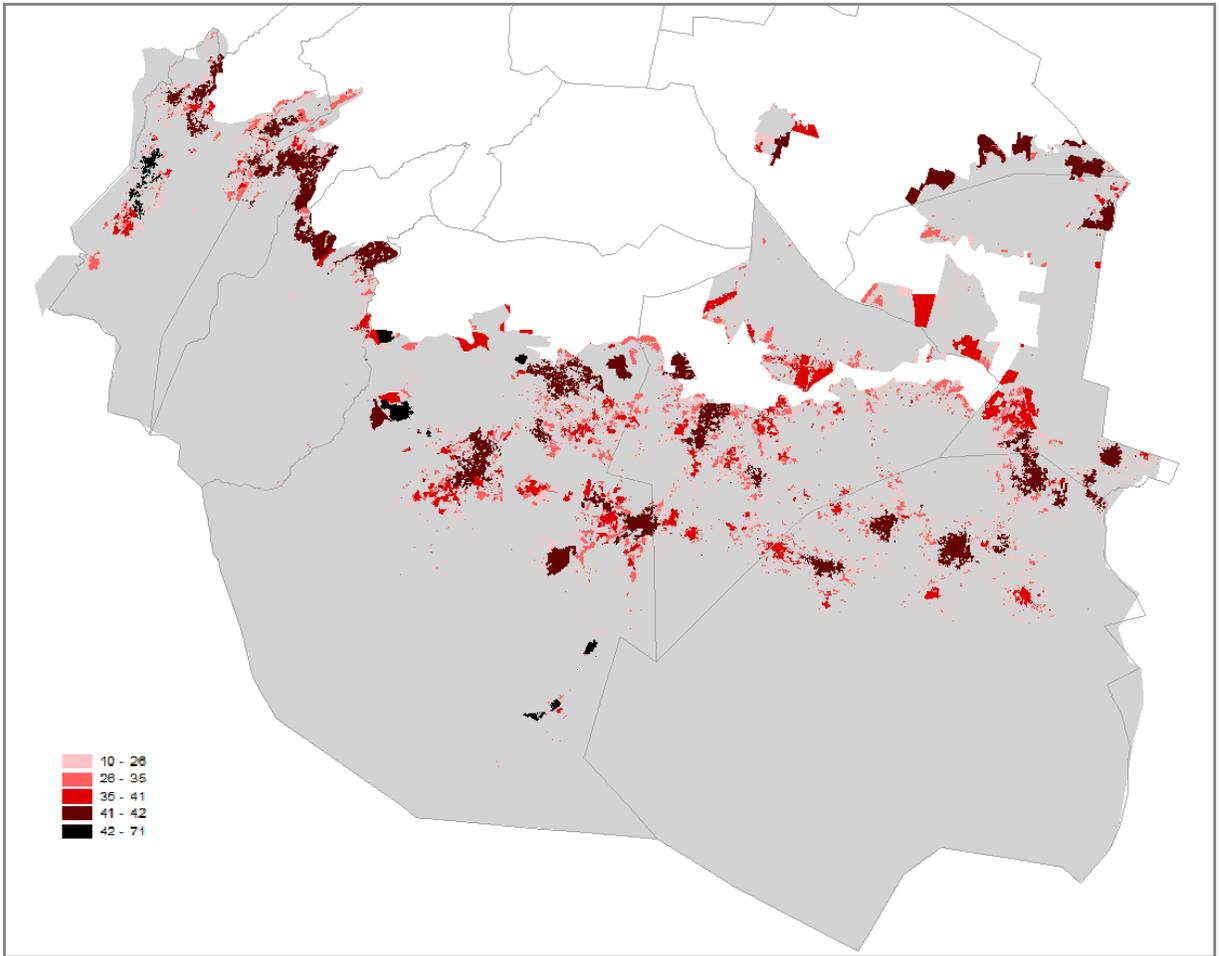


Figura 2. Porcentaje de sellamiento en asentamientos urbanos del suelo de conservación

BIBLIOGRAFÍA

Ridd, M. K. (1995). Exploring a exploring a V–I–S (vegetation–impervious surface–soil) model for urban ecosystem analysis through remote sensing: Comparative anatomy for cities. *International Journal of Remote Sensing*, 16(12), 2165–2185.

Mitigación de la vulnerabilidad

Las políticas de gestión territorial del Suelo de Conservación ya incluyen algunos instrumentos que representan una contención de las amenazas, de tal forma que son una vía privilegiada para mitigar los niveles de vulnerabilidad.

Uno de ellos es el Programa General de Ordenamiento Ecológico que se encuentra en la fase final de su actualización (aprobación por parte de la Asamblea Legislativa), y que probablemente adquiera mayor relevancia en la gestión territorial del Suelo de Conservación.

También está la gama de acciones de la Secretaría de Desarrollo Rural orientadas a prácticas productivas sustentables, a la estabilización de la frontera agrícola y a la restauración.

Y de la mayor importancia son las reservas comunitarias que se abordan a continuación.

Reservas ecológicas

Programa de retribución por la conservación de servicios ambientales que tiene dos modalidades, en reservas ecológicas comunitarias y en áreas comunitarias de conservación ecológica.

Las Reservas Ecológicas Comunitarias y Áreas Comunitarias de Conservación Ecológica¹ se establecieron como una categoría de las Área Natural Protegida, para preservar aquellas regiones, de propiedad comunal o ejidal, que aún conservan sus condiciones naturales. La declaratoria no compromete los derechos de propiedad ni modifica el régimen de propiedad.

Objetivos

- Asegurar la conservación y restaurar los ecosistemas naturales del Distrito Federal y la permanencia de los servicios ambientales: recarga del acuífero, contención de suelos, captura de carbono, hábitat para la biodiversidad, belleza escénica, recreación, y los relacionados con valores culturales.
- Involucrar a los núcleos agrarios en la conservación de la biodiversidad y la vigilancia de las zonas con vegetación natural que existen en los terrenos de su propiedad.

¹ Superficies del suelo de conservación, cubiertas de vegetación natural, establecidas por acuerdo del Ejecutivo local con los ejidos y comunidades, en terrenos de su propiedad, que se destinan a la preservación, protección y restauración de la biodiversidad y los servicios ambientales, sin modificar el régimen de propiedad de dichos terrenos.

- Retribuir económicamente a los ejidos y comunidades que realicen labores de protección, restauración y mejoramiento de los servicios ambientales.

Los Programas están diseñados para los núcleos agrarios que sean propietarios de una extensión mínima de 100 hectáreas de zona de vegetación natural, libres de asentamientos humanos y que a través de su asamblea decidan establecer todo o parte de su territorio como ANP, en cualquiera de sus dos categorías

Actualmente existen cinco ANP con esta modalidad (cuatro comunidades y dos ejidos), con un total de 14,545 ha. En 2008 se aprobaron 21.4 millones de pesos para este programa.² Para tener una idea de lo que recibe cada núcleo agrario, se obtuvo un promedio (\$1,471 por ha) y se obtuvieron los resultados que se presentan en la siguiente tabla:

Programa de retribución por la conservación de servicios ambientales					
Delegación	Núcleo agrario	Hectárea	Categoría de ANP	Valor ambiental	Monto promedio (pesos)
Xochimilco	Comunidad Santiago Tepalcatlapan	150	Área Comunitaria de Conservación Ecológica	Encino, zona de transición entre área lacustre y de montaña	220,547.00
Tlalpan	Ejido San Andrés Totoltepec	170	Reserva Ecológica Comunitaria	Relictos de matorral. Protege zona transición de Ajusco medio. Excelente filtración	24,9954.00
Magdalena Contreras	Ejido San Nicolás Totolapan	1,984	Reserva Ecológica Comunitaria	Oyamel, pino, pastizales y vegetación de rivera	2,918.135.00
Magdalena Contreras	Comunidad San Bernabé	240	Reserva Ecológica Comunitaria	Pino/oyamel; madroño y encino. Corredor biológico (Desierto de los Leones y Cañada de Contreras)	367,579.00
Tlalpan	Comunidad San Miguel Topilejo	6,000	Reserva Ecológica Comunitaria	Oyamel y Pino	8,821,983.00
Milpa Alta	Milpa Alta	6,000	Área comunitaria de conservación ecológica	Oyamel, pino, pastizal. Alta Infiltración y muy bien conservada	8,821,983.00

² Fondo Ambiental Público del Distrito Federal. Informe de actividades, 2008.

Fuente: elaboración propia con base en: SMA, página Web (núcleos agrarios y hectáreas, 2010) y Fondo Ambiental Público. Informe de Actividades 2008.

Cinco núcleos más están interesados en incorporarse y dos de los que ya existen, pretenden ampliar su superficie. Se trataría de 13 mil hectáreas más y para hacerlo se necesitan 20 millones de pesos extras.³

Antes de incorporar las reservas al proceso de análisis de vulnerabilidad es necesario ponderar junto con PAOT, si estas reservas están orientadas territorialmente a las zonas de mayor valor en términos de servicios ecosistémicos, y sobre todo, cuál es la situación de cada reserva (antigüedad, proyectos en cursos, desempeño de las compensaciones, etc...).

³ Fondo Ambiental Público 2008.
http://www.sma.df.gob.mx/transparencia/XIX/informeactfap_proy2008.pdf

Análisis de amenaza por erosión en las zonas de alto valor ecosistémico

Objetivo: el presente análisis tiene la finalidad de determinar el nivel de amenaza que representa la erosión para las zonas de alto valor ecosistémico por almacén de carbono, por infiltración y por provisión de hábitat; todas expresadas en áreas de captación.

Metodología:

- 1) Se realiza la intersección de las capas de zonas de alto valor ambiental por captación de carbono, por provisión de hábitat y por infiltración (expresadas en áreas de captación) con la capa de erosión total. Nota: Las capas de zonas de alto valor ambiental y la capa de erosión no coinciden completamente, esto implica que unas pocas áreas de captación quedarán recortadas. Se opta por usar estas áreas “recortadas” para el cálculo del nivel de amenaza por erosión, de lo contrario, el cálculo de la afectación por erosión podría subestimarse en para algunas áreas de captación. Los pasos siguientes son iguales para cada una de las tres capas de INTERSECCIÓN generadas.
- 2) En la capa resultante de la intersección (INTERSECCIÓN) se realiza el cálculo de la superficie de los polígonos (campo SUPERFIC de tipo double).
- 3) Posteriormente se realiza un summarize sobre el campo DRAINID (identificador de las áreas de captación) agregando un campo con la suma de las superficies (sum_SUPERFIC). Esta operación tiene como salida una tabla.
- 4) Se realiza un join de la capa INTERSECCIÓN con (realizada en el punto 1) con la tabla creada mediante el summarize (punto 3) por el campo DRAINID.
- 5) A continuación, en la misma capa (INTERSECCIÓN), se crea un campo “COCIENTE”(doublé) en donde los valores del campo se calculan como el cociente entre la superficie de cada polígono de la capa resultante de la intersección (punto 1) entre la superficie total del área de captación en que se encuentra (campo sum_SUPERFIC de la tabla creada en el join).

Esto es:

$$C = S_P / S_A$$

en donde C es el cociente entre la superficie del polígono y la superficie total del área de captación en que se encuentra, S_P es el valor de la superficie del polígono y S_A la superficie del área de captación correspondiente. De tal forma que la suma de todos los valores de R para una misma área de captación es igual a 1.

- 6) Después se crea un campo llamado PONDERACIÓN (double) que tiene el fin de establecer un parámetro de ponderación del grado de erosión para cada polígono de la capa de INTERSECCIÓN. La escala establecida se determina de acuerdo al valor del campo erosión:

Muy alta..... 1
Alta..... 0.75
Moderada..... 0.5
Ligera..... 0.25

- 7) Se crea un campo AFECTACION (double) que es igual a la multiplicación entre el campo COCIENTE por el valor correspondiente del campo PONDREACIÓN.

- 8) Se hace un dissolve sobre la capa intersección por el campo DRAINID y fijando como campo de estadístico a sum_AFECTACION como la suma de los valores del campo AFECTACIÓN sobre el área de captación. Esto genera la una capa final con los resultados deseados, es decir, el promedio de la erosión sobre el área de captación (CAPA_FINAL).
- 9) Para cada CAPA_FINAL se crea un campo AMENAZA de tipo texto calculado de acuerdo a los valores de AFECTACIÓN con la siguiente correspondencia:

sum_AFECTACION <= 0.25..... AMENAZA = Baja
0.25 < sum_AFECTACION <= 0.5.....AMENAZA = Moderada
0.5 < sum_AFECTACION <= 0.75.....AMENAZA = Alta
0.75 < sum_AFECTACION <= 1.....AMENAZA = Muy Alta

Resultados:

1. Nivel de amenaza por erosión en las zonas de alto valor ecosistémico por almacén de carbono.

En la siguiente ilustración se muestra el mapa de nivel de amenaza por erosión en las zonas de alto valor ecosistémico por captación de carbono. En el mapa se pueden ver zonas de algunas áreas de captación en color blanco (“Sin dato de erosión”) lo cual indica que estas áreas no fueron contempladas para el cálculo del nivel de amenaza en el área de captación respectiva.

Nivel de amenaza en las zonas de alto valor ecosistémico por almacén de carbono

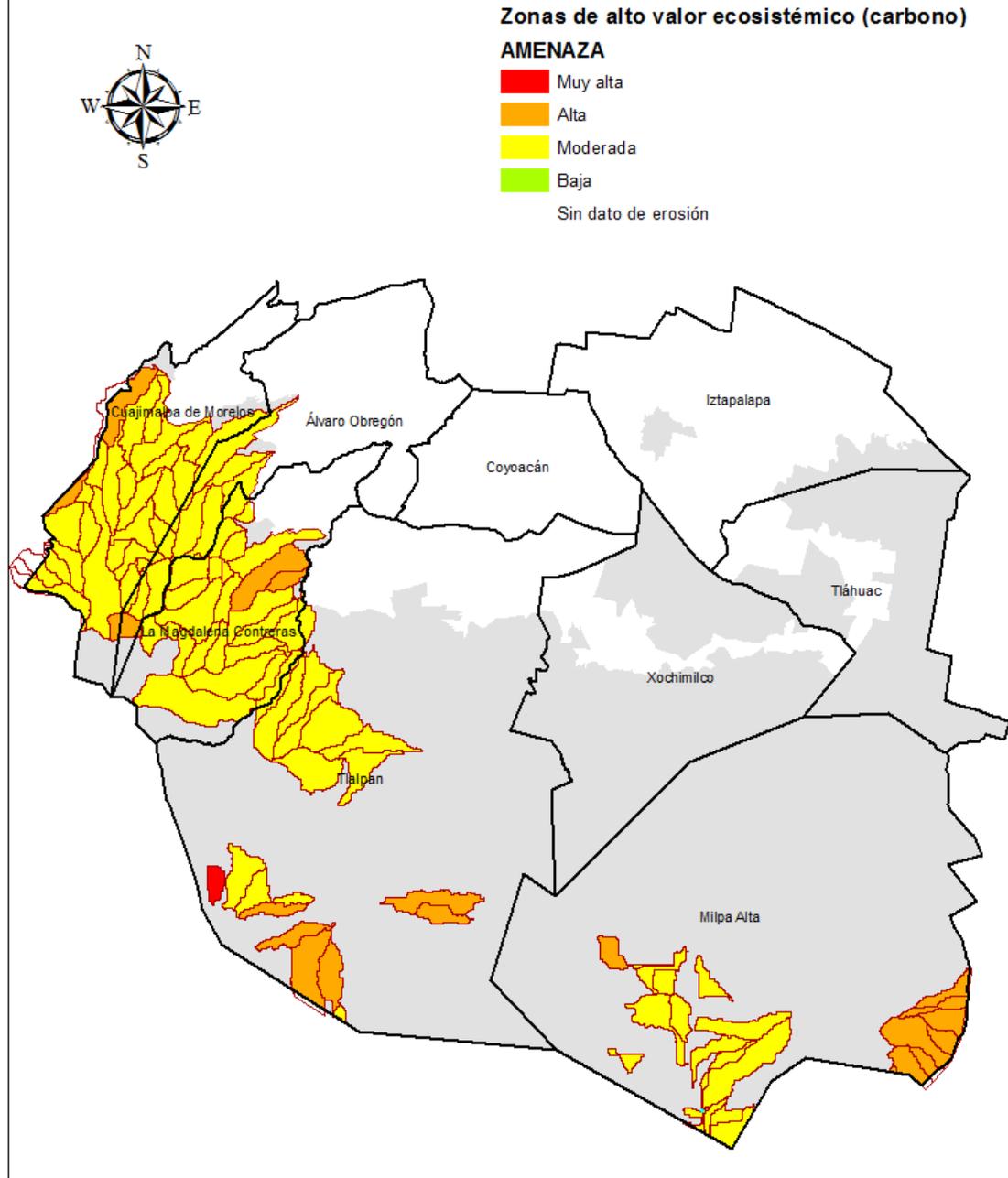


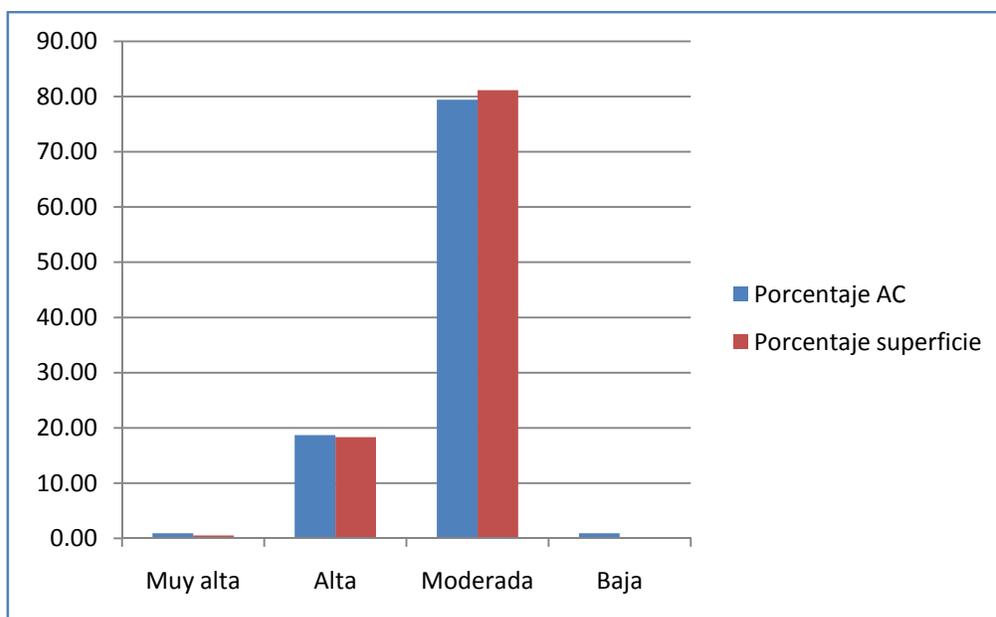
Ilustración 1 Nivel de amenaza por erosión en las zonas de alto valor ecosistémico por captación de carbono.

De la superficie total de las áreas de captación de alto valor ecosistémico por almacén de carbono, existen 420ha que no contaban con valor de erosión y que no fueron ocupadas para el cálculo del nivel de amenaza por erosión (correspondientes en el mapa anterior a las

zonas correspondientes a las áreas de captación valor “Sin dato de erosión”). En la siguiente tabla se muestran algunas estadísticas generales. En donde “Número AC” y “Superficie” se refieren al número de áreas de captación y superficie que se encuentran en el nivel de amenaza respectivo. Los campos “Porcentaje AC” y “Porcentaje superficie” son campos equivalentes expresados como porcentaje del total de áreas de captación y porcentaje del total de la superficie contempladas en el análisis.

Nivel de amenaza	Número AC	Superficie (Ha)	Porcentaje AC	Porcentaje superficie
Muy alta	1	103.8	0.9	0.5
Alta	20	3642.0	18.7	18.3
Moderada	85	16130.6	79.4	81.2
Baja	1	0.1	0.9	0.0
TOTAL	107	19876.5	100.0	100.0

Tabla 1 Estadísticas generales referentes al nivel de amenaza por erosión en las zonas de alto valor ecosistémico por almacén de carbono.



Gráfica 1 Nivel de amenaza en las zonas de alto valor ecosistémico por almacén de carbono.

Como se puede observar, aproximadamente el 80% de las áreas de captación y de la superficie total cuentan con un nivel de amenaza moderado, mientras que prácticamente un 20% tienen un nivel de amenaza alto o muy alto.

2. Nivel de amenaza por erosión en las zonas de alto valor ecosistémico por infiltración.

En la ilustración 2 se muestra el mapa de nivel de amenaza por erosión en las zonas de alto valor ecosistémico por infiltración.

Nivel de amenaza en las zonas de alto valor ecosistémico por infiltración

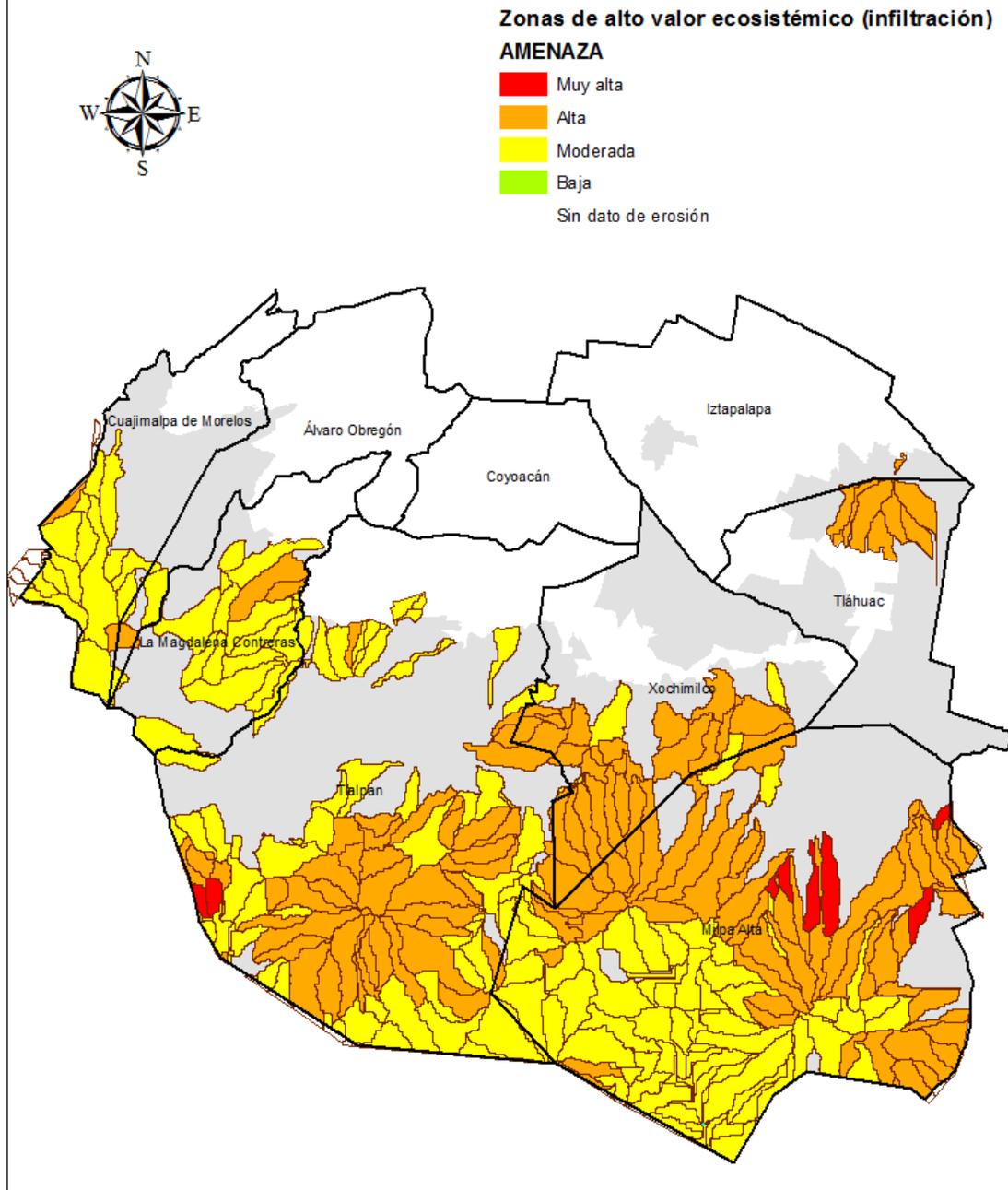
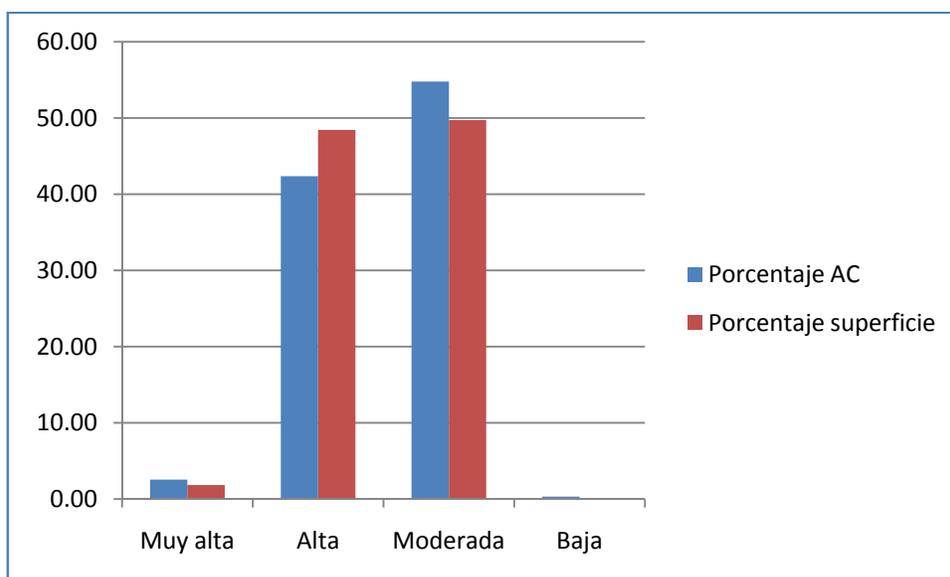


Ilustración 2 Nivel de amenaza por erosión en las zonas de alto valor ecosistémico por infiltración.

De manera análoga al punto anterior en la siguiente tabla se muestran algunas estadísticas generales referentes al nivel de amenaza por erosión en las zonas de alto valor ambiental por infiltración. En este caso, se quedaron fuera del análisis 662 ha que, por no contar con valores de erosión, se quedaron fuera de las siguientes estadísticas.

Nivel de amenaza	Número AC	Superficie (Ha)	Porcentaje AC	Porcentaje superficie
Muy alta	8	938.6	2.5	1.8
Alta	133	24784.1	42.4	48.4
Moderada	172	25455.2	54.8	49.7
Baja	1	0.1	0.3	0.0
TOTAL	314	51177.9	100.0	100.0

Tabla 2 Estadísticas generales referentes al nivel de amenaza por erosión en las zonas de alto valor ecosistémico por infiltración.



Gráfica 2 Nivel de amenaza en las zonas de alto valor ecosistémico por infiltración.

En este caso se observa que la gran mayoría de las áreas de captación y la superficie ocupada por ellas está bajo un nivel de amenaza de moderado a alto.

3. Nivel de amenaza por erosión en las zonas de alto valor ecosistémico por provisión de hábitat.

Por último, en la ilustración 3 se muestra el mapa de nivel de amenaza por erosión en las zonas de alto valor ecosistémico por provisión de hábitat.

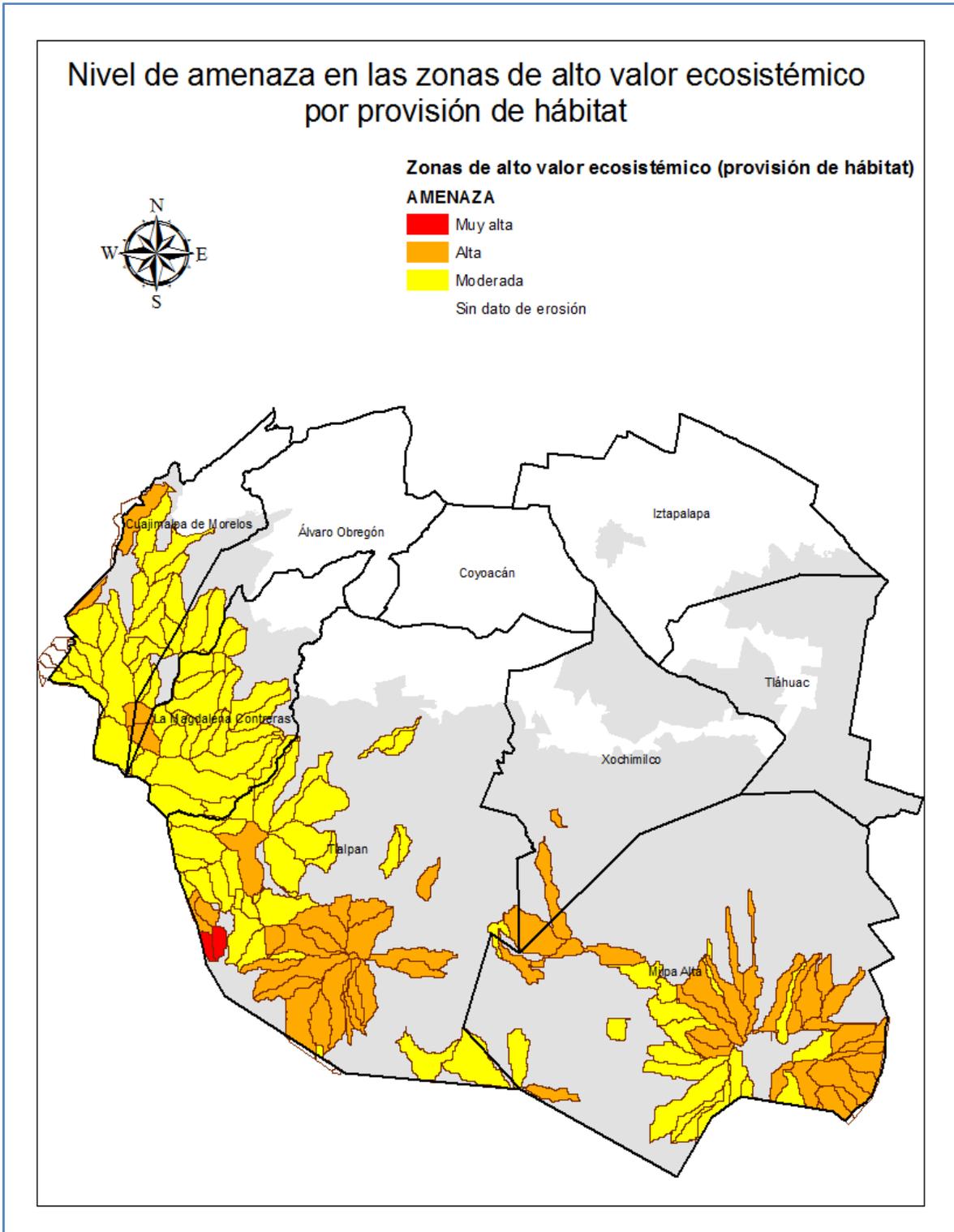
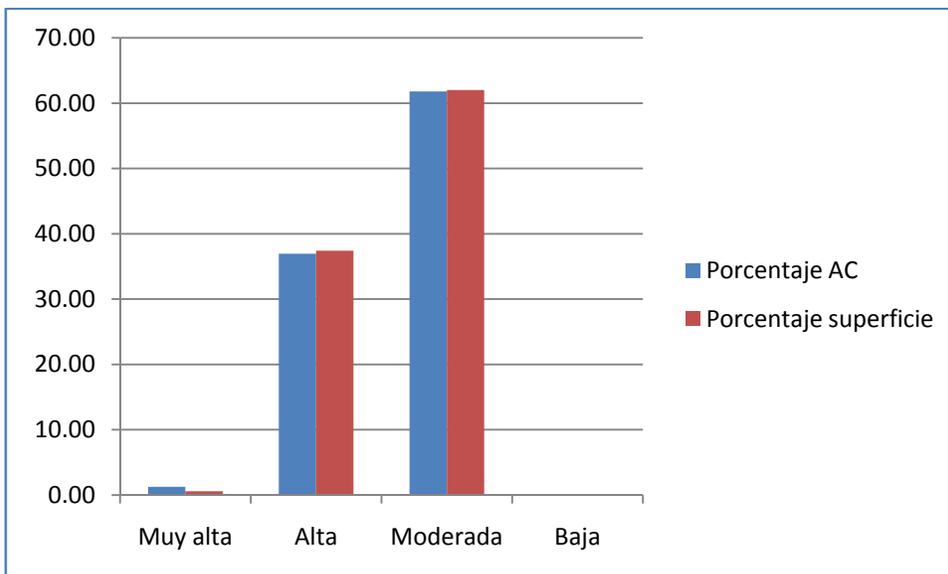


Ilustración 3 Nivel de amenaza por erosión en las zonas de alto valor ecosistémico por provisión de hábitat.

En el caso de las zonas de alto valor ecosistémico por provisión de hábitat no se contabilizaron para el análisis aproximadamente 522 hectáreas. A continuación se muestra una tabla con algunas estadísticas generales.

Nivel de amenaza	Número AC	Superficie (Ha)	Porcentaje AC	Porcentaje superficie
Muy alta	2	176.9	1.3	0.6
Alta	58	11188.1	36.9	37.4
Moderada	97	18547.7	61.8	62.0
Baja	0	0.0	0.0	0.0
TOTAL	157	29912.6	100.0	100.0

Tabla 3 Estadísticas generales referentes al nivel de amenaza por erosión en las zonas de alto valor ecosistémico por provisión de hábitat.



Gráfica 3 Nivel de amenaza en las zonas de alto valor ecosistémico por provisión de hábitat.

Las zonas de alto valor ecosistémico por provisión de hábitat tienen un nivel de amenaza por erosión medio de moderado en poco más del 60% de las áreas de captación y de la superficie total que estas ocupan. Más del 30% de la superficie y áreas de captación tienen un nivel de amenaza alto.

4. Conclusiones generales.

Las zonas de alto valor ecosistémico por infiltración (51,178ha) son las que ocupan una mayor superficie en comparación con las zonas de alto valor ambiental por almacén de carbono (19,877ha) y provisión de hábitat (29,913ha). Hay 8,496ha que son de alto valor ambiental en los tres rubros tratados en este análisis (por almacén de carbono, infiltración y provisión de hábitat) ver ilustración 4.

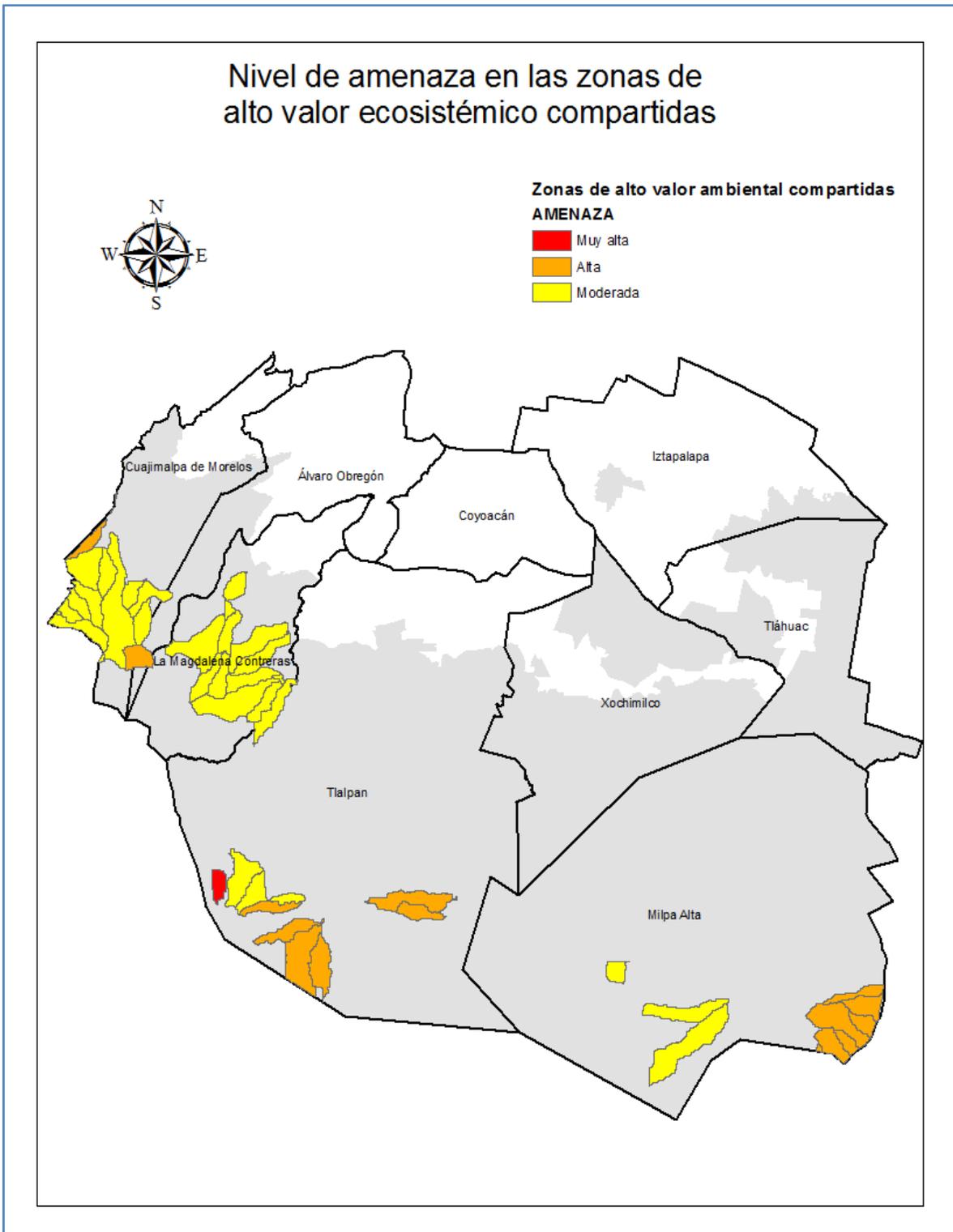


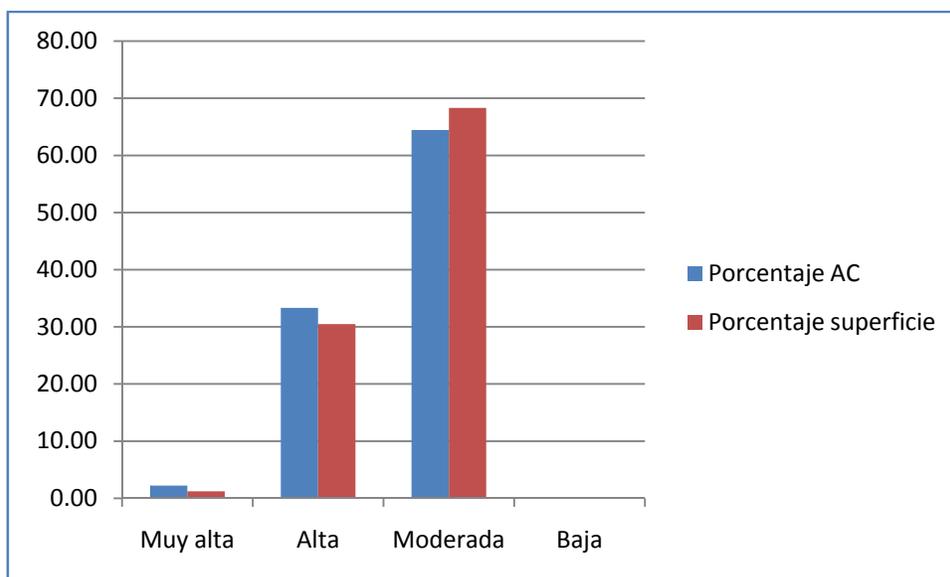
Ilustración 4 Zonas de alto valor ambiental por almacén de carbono, infiltración y provisión de hábitat.

A continuación se presentan las estadísticas generales de estas zonas de alto valor ambiental que aparecen en las tres categorías. Como se puede ver en la tabla 4 y gráfica 4 el nivel de amenaza es

moderado para más del 60% de las áreas de captación y superficie total que ocupan. Por ser zonas de alto valor ambiental por almacén de carbono, infiltración y provisión de hábitat, la conservación de estas zonas debería de alta prioridad.

Nivel de amenaza	Número AC	Superficie (Ha)	Porcentaje AC	Porcentaje superficie
Muy alta	1	103.77	2.22	1.22
Alta	15	2,589.41	33.33	30.48
Moderada	29	5,803.13	64.44	68.30
Baja	0	0.00	0.00	0.00
TOTAL	45	8,496.32	100.00	100.00

Tabla 4 Estadísticas generales referentes al nivel de amenaza por erosión en las zonas de alto valor ecosistémico en las tres categorías.



Gráfica 4 Nivel de amenaza en las zonas de alto valor ecosistémico en las tres categorías.

Estudio: *Evaluación de la vulnerabilidad ambiental que presenta el suelo de conservación por la pérdida de servicios ecosistémicos a consecuencia del cambio de uso de suelo*

INFORME FINAL: CUARTA SECCION

Cambios drásticos sobre zonas de alto valor ecosistémico por infiltración, captura de carbono y provisión de hábitat

Noviembre 30, 2010

Presentación

En este documento, se presenta la metodología que llevó a construir el mapa de cambios drásticos, entendidos como todos aquellos cambios por pérdida de cobertura forestal de calidad (ver *Modelo de análisis tendencial sobre la pérdida de cubierta forestal en el suelo de conservación del Distrito Federal*) Se coteja con las zonas de alto valor ecosistémico que se expresan en áreas de captación. En este mismo inciso se presentan los mapas resultantes de esta metodología. Posteriormente, se presentan los resultados estadísticos y comentarios sobre los mismos.

Metodología

Para evaluar la vulnerabilidad de los sitios de alto valor ecosistémico por cambios drásticos, entendidos en este estudio como cualquier cambio que ocurra por pérdida de cobertura forestal de calidad, se construyó una representación por unidad de área de captación pluvial el porcentaje de cambios drásticos presentes (Figura 1). Lo que se empleó para evaluar cada uno de los servicios ambientales, obtenidos anteriormente, de acuerdo con las metodologías propuestas. Primeramente, por cada uno de los servicios ambientales, se generaron regiones que corresponden a los valores más altos en la prestación de servicios ambientales, expresados a partir de áreas de captación pluvial. Para este ejercicio se evalúa, infiltración, almacenamiento de carbono y provisión de hábitat (Figura 2-4).

Esta clasificación, depende exclusivamente de los sitios seleccionados, los cuales corresponden a áreas que brindan en mayor medida el servicio ambiental evaluado. A partir de los sitios seleccionados, se evalúa su vulnerabilidad en función del porcentaje de cambios drásticos presentes en las áreas de captación pluvial correspondientes.

Los resultados de la evaluación de la vulnerabilidad son expresados para las áreas de captación que contienen cada una de ellas.

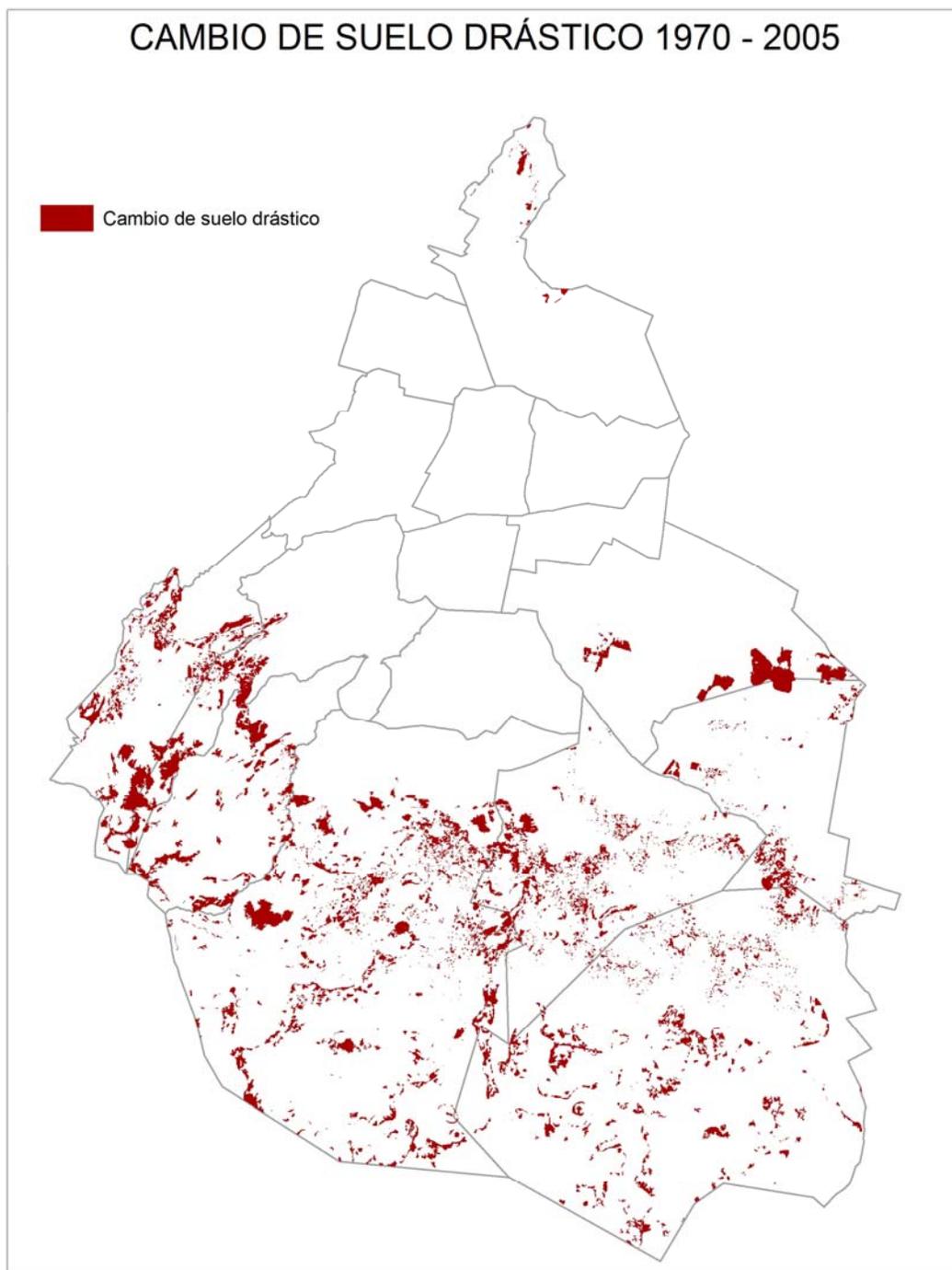


Figura 1. Mapa de cambios drásticos 1970 – 2005

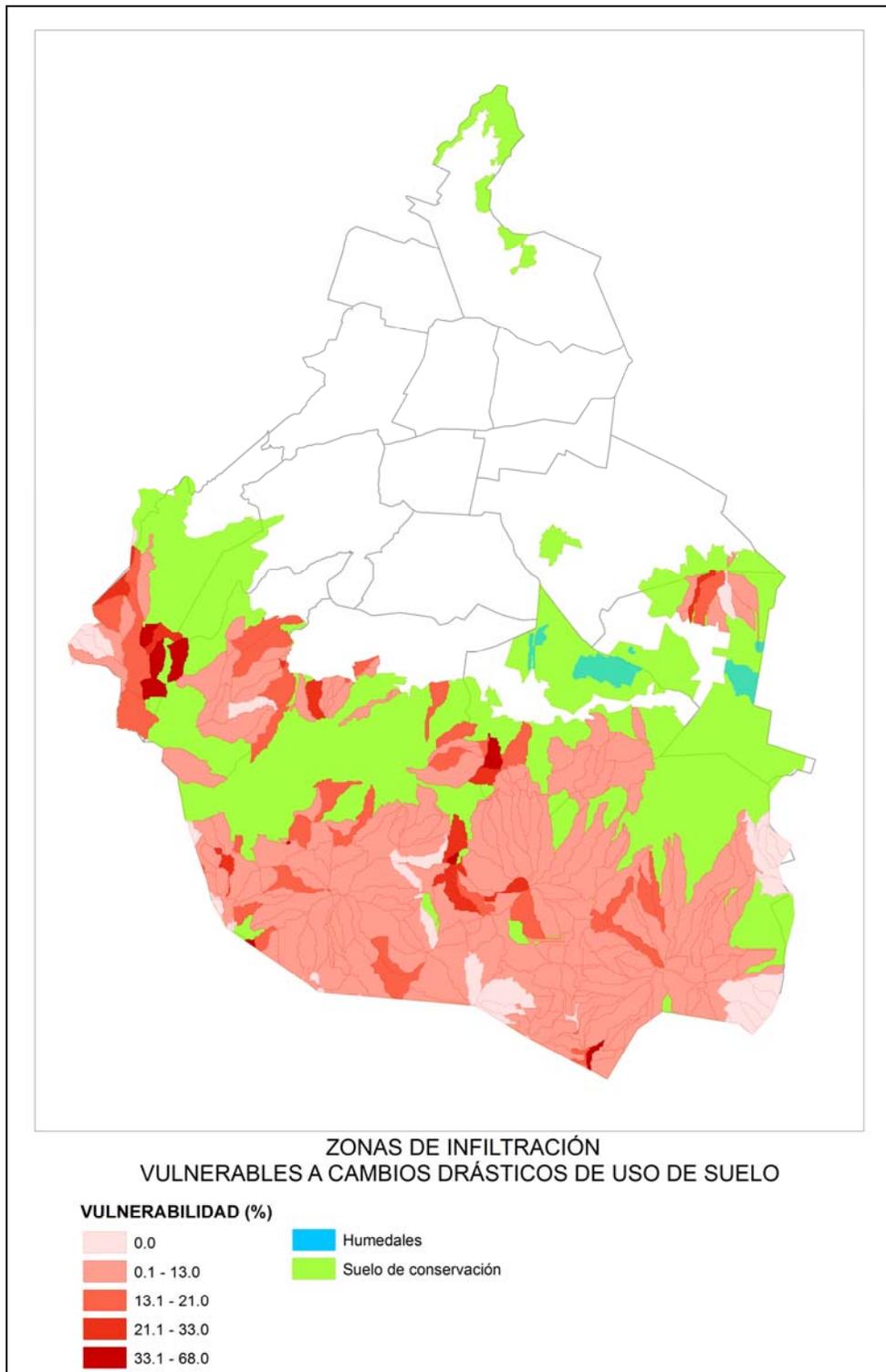


Figura 2. Zonas vulnerables a cambios drásticos por infiltración

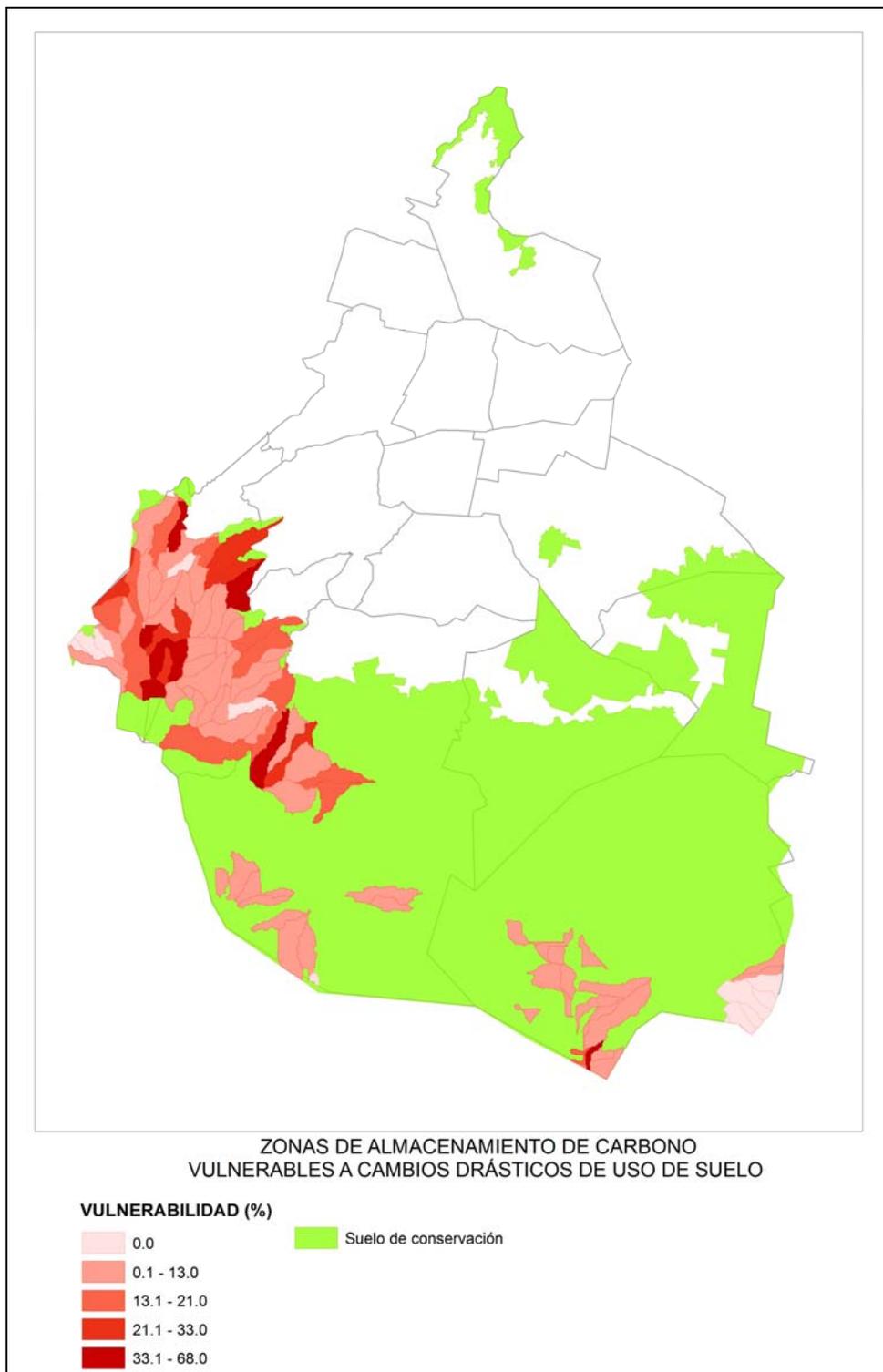


Figura 3. Zonas vulnerables a cambios drásticos por almacenamiento de carbono

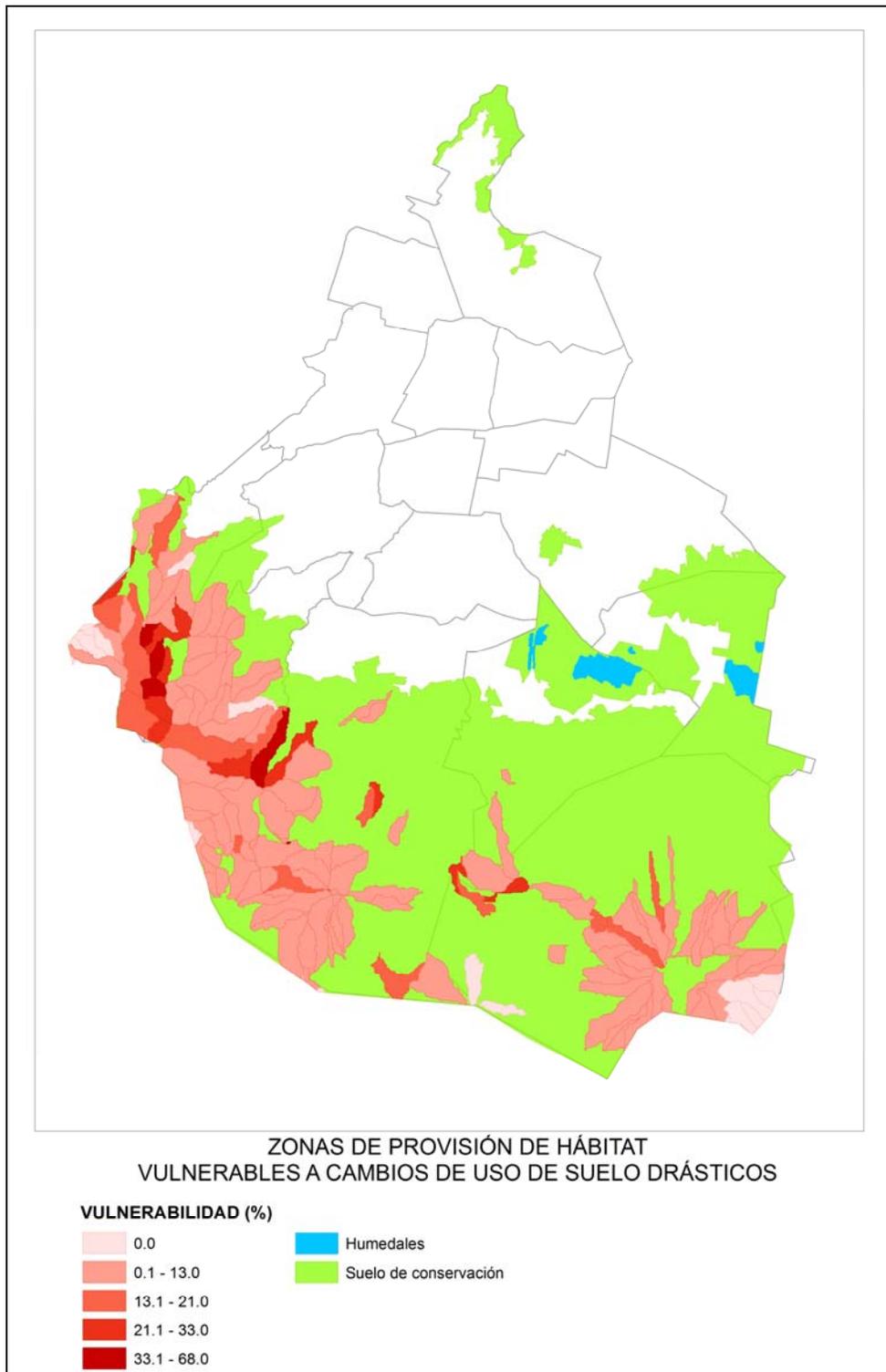


Figura 4. Zonas vulnerables a cambios drásticos por provisión de hábitat

RESULTADOS

De acuerdo con la metodología planteada, se presentan los resultados de la evaluación de vulnerabilidad por cambio drástico de los servicios ambientales de infiltración, almacenamiento de carbono y provisión de hábitat. Los resultados se expresan por servicio ambiental (Tabla 1-3).

INFILTRACIÓN			
NÚMERO DE ÁREAS DE CAPTACIÓN	Grado de vulnerabilidad	Hectáreas	Porcentaje
102	0.0%	3 981.128	7.7
305	0.1 – 13.0%	38 526.857	74.3
46	13.1 – 21.0%	6 945.870	13.4
28	21.1 – 33.0%	1 510.664	2.9
13	> 33.1%	875.193	1.7
494		51 839.712	100.0

Tabla. Áreas de captación de infiltración vulnerable a cambios drásticos

ALMACENAMIENTO DE CARBONO			
NÚMERO DE ÁREAS DE CAPTACIÓN	Grado de vulnerabilidad	Hectáreas	Porcentaje
14	0.0%	1 526.162	7.5
60	0.1 – 13.0%	11 716.798	57.7
15	13.1 – 21.0%	3 953.829	19.5
8	21.1 – 33.0%	1 559.778	7.7
10	> 33.1%	1 539.931	7.6
107		20 296.498	100.0

Tabla. Áreas de captación de almacenamiento de carbono vulnerable a cambios drásticos

PROVISIÓN DE HÁBITAT			
NÚMERO DE ÁREAS DE CAPTACIÓN	Grado de vulnerabilidad	Hectáreas	Porcentaje
26	0.0%	1 994.674	6.5
150	0.1 – 13.0%	22 072.270	72.5
17	13.1 – 21.0%	3 927.688	13.0
14	21.1 – 33.0%	1 674.848	5.5
6	> 33.1%	764.730	2.5

213		30 434.210	100.0
------------	--	-------------------	--------------

Tabla. Áreas de captación de provisión de hábitat vulnerable a cambios drásticos

Se observa, que las áreas evaluadas a vulnerabilidad por cambio drástico corresponden; para infiltración a 51 840 ha que en promedio infiltran 2.5 mm al año; para almacenamiento de carbono 20 296 ha con un promedio de 62.1 toneladas al año; finalmente para provisión de hábitat una extensión de 30 434 ha con un promedio de índice de cubierta forestal de 60.6%. Estas zonas como se observa, corresponden a áreas que otorgan en promedio altos valores de servicios ambientales, por lo que evaluar su vulnerabilidad se vuelve una tarea trascendente.

En el caso de infiltración se presentan 10 zonas con un tamaño promedio de 5 184 ha para las cuales el porcentaje de vulnerabilidad por cambio drástico es de 7.4%. Las zonas más vulnerables se presentan en las delegaciones de Cuajimalpa, Xochimilco y sur de Milpa Alta principalmente. Aunque la zona de mayor extensión se ubica en las delegaciones de Tlalpan, Milpa Alta y Xochimilco.

Para el caso de almacenamiento de carbono se presentan también 10 zonas con tamaño promedio de 2 030 ha para las cuales el porcentaje de vulnerabilidad por cambio drástico es de 11.8%. Las zonas más vulnerables son Álvaro Obregón y Cuajimalpa que corresponden junto con Magdalena Contreras y poniente de Tlalpan a las zonas más extensas. Existen además también pequeñas áreas de captura de carbono significativamente vulnerables en Milpa Alta.

Finalmente en el servicio ambiental de provisión de hábitat se presentan 11 zonas con un tamaño promedio de 2 767 ha con un porcentaje promedio de vulnerabilidad por cambio drástico de 7.9%. Las zonas más vulnerables son los límites entre las delegaciones Álvaro Obregón y Cuajimalpa por un lado, y Magdalena Contreras y Tlalpan, por el otro.

En términos generales, puede decirse que el servicio ambiental más vulnerable por cambio drástico, corresponde a la infiltración, y en porcentajes similares los servicios asociados a captura de carbono y provisión de hábitat, lo cual es hasta cierto punto explicable, asumiendo que ambos dos servicios son otorgados por la cubierta forestal.

Estudio: *Evaluación de la vulnerabilidad ambiental que presenta el suelo de conservación por la pérdida de servicios ecosistémicos a consecuencia del cambio de uso de suelo*

INFORME FINAL: CUARTA SECCION

Análisis de la vulnerabilidad ambiental que presentan algunas zonas del suelo de conservación en relación a la pérdida de servicios ecosistémicos

Noviembre 30, 2010

Presentación

Si bien son varios los productos que se generaron de este proyecto, la Cuarta Sección contiene los tres rubros principales del Producto Final. En este sentido, se cumple así con los términos de referencia cuando plantean: “conocer las áreas que aportan más servicios ecosistémicos¹ e identificar aquellos que son más susceptibles al cambio de uso de suelo”.

Estos tres rubros relativos a modelo, análisis y mapa de vulnerabilidad, según advierten los mismos términos de referencia, permitirán después desarrollar programas o políticas dirigidas a la prevención, mitigación y control del cambio de uso de suelo ayudando así a conservar los ecosistemas existentes.

Los mapas de vulnerabilidad que se incluyen en este Informe Final (ver presentación de esta *Cuarta Sección*), ya contienen un invaluable análisis de vulnerabilidad de las zonas más valiosas desde una perspectiva de carbono almacenado, infiltración y *provisión de hábitat*. Para estos fines se utilizó como insumo central el mapa de cambios drásticos en el uso de suelo.

De aquí que estos dos rubros, análisis y mapas de vulnerabilidad, están totalmente articulados; y orientados por el Modelo de vulnerabilidad.

Considerando lo anterior, a continuación se plantean algunos elementos básicos de este análisis y en varios de ellos se perfila que este análisis debe ser dinámico y trabajado en forma estrecha con PAOT; es decir, existen otras amenazas (como son los asentamientos irregulares, los incendios, la erosión, entre otras), que debe validarse la información sobre la amenaza y realizar ejercicios de vulnerabilidad por cada una y no intentando integrar todas.

¹ Relacionados con filtración de agua, almacén de carbono y provisión de hábitat.

Lo anterior debido a que las amenazas presentan *traslapos* o elementos comunes, por ejemplo, el mapa de cambios drásticos en buena medida incorpora fenómenos de sellamiento, incendios, tala clandestina.

Por otro lado, están los factores muy relacionados con las intervenciones territoriales gubernamentales y de los agentes locales, que se orientan a la conservación de las áreas de alto valor ambiental. Estos factores son contenedores de las amenazas y derivan en menor nivel de vulnerabilidad.

De aquí la importancia de que el análisis se visualice como un proceso dinámico y no como un ejercicio terminado.

Crterios básicos para orientar el análisis de vulnerabilidad

En lo relativo a este rubro (*Análisis de la vulnerabilidad ambiental que presentan algunas zonas del suelo de conservación en relación a la pérdida de servicios ecosistémicos*), es importante partir de convenciones conceptuales centrales, así vemos.

En los términos de referencia se entiende por vulnerabilidad el grado de susceptibilidad que tiene un ecosistema, como resultado del cambio de uso de suelo. De hecho, existen muchos factores que vuelven vulnerable un ecosistema; estos cambios pueden implicar una conversión total de un uso de suelo dado, o bien pueden ser modificaciones a pequeña escala.

Como se señaló en el Modelo de Ponderación de Vulnerabilidad, para que ocurra un daño o pérdida parcial o total de un ecosistema asociado a una zona de alto valor ecosistémico (cambio de uso de suelo), se requieren dos factores: un estado de vulnerabilidad de dicha zona, y una amenaza.

El nivel de vulnerabilidad de una zona se define tanto por la exposición (cercanía) a una amenaza, como por la falta de protección social, que en el caso de este estudio se limitan a las reservas comunitarias (mitigan el riesgo, ya que pueden existir amenazas que estén fuera de su control, como incendios o erosión) que se entienden como la protección social que significa el interés de los dueños de la tierra de constituir parte de su ejido o comunidad en ANP, bajo la figura de Reserva ecológica comunitaria, y recibir apoyos del Programa de retribución por la conservación de servicios ambientales, tema que se aborda más adelante.

Por su parte, las amenazas que pueden traducirse en riesgo, si existe dicha vulnerabilidad son, en primer término, cambios de usos de suelo drásticos, —como se ha señalado en otras secciones, refiere el cambio de bosque a cualquier otra categoría—, así como asentamientos irregulares, incendios (se analizan a partir de y erosión fuerte.

En síntesis, una zona de alto valor ecosistémico está en riesgo (cambio de uso de suelo) si está cerca o contiene una amenaza y no cuenta con la protección social de sus dueños.

Ahora bien, como se acordó en una reunión técnica entre PAOT y CentroGeo, a continuación se presenta el análisis de la vulnerabilidad de las zonas de alto valor ecosistémico por servicio, esto es: las zonas más importantes para la infiltración, el almacén de carbono y la *provisión de hábitat*.

Análisis de vulnerabilidad derivada de cambios drásticos, en zonas de alto valor en términos de infiltración, captura de carbono y provisión de hábitat

Se propone la evaluación de vulnerabilidad a cambios drásticos para los servicios ambientales de infiltración, captura de carbono y disponibilidad de hábitat. Para evaluar la vulnerabilidad, se construyó una representación por unidad de área de captación pluvial el porcentaje de cambios drásticos presentes (Figura 1). Lo que se empleó para evaluar cada uno de los servicios ambientales, obtenidos anteriormente, de acuerdo con las metodologías propuestas. Primeramente, por cada uno de los servicios ambientales, se generaron regiones que corresponden a los valores más altos en la prestación de servicios ambientales, expresados a partir de áreas de captación pluvial. Para este ejercicio se evalúa, infiltración, almacenamiento de carbono y provisión de hábitat (Figura 2-4)

Esta clasificación, depende exclusivamente de los sitios seleccionados, los cuales corresponden a áreas que brindan en mayor medida el servicio ambiental evaluado. A partir de los sitios seleccionados, se evalúa su vulnerabilidad en función del porcentaje de cambios drásticos presentes en las áreas de captación pluvial correspondientes.

Los resultados de la evaluación de la vulnerabilidad son expresados tanto para las regiones generadas como para las áreas de captación que contienen cada uno de ellos.

CAMBIO DE SUELO DRÁSTICO 1970 - 2005

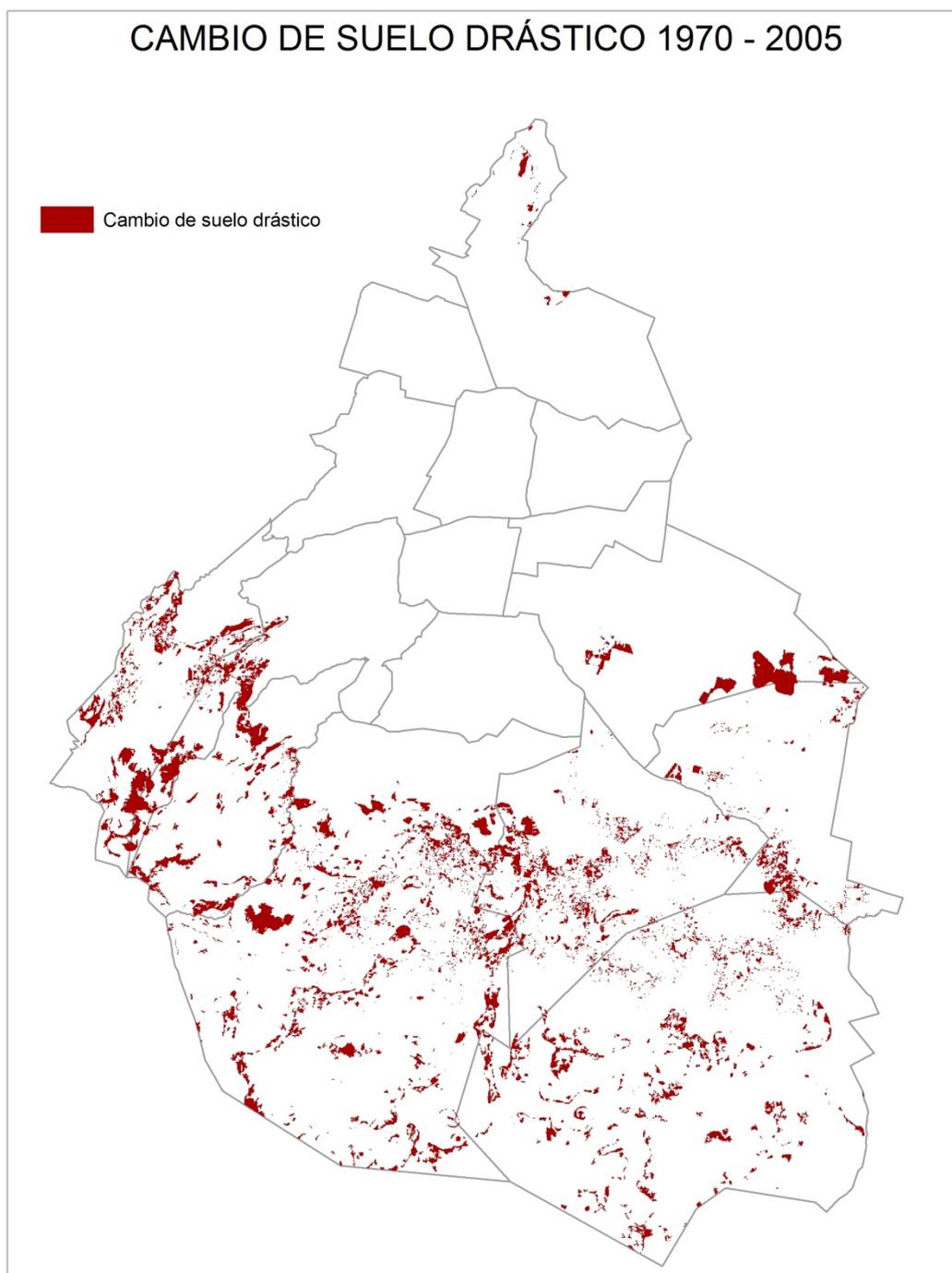


Figura 1. Mapa de Cambios drásticos 1970-2005

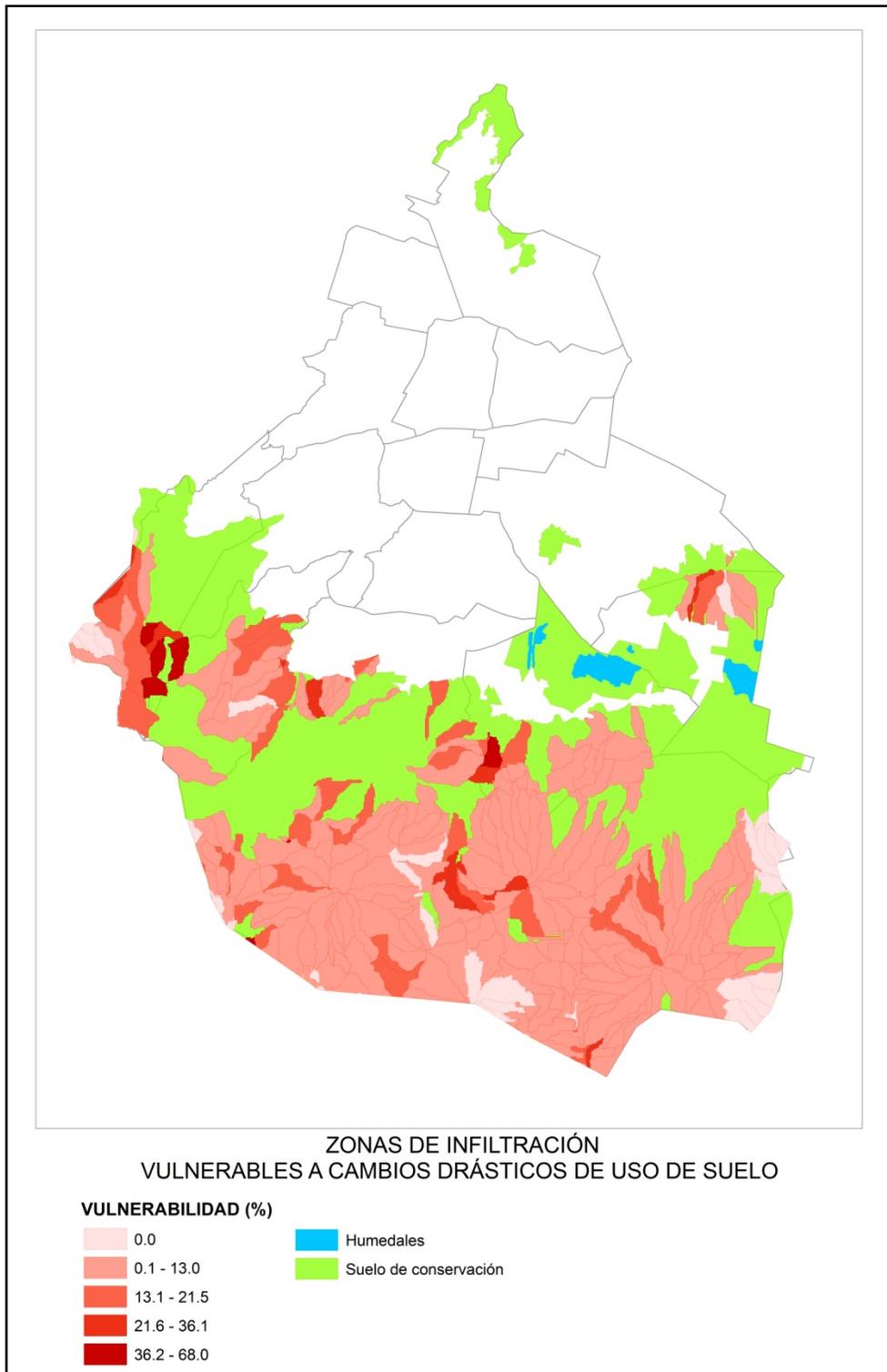


Figura 2. Zonas vulnerables a cambios drásticos por infiltración

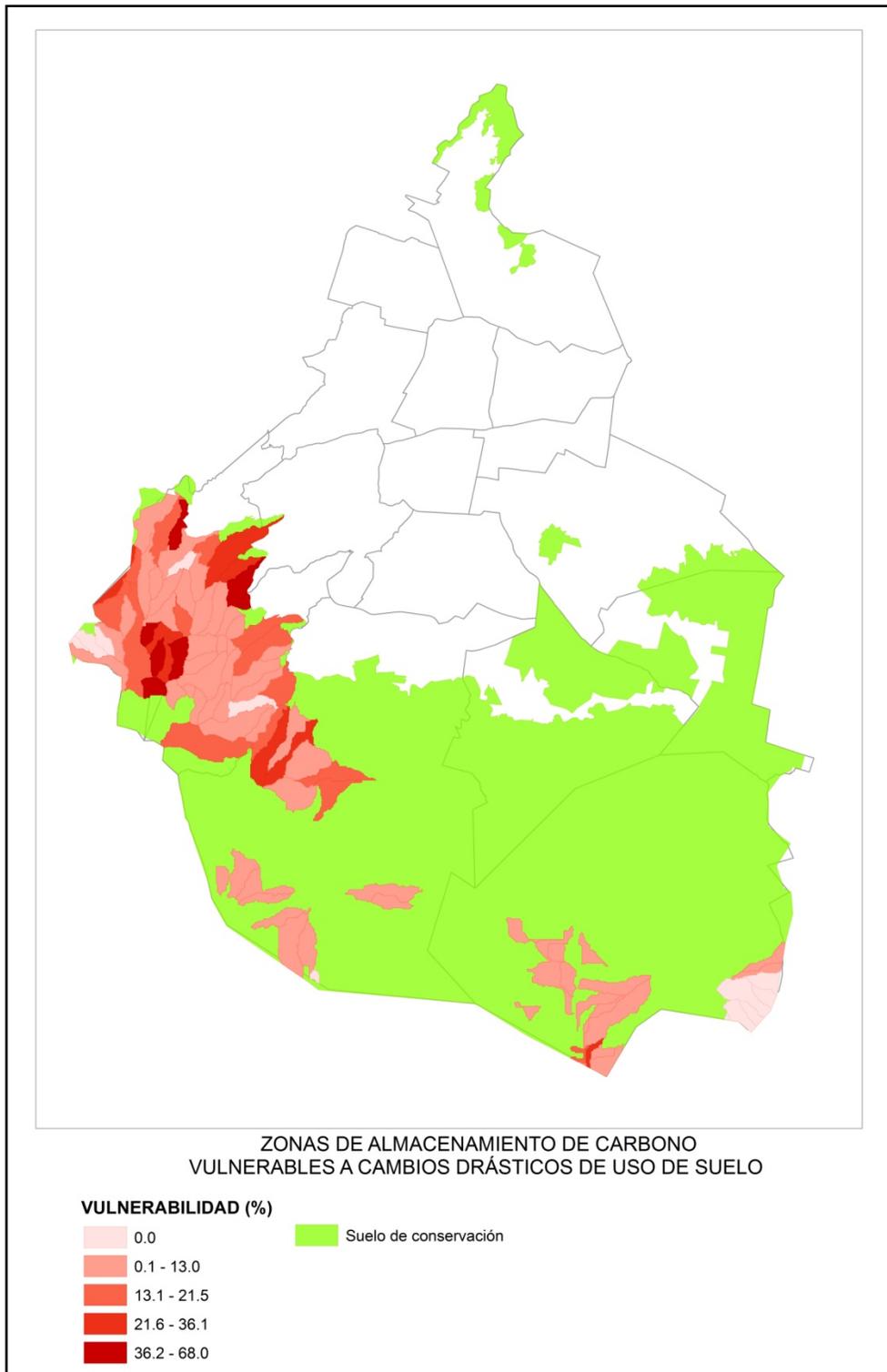


Figura 3. Zonas vulnerables a cambios drásticos por almacenamiento de carbono

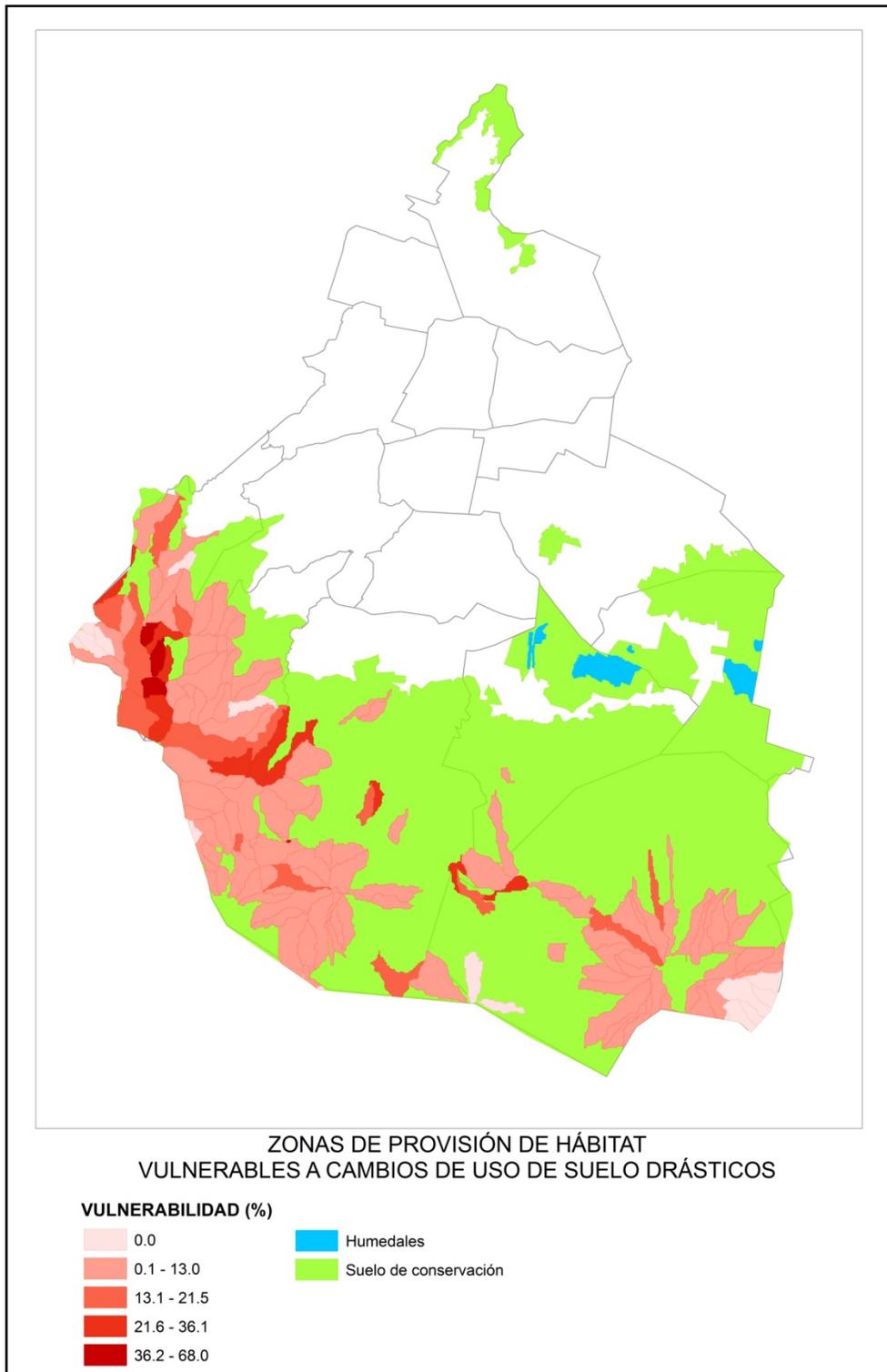


Figura 4. Zonas vulnerables a cambios drásticos por provisión de hábitat

Resultados

De acuerdo con la metodología planteada, se presentan los resultados de la evaluación de vulnerabilidad por cambio drástico de los servicios ambientales de infiltración, almacenamiento de carbono y provisión de hábitat. Los resultados se expresan por servicio ambiental.

Las áreas evaluadas a vulnerabilidad por cambio drástico corresponden; para infiltración 51 840 ha que en promedio infiltran 2.5 mm al año; para almacenamiento de carbono 20 296 ha con un promedio de 62.1 toneladas al año; finalmente para provisión de hábitat una extensión de 30 434 ha con un promedio de índice de cubierta forestal de 60.6%. Estas zonas como se observa, corresponden a áreas que otorgan en promedio altos valores de servicios ambientales, por lo que evaluar su vulnerabilidad se vuelve una tarea trascendente

En el caso de infiltración se presentan 10 zonas con un tamaño promedio de 5 184 ha para las cuales el porcentaje de vulnerabilidad por cambio drástico es de 7.4%. Las zonas más vulnerables se presentan en las delegaciones de Cuajimalpa y Xochimilco principalmente. Aunque la zona de mayor extensión se ubica en las delegaciones de Tlalpan, Milpa Alta y Xochimilco.

Para el caso de Almacenamiento de carbono se presentan también 10 zonas con tamaño promedio de 2 030 ha para las cuales el porcentaje de vulnerabilidad por cambio drástico es de 11.8%. Las zonas más vulnerables son Álvaro obregón y Cuajimalpa que corresponden junto con Magdalena Contreras y poniente de Tlalpan, a la zona más extensa. Existen además también pequeñas áreas de captura de carbono significativamente vulnerables en Milpa Alta.

Finalmente en el servicio ambiental de provisión de hábitat se presentan 11 zonas con un tamaño promedio de 2 767 ha con un porcentaje promedio de vulnerabilidad por cambio drástico de 7.9%. Las zonas más vulnerables son los límites entre las delegaciones Álvaro Obregón y Cuajimalpa por un lado y Magdalena Contreras y Tlalpan.

En términos generales, puede decirse que el servicio ambiental más vulnerable por cambio drástico, corresponde a la infiltración y en porcentajes similares los servicios asociados a captura de carbono y provisión de hábitat, lo cual es hasta cierto punto explicable, asumiendo que ambos dos son otorgados por la cubierta forestal

Por último y como ya se mencionó, el mapa de cambios drásticos de usos de suelo adquiere una importancia especial, ya que la pérdida de bosques en una muy pequeña porción, ha cambiado directamente a usos urbanos, pero la mayor parte de la pérdida forestal, deja como legado lo que en el mapa se identifica como áreas abiertas, que puede ser agricultura, pastizales, matorrales, suelo desnudo, etcétera.

De aquí que el mapa de cambios drásticos, también refleja amenazas como la tala, los efectos de la extensión de actividades agropecuarias, así como de incendios.