



Informe final

Desarrollo de metodologías de análisis y evaluación de dinámicas de ordenamiento territorial en Bogotá y la región



Grupo de Sostenibilidad Urbana y Regional - SUR

Luis A. Guzmán

Profesor Asistente Director del Grupo de Estudios en Sostenibilidad Urbana y Regional (SUR), Universidad de los Andes, Colombia la.guzman@uniandes.edu.co

Javier Rodrigo Peña Bastidas

Asistente de Investigación. Grupo de Estudios en Sostenibilidad Urbana y Regional (SUR) Universidad de los Andes, Colombia jr.pena@uniandes.edu.co

Rafael Felipe Cardona Orozco

Asistente de Investigación. Grupo de Estudios en Sostenibilidad Urbana y Regional (SUR) Universidad de los Andes, Colombia rf.cardona1234@uniandes.edu.co

TABLA DE CONTENIDO

SI	GLAS Y	ACRÓNIMOS	5
DE	FINICIO	ONES	6
IN	TRODU	JCCIÓN	8
1.	DEF	INICIÓN DE PARÁMETROS INICIALES Y RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN	10
	1.1.	DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	11
	1.2.	RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN	12
2.	PRO	OCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN	16
	2.1.	CAPAS DE USOS DEL SUELO	16
	2.1.	1. Imágenes satelitales	16
	2.1	2. Clasificación usos del suelo	17
	2.2.	CAPAS DE APTITUD AMBIENTAL	26
	2.2.	1. Capa remoción en masa	27
	2.2	2. Capa de inundación	30
	2.2	3. Capa de incendios forestales	33
	2.2.	4. Capa final de aptitud ambiental	35
	2.2	5. Model builder de aptitud ambiental	38
	2.3.	CREACIÓN DE LAS CAPAS DE ZONIFICACIÓN TERRITORIAL	39
	2.3.	1. Model builder de la zonificación territorial	42
3.	LA F	HERRAMIENTA METRONAMICA	44
	3.1.	CAMBIOS EN LOS USOS DEL SUELO	44
	3.2.	Transformación de la información a ASCII	47
	3.3.	DATOS DE ENTRADA	48
	3.3.	1. La demanda de suelo	49
	3.3	2. Zonificación	49
	3.3.	3. Aptitud Ambiental	51
	3.3.	4. Infraestructura	53
	3.3.	5. Definición parámetros de accesibilidad	54
	3.3.	6. Parámetros de accesibilidad utilizados en la simulación	58
	3.3.	7. Curvas de vecindad	59
4.	CAL	IBRACIÓN DEL MODELO	61
	4.1.	Interpretación Visual	62
	4.2.	TABLAS DE CONTINGENCIA	62
	43	KADDA V FII77V KADDA	63

5.	DEFINICIÓN DE ESCENARIOS						
5	5.1.	CÁLCULO DE LAS DEMANDAS	67				
Ę	5.2.	ZONIFICACIÓN E INFRAESTRUCTURA	68				
5	5.3.	ESCENARIO 1 - TENDENCIAL	71				
5	5.4.	ESCENARIO 2	74				
5	5.5.	ESCENARIO 3	75				
5	5.6.	ESCENARIO 4	77				
5	5.7.	ESCENARIO 5	79				
5	5.8.	ESCENARIO 6	82				
5	5.9.	ESCENARIO 7	82				
	5.10.	Escenario 8 – Escenario Máximo	84				
6.	ANA	ÁLISIS DE RESULTADOS	87				
6	5.1.	Definición de indicadores	87				
6	5.2.	Proceso de cálculo de indicadores	88				
6	5.3.	Análisis de escenarios	95				
6	5.4.	Análisis orinetado a responder las preguntas orientadoras de decisión	100				
6	5.5.	ANÁLISIS POR MUNICIPIOS	102				
7.	cor	NCLUSIONES	105				
ВΙΒ	LIOGE	RAFÍA	107				
AN	EXOS		109				
Å	Anexo	I – Mapas digitalizados de los planes de ordenamiento territorial de municipios	109				
Anexo II – Curvas de vecindad para Bogotá y la Región							
A	ANEXO	III – Entrega de la base de datos geográfica	117				
A	ANEXO IV – CUADRO MAESTRO DE INDICADORES						
A	ANEXO	ANEXO V – DOCUMENTACIÓN METRONAMICA					

SIGLAS Y ACRÓNIMOS

SDP Secretaría Distrital de Planeación

SPD-DEU Dirección de Economía Urbana, Secretaria Distrital de Planeación

AFD Agencia Francesa de Desarrollo
POTs Planes de Ordenamiento Territorial
CAR Corporación Autónoma Regional

DANE Departamento Administrativo Nacional de Estadística

MOT Modelo de Ocupación Territorial VOS Visión de Ocupación del Suelo

CAMACOL Cámara Colombiana de la Construcción
PTAR Planta de tratamiento de aguas residuales

American Standard Code for Information Interchange/Código

ASCII Estándar Estadounidense para el Intercambio de Información – Es

un código de caracteres basado en el alfabeto latino

Geodatabase de archivos - Estructura de datos utilizada en

.gdb ArcGIS para edición y administración de datos

DEFINICIONES

Datos raster: Es una matriz de celdas o píxeles organizadas en filas y columnas, donde cada celda contiene un valor que representa información de un atributo.

Datos vector o vectoriales: Representación de objetos espaciales por medio de puntos, líneas o polígonos, que contienen uno o varios atributos.

Georreferenciación: Técnica utilizada para asignar una ubicación espacial específica (coordenadas) a una entidad cartográfica como mapas o datos vectoriales o raster.

Model builder: Aplicación utilizada para crear, editar y administrar modelos como flujos de trabajo que relacionan bases de datos, herramientas de geoprocesamiento y generan salidas.

Shape/Shapefile: Formato de almacenamiento de datos vectoriales en ArcGIS.

Imagen satelital multiespectral: Se refiere a una imagen satelital que es sensible a un rango de longitud de onda específica del espectro electromagnético.

Imagen satelital pancromática: Tipo de imagen satelital en blanco y negro sensible a todas las longitudes de onda del espectro visible. Esta imagen es utilizada para mejorar la resolución de las imágenes tomadas en otras longitudes de onda con menor resolución. Por ejemplo, una imagen Landsat multiespectral tiene una resolución de 30x30, pero si se utiliza la imagen pancromática para mejorarla se puede tener una resolución de 15x15.

Imagen satelital RGB o falso color: Es la combinación de las bandas que son sensibles a las zonas del espectro visible específicas a los colores rojo, verde y azul. Esto resulta en una imagen que se visualiza en los colores a los que estamos acostumbrados.

Panchromatic sharpening: Se refiere al proceso de combinación entre una imagen pancromática de alta resolución y una imagen multiespectral de menor resolución para crear una imagen en color de alta resolución.

Aptitud ambiental: Son restricciones de ocupación de ciertos usos del suelo impuestas por las características ambientales del territorio. Estas restricciones implican riesgos como la remoción en masa, las zonas de inundación y los incendios forestales, en este caso.

Zonificación territorial: Son reglas dadas al territorio, en forma de restricciones o incentivos, con el fin de estimular o no, la ocupación de ciertos usos del suelo impuestas por los Planes de Ordenamiento Territorial.

Accesibilidad: En este informe se entiende por accesibilidad como la importancia de cada uno de los elementos de la infraestructura vial (red vial, líneas de transporte, estaciones) para las actividades asociadas a cada tipología de uso del suelo. Esta accesibilidad se

define por un peso (importancia relativa) y una distancia a la cual esta importancia va decayendo.

Relaciones de vecindad: Es la atracción (signo positivo) o repulsión (signo negativo) entre dos tipos de usos del suelo (por ejemplo: uso industrial vs. uso residencial o uso comercial vs. uso industrial).

Inercias: Es la probabilidad que tiene una celda (que representa un determinado uso del suelo) a convertirse en un nuevo tipo de uso del suelo en un tiempo establecido.

INTRODUCCIÓN

Los planificadores urbanos deben prever cómo la demanda de viajes se ve afectada por los cambios en el territorio. Del mismo modo, es necesario estimar cómo los nuevos desarrollos en transporte pueden modificar dichas actividades y los usos del suelo asociados. En las ciudades de rápido crecimiento como Bogotá y sus municipios vecinos, los procesos y las prácticas convencionales en planificación de transporte y territorio, suelen ser bastante complejas. La práctica convencional se enfoca en visiones, escenarios, planes, políticas y proyectos, que tradicionalmente se diseñan y evalúan de forma aislada y se relacionan con un uso específico del suelo o un problema particular de transporte. Las consecuencias de estos escenarios, planes y/o políticas sobre el transporte y los usos del suelo a un nivel regional no han recibido la atención suficiente (Geurs 2006). Además, las consecuencias espaciales y temporales de estos escenarios, planes y/o políticas no se pueden prever por completo con las prácticas convencionales.

En las ciudades del mundo en desarrollo, de rápido crecimiento, este problema es vital. Aunque se ha desacelerado, Bogotá ha experimentado un rápido crecimiento urbano que ha causado complejos desafíos de planificación para las autoridades locales. La región de la sabana de Bogotá ha experimentado un rápido crecimiento, con una gran variabilidad en el espacio y una dinámica urbana compleja. La población de esta región pasó de 7,942,843 habitantes en 2005 a 9,396,697 en 2016. El área urbana de esta región también se ha expandido dramáticamente, principalmente en los municipios vecinos.

Esta expansión ha coincidido con el uso de prácticas convencionales de planificación urbana. La falta de una política apropiada y coordinada entre las autoridades locales, la gobernación de Cundinamarca y la nación, ha llevado a que la región se desarrolle casi que accidentalmente. Además, la expansión de la infraestructura de transporte no ha sido capaz de acomodarse al aumento en la demanda de viajes, causando altos niveles de congestión.

Las prácticas actuales de planificación del transporte y usos del suelo, no pueden seguir el rápido ritmo del crecimiento urbano, particularmente en los municipios vecinos, lo que ha causado serios problemas de congestión u ocupación no controlada. Uno de los problemas es que temas específicos de transporte o de usos del suelo se gestionan de forma separada. Por un lado, los planificadores de transporte se centran en resolver problemas de transporte y mejorar (ampliar capacidad) el sistema, prestando poca atención a la distribución espacial de actividades y sus usos asociados. Por otro lado, los urbanistas se enfocan en enfrentar el crecimiento (viviendas, población) y los usos del suelo sin considerar los efectos sobre la demanda de transporte. El uso de herramientas integradas de apoyo a la toma de decisiones y la construcción de escenarios, pueden mejorar esta situación. Sin embargo, en la práctica, Bogotá y sus municipios vecinos aún no cuentan con un arreglo institucional sólido, ni un proceso integrado y efectivo de planificación conjunta del transporte y los usos del suelo.

Recientemente, los modelos de usos del suelo basados en autómatas celulares (CA) urbanos, han venido siendo utilizados debido a su simplicidad, flexibilidad e intuición y

particularmente, debido a su capacidad para incorporar las dimensiones espaciales y temporales de los procesos de ocupación (Santé, García et al. 2010). Los modelos CA proporcionan un entorno dinámico de modelación que puede simular cambios complejos de usos del suelo, transporte y su interacción. Este enfoque se ha utilizado ampliamente para estudiar el proceso espacial de los cambios en los usos del suelo a lo largo del tiempo (Aljoufie, Zuidgeest et al. 2013; van Vliet, Hurkens et al. 2012; Liu y Phinn 2003).

En este contexto, la Universidad de Los Andes en conjunto con la Secretaría Distrital de Planeación de Bogotá, presentan este estudio donde se ha aplicado, calibrado y validado para el caso de Bogotá y 17 municipios vecinos (Zipaquirá, Gachancipá, Tabio, Tocancipá, Cajicá, Chía, Sopó, Tenjo, Cota, La Calera, Funza, Madrid, Mosquera, Facatativá, Bojacá, Soacha y Sibaté), un modelo basado en CA-Metronamica¹.

Esta herramienta permite evaluar el efecto de políticas relacionadas con el territorio y la infraestructura de transporte en la ocupación del territorio y los cambios en los usos del suelo. También permite simular escenarios en los que se cambie la zonificación o demandas de suelo, así como evaluar la implementación de nuevas infraestructuras de transporte. Este modelo puede simular el crecimiento urbano histórico y actual (2007/2016), los diferentes usos del suelo, los cambios en la infraestructura de transporte y sus posibles interacciones a largo plazo.

El contenido de este reporte final incluye la recolección y procesamiento de la información con la que se alimenta el modelo, la carga de la información, la cual consiste en la transformación de las capas al formato ASCII. También se incluyen las demandas de suelo, la zonificación, la aptitud ambiental, la infraestructura de transporte, la accesibilidad y las curvas de vecindad.

Posteriormente se describe el proceso de calibración, incluyendo una breve descripción del modelo de demanda de ocupación del suministrado por la Dirección de Economía Urbana de la SDP. Finalmente se describen los escenarios evaluados y los indicadores de cada uno de ellos.

-

¹ www.metronamica.nl

1. DEFINICIÓN DE PARÁMETROS INICIALES Y RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

Un modelo de ocupación territorial basado en CA depende de la calidad de la información utilizada. De su calidad y procesamiento, dependerá la calibración y la validación de resultados. Por tal motivo la primera parte del proyecto consistió en hacer una recopilación y auditoría de la información necesaria y disponible.

La herramienta utilizada para la modelación de la región se llama Metronamica (RIKS 2012) y permite evaluar los efectos de escenarios que integren medidas de planificación en desarrollo regional, a partir de la simulación de las interacciones entre usos del suelo e infraestructuras de transporte. Un CA es un modelo matemático utilizado para simular sistemas dinámicos, representado por un conjunto de celdas que adquieren diferentes estados, los cuales son alterados en el tiempo según una serie de reglas de transición que son sensibles a los estados de las celdas vecinas.

Metronamica permite simular los cambios en los usos del suelo a partir de la adición o variación de las características de la infraestructura vial y a partir del conocimiento histórico de las relaciones que se han presentado en la zona de studio. En este caso, el sistema dinámico a simular son los usos del suelo de la región de estudio, la cual es representada por celdas de tamaño 60x60 m. Este tamaño permite visibilizar cambios a un nivel aproximado de una manzana.

El proceso de modelación se ha dividido en cinco fases que van acordes a la metodología propuesta más adelante. Dichas fases y sus actividades se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Estructura del proceso de modelación

Fase 1: Definición de parámetros iniciales y recolección de información								
Definición de la información necesaria y disponible		Definición de los años base e inicio de simulación según la información disponible		Recopilación de la información				
Fa	ase 2: Prepar	ación	ción de la información de entrada al modelo					
Creación de capa usos del suelo año base y año calibración		Creación de capa de zonificación y aptitud ambiental para los años base año calibración		Preparación de información de infraestructura de transporte				
Fase 3: Carga de la información al modelo								
Transformación de las capas de entrada a ASCII		Carga de las capas de entrada a la herramienta		Carga de información de infraestructura inicial a la herramienta				
	Fase 4: Calibración del modelo							
Definición de las relaciones de vecindad e inercias		de	Calibración del modelo y evaluación de la bondad de ajuste	Evaluación de factibilidad de la modelación de escenarios preliminares		Selección de escenarios (8) e indicadores de evaluación		

Fase 5: Modelación de los escenarios							
Creación de capas de entrada a la herramienta para la simulación de los escenarios	Cálculo de demandas de suelo	Simulación de cada uno de los ocho escenarios	Cálculo de los indicadores para cada escenario				

1.1. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

Como se ha mencionado, la zona de estudio comprende la ciudad de Bogotá y los municipios de Soacha, Sibaté, La Calera, Sopó, Tocancipá, Gachancipá Zipaquirá, Cajicá, Tabio, Chía, Tenjo, Cota, Funza, Mosquera, Madrid, Facatativá y Bojacá, tal como se muestra en la Figura 1.

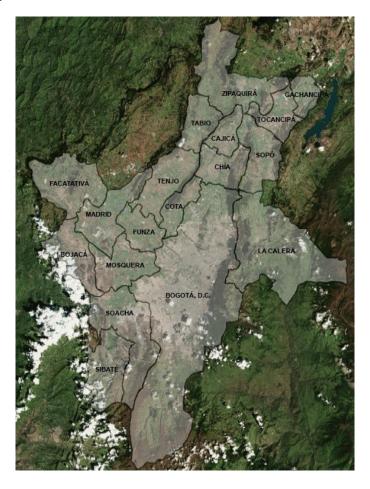


Figura 1. Zona de estudio

Para esta zona de estudio se definieron los siguientes parámetros y variables que guiarán la recolección de información:

- Extensión temporal: se refiere a la definición del periodo de calibración y simulación, es decir, el periodo de información histórico. En este caso se seleccionó como año base el correspondiente a 2007/2009. Como punto de comparación se tiene el año 2014/2016. Esto es lo que se denomina el periodo histórico. El año de simulación a largo plazo es el año 2050.
- Extensión espacial: incluye la información de los límites de la región a estudiar. En este caso, corresponde a los diecisiete municipios y Bogotá que se muestran en la Figura 1.
- Capas de usos del suelo: son las capas que incluyen la información de los usos del suelo existentes en los dos periodos seleccionados (extensión temporal).
- Mapa de zonificación territorial y ambiental: los mapas de zonificación territorial y ambiental imponen restricciones o tendencias a estimular o restringir, a partir de la regulación definida en los Planes de Ordenamiento Territorial (POT) de la zona de estudio. También incluye información de instituciones como la CAR y el Ministerio de Medio Ambiente. Estos mapas serán utilizados para crear las reglas de transición que definirán cómo se altera el estado de cada celda.
- Resolución: Se refiere al tamaño de la celda que representará una clasificación de los usos del suelo y los mapas de zonificación territorial y ambiental. Para este caso el tamaño utilizado es de 60x60 m.

1.2. RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

Debido a que el proceso de calibración depende de la calidad de la información, es fundamental obtener datos de fuentes que sean de confianza y que correspondan a la extensión temporal definida. Para Bogotá se cuenta con las bases catastrales de la Secretaría Distrital de Planeación (SDP). Para los municipios, hay restricciones en la información y dudas con respecto a su calidad y a los años que representan. En estos casos, solamente se encontró información para los años 2007 y 2014.

Otro inconveniente con la información de los municipios, tiene que ver con la coherencia y uniformidad, ya que no existe la misma información para todos los municipios en cantidad, calidad y características. En algunos casos, no se encontró información útil para el proyecto de ninguna clase. Debido a esto, la solución fue utilizar imágenes satelitales para obtener las "huellas urbanas" de ocupación y suelo disponible. Posteriormente, se asignó el uso del suelo utilizando la información disponible. Así, esta técnica permite conocer cómo se han extendido los centros urbanos en la zona de estudio en un determinado periodo de tiempo.

A partir de este diagnóstico de los recursos de información, se definió como periodo base los años 2007/2009 y como periodo de calibración el 2014/2016. Ante esto, las fuentes suministradas por parte de la SDP fueron:

 Modelo de Ocupación Territorial (MOT) 2007, Gobernación Cundinamarca (en formato *.gdb). Este archivo contiene información de clasificación del suelo (suelo rural, urbano y suburbano), sistema funcional (red vial: arterias, intersecciones, corredores), sistema natural (afluentes, áreas protegidas, ríos, rondas, humedales), división predial, ocupación, uso del suelo propuesto y límite municipal de los municipios de Bojacá, Cajicá, Chía, Cogua, Cota, El Rosal, Faca, Funza, Fusa, Gachancipá, Granada, La Calera, Madrid, Mosquera, Nemocón, Sibaté, Silvania, Soacha, Sopó, Subachoque, Tabio, Tenjo, Tocancipá, Zipacon y Zipaquirá.

- Visión de Ocupación del Suelo (VOS) 2014. SDP (en formato *.gdb). Esta base de datos incluye información de la clasificación general del suelo (expansión, protección, rural y urbano), uso propuesto rural para todos los municipios de Cundinamarca y ocupación urbana para los municipios de la sabana de Bogotá.
- Censos de CAMACO 2006-2016. Coordenada Urbana. La base de datos del proyecto denominado Coordenada Urbana recopila información de fechas de construcción y venta de los proyectos residenciales, comerciales e industriales ejecutados desde el año 1990 hasta el año 2016.
- Socioeconómico DANE 2005. Vivienda, hogares y personas. Se incluye la información del número de viviendas, hogares y personas para toda Cundinamarca.
- Cuerpos de agua. Información de humedales, embalses, lagos y ríos principales de la región.
- Vocación de usos del suelo Bogotá 2009. Base de datos de los usos del suelo de Bogotá para el año 2009. La SDP reclasificó esta información en un atributo denominado Autómata 2.
- Vocación de usos del suelo Bogotá 2016. Base de datos de los usos del suelo de Bogotá para el año 2016 en un atributo denominado DEU. La SDP reclasificó esta información en un atributo denominado Autómata 2.
- Lotes Bogotá a 2016. Lotes de Bogotá con su valor del suelo y estrato.
- Otros. Información de reservas ambientales, remoción en masa, patrimonio, vías principales.
- Actividad extractiva. Títulos mineros, zona de minería especial, recuperación y transición.
- Red de energía. Redes energéticas en el territorio.
- Curvas de nivel.
- Zonas Homogéneas. Usos del suelo según el IGAC para algunos municipios.
- Títulos mineros desde 1991 hasta 2014.
- Corine con zonas mineras y zonas de tierras desnudas y degradadas.
- Vías región. Incluye con todas las vías de Bogotá y los municipios, incluyendo proyectos propuestos.

El Grupo SUR también utilizó otras fuentes de información para complementar la brindada por la SDP, las cuales son:

- Red vial del modelo de transporte de Bogotá del grupo de Sostenibilidad Urbana y Regional de la Universidad de Los Andes.
- Malla vial de Bogotá del grupo de Sostenibilidad Urbana y Regional de la Universidad de Los Andes.

Como resultado de la recopilación y procesamiento de todas las fuentes de información descritas anteriormente, en la Figura 2 y Figura 3, se muestran los mapas resultantes para cada periodo seleccionado, respectivamente.

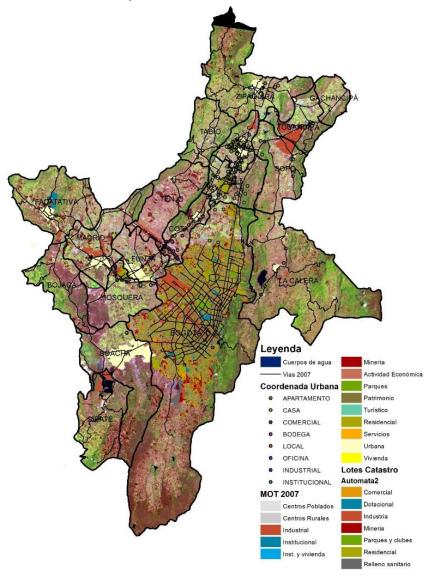


Figura 2. Mapa de la zona de estudio con información obtenida para el periodo 2007/2009

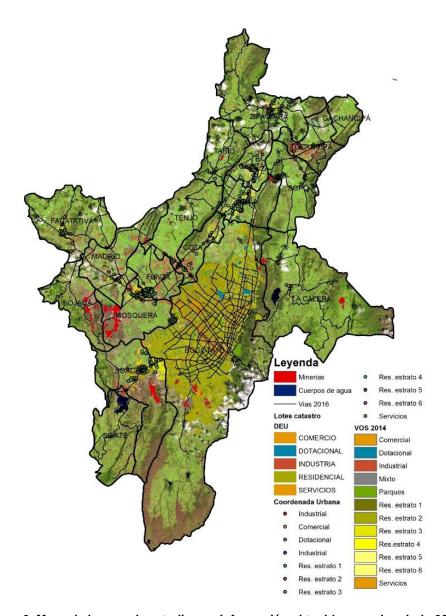


Figura 3. Mapa de la zona de estudio con información obtenida para el periodo 2014/2016

2. PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

En esta sección se describen los procesos realizados para la creación de mapas y capas a partir de la información obtenida. Esta información permitirá establecer la clasificación de los usos del suelo y las variables de entrada a la herramienta Metronamica, tales como la zonificación territorial y ambiental para los periodos 2007/2009 y 2014/2016.

2.1. CAPAS DE USOS DEL SUELO

La creación de las capas de usos del suelo, se resume en dos procesos principales: el primero es el procesamiento de las imágenes satelitales de las que se obtendrán las "huellas urbanas" para los dos periodos de análisis. El segundo, es la asignación de los usos del suelo a dichas "huellas urbanas".

2.1.1. Imágenes satelitales

El procesamiento de las imágenes satelitales consiste en obtener un *raster* que permita conocer los espacios ocupados (huellas urbanas) y el territorio disponible (susceptible a ser ocupado) en la zona de estudio, en los casos donde no hubo información más precisa. Este procedimiento inicia con la obtención de la imagen para el año base (2007/2009), la cual debe ser con la menor nubosidad posible y mejor resolución espacial, de acuerdo a las necesidades del proyecto. Para ello, se obtuvo una imagen satelital *Landsat 7 etm+slc-off* del año 2007 con resolución 30x30 m.

El siguiente paso es la corrección de la imagen debido al sensor *slc-off* (genera líneas paralelas de error en la imagen) y el mejoramiento de la resolución de la imagen al utilizar las propiedades de la imagen pancromática. Este procesamiento se realizó con el software *Erdas Imagine* y la herramienta *Pansharpened* en ArcGIS. El resultado final es una imagen con resolución 15x15 m y sin el error del sensor *scl-off*. Para mayor información sobre este proceso el lector se puede referir a USGS (2017).

Este proceso se repite con una imagen satelital que corresponde al periodo final del proceso de calibración (2014/2016), obteniendo también una imagen con resolución 15x15 m y con corrección atmosférica.

Estas dos imágenes se clasificaron a partir de un proceso de interpretación de imágenes aéreas. La metodología utilizada para dicha interpretación se denomina "clasificación supervisada", en la cual se recolectan muestras significativas de cada clase en toda la fotografía satelital y se procede a ejecutar el software para que busque los pixeles con los mismos criterios estadísticos de las muestras seleccionadas. Este procedimiento se realiza en ArcGIS utilizando las herramientas *Image classification* y *Maximum Likelihood Classification*. Esta última herramienta es la que realiza la clasificación supervisada de toda la imagen satelital teniendo en cuenta la varianza y correlación de las firmas espectrales de las muestras.

El resultado final del procesamiento de imágenes y la clasificación supervisada es un *raster* para cada periodo, clasificado en cuerpos de agua, suelo disponible, industrias visibles y centros poblados, el cual debe ser mejorado asignándoles los usos del suelo correspondientes a las huellas urbanas. En la Figura 4 se muestra el procedimiento realizado en este caso.



Figura 4. Diagrama del proceso de procesamiento de imagen para el periodo 2007/2009

2.1.2. Clasificación usos del suelo

Al obtener un *raster* base a partir del procesamiento de las imágenes satelitales (en la cual se conoce los sectores ocupados y el suelo disponible), se procede a utilizar la información suministrada por la SDP para definir los usos del suelo correspondientes al suelo identificado como ocupado. Las categorías de usos del suelo que se definieron y las bases de datos utilizadas para cada uno se presentan en la Tabla 2.

En Metronamica los usos del suelo se clasifican en tres estados, los cuales definen su comportamiento ante las reglas de transición. El primer estado se denomina disponible (conocido como *vacant*) y se caracteriza por ser un uso pasivo, es decir, no tiene la capacidad de cambiar a otros usos, sino por el contrario, tiene las características adecuadas para ser ocupado por otras categorías. El segundo estado son los usos activos (conocidos como *function*), los cuales cambian o reemplazan a otros usos según las reglas establecidas. Finalmente, los usos estáticos (*feature*) son usos del suelo que permanecen sin cambios a lo largo del tiempo, debido a su importancia ambiental o patrimonial.

Debido a que entre la información disponible existe información de mayor calidad en Bogotá que en los municipios, las bases de datos de *vocación de usos del suelo* de los años 2007 y 2016, que tienen como atributos los usos *DEU* y Autómata 2 por cada lote catastral, fueron las que se utilizaron como referencia principal.

Así, con la información de usos del suelo correspondiente a Bogotá, y añadiendo los usos del suelo de la capa de *vocación de usos del suelo* del año 2008 y 2016, se definieron las categorías de usos del suelo a usar, las cuales fueron asignadas a la huella urbana de la capital. En el caso del uso residencial, se tuvieron en cuenta los estratos socioeconómicos a partir de la capa de lotes catastrales. Para ello se utilizaron los atributos de la capa denominados *Autómata 2*, *DEU* y *Estratos*. En la Tabla 2 se muestran las categorías de usos de suelo definidas para el modelo, así como sus características y origen.

Tabla 2. Categorías de usos del suelo y fuentes de información utilizadas

No.	Categoría de uso del suelo	Estado Metronamica	Definición	Fuentes de información 2007/2009	Fuentes de información 2014/2016
0	Disponible	Vacant -	Uso disponible	Procesamiento de	Procesamiento de
	Disportible	Disponible	para su ocupación		imagen satelital
				Vocación de usos	Vocación de usos
			Residencial con	, ,	Bogotá (Autómata 2 y
1	Residencial	Function - Activo	ocupación mayor	estratos)	estratos)
'	estrato bajo		al 60% de	MOT (Julio Gómez)	VOS
			estratos 1 y 2	Coordenada Urbana	Coordenada Urbana
				(usos y estratos)	(usos y estratos)
		Function - Activo		Vocación de usos	Vocación de usos
	Residencial estrato medio		Residencial con	, ,	Bogotá (Autómata 2 y
2			ocupación mayor	estratos)	estratos)
_			al 60% de	MOT (Julio Gómez)	VOS
			estratos 3 y 4	Coordenada Urbana	Coordenada Urbana
				(usos y estratos)	(usos y estratos)
	Residencial estrato alto			Vocación de usos	Vocación de usos
			Residencial con		Bogotá (Autómata 2 y
3			ocupación mayor	estratos)	estratos)
			al 60% de estratos 5 y 6	MOT (Julio Gómez)	VOS
				Coordenada Urbana	Coordenada Urbana
				(usos y estratos)	b(usos y estratos)
	Industrial	Function - Activo	Uso industrial (incluyendo agroindustrias)	Vocación de usos	Vocación de usos
				Bogotá (Autómata 2 y	
4				estratos)	VOS
7	industrial			MOT (Julio Gómez)	Coordenada Urbana
				Coordenada Urbana	Identificado en
				(usos y estratos)	imagen satelital

No.	Categoría de uso del suelo	Estado Metronamica	Definición	Fuentes de información 2007/2009	Fuentes de información 2014/2016
5	Comercial	Function - Activo	Uso comercial (tiendas, centros comerciales, etc.)	Vocación de usos Bogotá (Autómata 2 y estratos) MOT (Julio Gómez) Coordenada Urbana (usos y estratos)	Vocación de usos Bogotá (Autómata 2) VOS Coordenada Urbana
6	Mixto	Function - Activo	Residencial entre 40% a 60% de ocupación	Vocación de usos Bogotá (Autómata 2)	Vocación de usos Bogotá (Autómata 2)
7	Servicios	Function - Activo	Servicios de transporte, servicios fúnebres, etc.	Vocación de usos Bogotá (Autómata 2 y estratos) MOT (Julio Gómez) Coordenada Urbana	Vocación de usos Bogotá (Autómata 2) VOS Coordenada Urbana
8	Cuerpos de agua	Featured - Fijo	Humedales, ríos, embalses y lagos	Procesamiento de imagen Cuerpos de agua MOT Lagos MOT Ríos Bogotá	Procesamiento de imagen Cuerpos de agua MOT Lagos MOT Ríos Bogotá
9	Parques y clubes	Featured - Fijo	Parque y clubes	Vocación de usos Bogotá (Autómata 2)	Vocación de usos Bogotá (Autómata 2)
10	Dotacional	Featured - Fijo	Servicios públicos, cultural, bienestar, educativo, defensa, salud, seguridad.	Vocación de usos Bogotá (Autómata 2) MOT (Julio Gómez) Coordenada Urbana	Vocación de usos Bogotá (Autómata 2) VOS Coordenada Urbana
11	Pistas de aeropuertos	Featured - Fijo	Pistas de aeropuerto El Dorado y Guaymaral	Identificación en imagen satelital	Identificación en imagen satelital
12	Vías	Featured - Fijo	Vías principales de la región	Vías región Malla vial Modelo Bogotá Uniandes Vías propuestas	Vías región Malla vial Modelo Bogotá Uniandes Vías propuestas
13	Relleno sanitario	Featured - Fijo	Rellenos sanitarios	Identificación en imagen satelital	Identificación en imagen satelital
14	Minería	Featured - Fijo	Zonas de minería según títulos mineros y Corine	Títulos mineros y Corine	Títulos mineros y Corine

De acuerdo a la información disponible, se hizo un procesamiento y agregación, cuyo resultado fueron celdas de 60x60 m, cada una con un uso del suelo predominante. Para ello se utilizó la herramienta resample (remuestreo, herramienta que cambia la resolución espacial de un *dataset raster* y establece reglas para agregar o interpolar valores en los nuevos tamaños de píxel), cuyo proceso se muestra en la Figura 5.

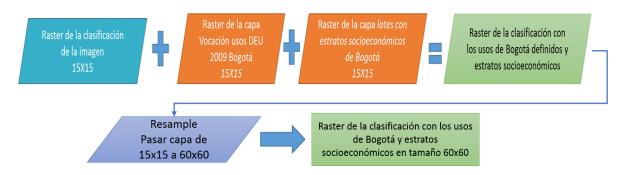


Figura 5. Asignación de usos del suelo para Bogotá

Las técnicas de remuestreo establecidas en ArcGIS diseñadas para realizar el cambio en el tamaño de celda son: más cercano, mayoría, bilineal y cúbica. En este caso se utilizó la técnica de "mayoría" o "majority", la cual determina el nuevo valor de la celda (uso del suelo predominante) basándose en los valores más repetidos dentro de la ventana de filtro. La opción majority tiende a proporcionar mejores resultados que la opción nearest y las opciones bilineal y cúbica no deben usarse en datos categóricos.

Con el método de remuestreo de mayoría, se encuentran las celdas más cercanas al centro de la ventana de filtro y utiliza la mayoría de los vecinos para definir la resolución resultante. El resultado del *resample* construye un nuevo *raster* con pixeles de 60x60 m en el que su valor de uso de suelo depende básicamente de los pixeles preponderantes de 15x15 m que contenía. En la Figura 6 se presenta un ejemplo en el que se crea un *raster* de resolución 60x60 a partir de un *raster* con resolución 15x15. Cada color corresponde a una categoría diferente de uso del suelo. El método *majority* encontrará las 4 celdas en el *raster* de 15x15 que son más cercanas al centro de la celda del *raster* de 60x60 y utilizará el valor de uso del suelo correspondiente a la categoría con una mayoría simple dentro de ese conjunto de 4 celdas.

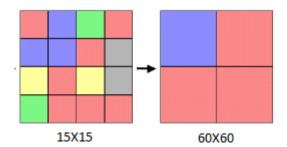


Figura 6. Ejemplo ilustrativo de la herramienta resample

Este mismo procedimiento fue el que se realizó para la elaboración de la capa de usos del suelo de Bogotá en el año 2016, cuyo resultado fueron las capas con la clasificación de Bogotá para ambos periodos.

Por su parte, la información de los municipios fue tomada a partir de la base de datos de Modelo de Ocupación Territorial (MOT) para el periodo de 2007/2009 y de la base de datos de Visión de Ocupación del Suelo (VOS) para el periodo 2014/2016. En ellas se incluye una gran cantidad de clasificaciones de usos del suelo que además varían según el municipio. Por esta razón, se debieron crear grupos de estas clasificaciones para que fueran coherentes a la clasificación de usos del suelo ya definida (Tabla 2). Respecto a la información del MOT se hacen las siguientes aclaraciones:

- Toda clasificación que correspondiera a uso industrial se definió como este uso. Cabe anotar que varias de estas clasificaciones corresponden al uso agroindustria.
- Las clasificaciones de institucional se añadieron al grupo servicios.
- Las clasificaciones de PTAR o referentes a servicios públicos se añadieron al grupo dotacional.
- Las clasificaciones llamadas como residencial, vivienda o casa se agruparon en residencial.

La información correspondiente del año 2014 para los municipios, es decir, la de VOS, también se agrupó teniendo en cuenta que:

- Toda clasificación que correspondiera a uso industrial se definió como este uso. Cabe anotar que varias de estas clasificaciones corresponden al uso agroindustria.
- Centros poblados se añadió a residencial.
- Las categorías de protección ambiental se agruparon en suelo disponible¹.

Luego de realizar esta nueva clasificación, se procedió a añadirla a la capa obtenida de Bogotá, teniendo como resultado un nuevo *raster* con usos en toda la región. Debido a que esta la información disponible no es de tan alta calidad y no incluía todos los municipios ni todos los usos, se utilizó la base de datos de Coordenada Urbana para complementarla y mejorarla.

Para la capa de usos del suelo del periodo 2007/2009, la base de datos de Coordenada Urbana se filtró para obtener los proyectos ejecutados desde 1990 hasta el año 2009 (en el campo "inicio año") dentro de los municipios. De igual manera, se realizó una clasificación nueva debido a las diferencias en los nombres de los usos del suelo con los de Bogotá. Respecto a esto cabe aclarar que:

- Las clasificaciones definidas como apartamento, casa o habitaciones se agregaron como uso residencial.
- Las clasificaciones definidas como bodegas, oficinal, local o consultorio se agregaron como comercial.

21

¹ Posteriormente, con el desarrollo de las capas de aptitud ambiental, las zonas de reserva quedan como zonas protegidas.

- Las clasificaciones definidas como parqueadero e institucional se agregaron a servicios.
- Se encontró que en la clasificación lote existían proyectos de industria, comercio y residencial. Por esta razón, se filtraron y agregaron a las categorías correspondientes.

Para la capa del periodo 2014/2016 se filtró la información de Coordenada Urbana desde el año inicial de la base de datos hasta el año 2016, teniendo en cuenta las mismas reglas para la agrupación de los usos del suelo.

En esta base de datos, se dio prioridad a los valores tomados de Coordenada Urbana. Debido a que aún con estas fuentes de información no se completaba la información necesaria para todo el territorio, fue necesario asumir que el uso de las celdas definidas como ocupado, correspondía al uso más cercano definido por la base de datos de Coordenada Urbana. Este mismo supuesto se realizó para asignar los estratos socioeconómicos a los usos residenciales de los municipios (ver Figura 7).



Figura 7. Proceso de asignación de usos a los municipios

Finalmente, se procedió a añadir los usos del suelo categorizados como fijos o *feature*. Así, en las capas para ambos periodos se añadió la información de los cuerpos de agua (lagos, humedales, embalses y ríos) y de los parques y clubes. Por su parte, las zonas de minería se conocen por la información de títulos mineros y *Corine*, suministrados por la SDP, las cuales también fueron añadidas a las capas de usos del suelo. A partir de las imágenes satelitales se delimitó el área de las pistas del aeropuerto y rellenos sanitarios para luego ser añadidas como usos independientes.



Figura 8. Proceso de asignación de usos estáticos o feature

De otra parte, era necesario construir la malla vial de la región para ambos periodos. La construcción de esta capa se realizó teniendo en cuenta un mapa que definía el estado de las vías propuestas, clasificándolas en no construido, construido y parcialmente construido. Dicha capa fue superpuesta con una red vial de la región en la que se encontraba toda la malla vial arterial e intermedia, aunque sin especificar si son vías propuestas o existentes.

Debido a que no existía ningún atributo que indicaba el año de construcción de las vías, para poder determinar el periodo al que debía hacer parte, se utilizó la malla vial de Bogotá del modelo de transporte del Grupo SUR de la Universidad de Los Andes, teniendo en cuenta que ésta corresponde a una actualización para el año 2010. Así mismo, se tuvo en cuenta las vías clasificadas como parcial y el plazo en el que debían haberse cumplido (ver Figura 10). Por su parte, también se verificó la existencia de algunos tramos definidos como propuestos por medio de *Google Earth*, debido a que no fue posible identificar el año de referencia de las bases de datos utilizadas.

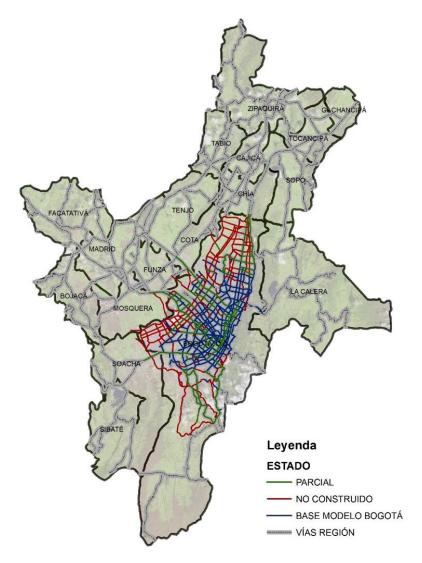


Figura 9. Bases de datos para la mala vial de la región

Después del proceso de filtración de la información de la infraestructura vial, se obtuvo como resultado final la red vial presentada en la Figura 10, en donde se presenta en color negro la malla vial arterial e intermedia para el periodo 2007/2009 y en color rojo las vías añadidas (construidas) para el periodo 2014/2016. Esto significa que la malla vial de este

último periodo corresponde a la visualizada en negro más las vías rojas. Por su parte, las vías que se encontraron como propuestas serán utilizadas para la evaluación de escenarios futuros.

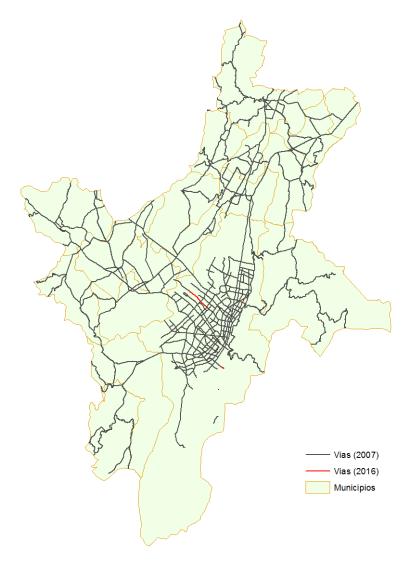


Figura 10. Comparación de malla vial arterial e intermedia en el periodo 2007/2009 (color negro) y vías añadidas (construidas) en periodo 2014/2016 (color rojo)

Como resultado final de todo este proceso, las capas de usos del suelo para cada periodo se muestran a continuación:

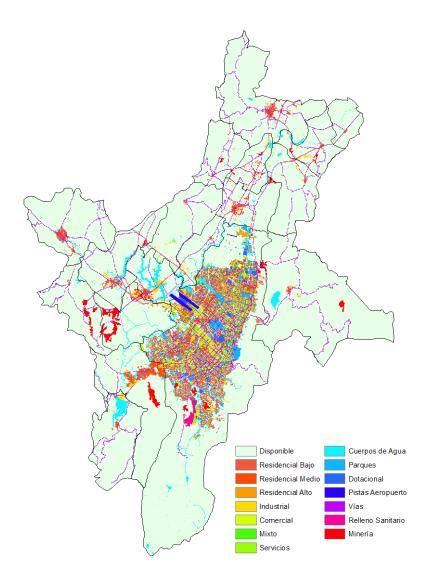


Figura 11. Capa raster de usos del suelo del periodo 2007/2009

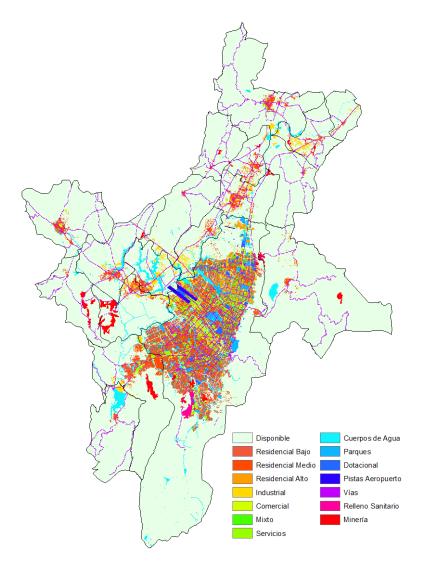


Figura 12. Capa raster de usos del suelo del periodo 2014/2016

2.2. CAPAS DE APTITUD AMBIENTAL

Uno de los parámetros mínimos que debe tener el modelo de ocupación territorial es tener una delimitación ambiental clara, la cual está definida por diferentes parámetros biofísicos que tienen como finalidad determinar si ciertas zonas son o no aptas para ser desarrolladas.

Dentro del presente proyecto, las variables biofísicas que se tuvieron en consideración para la construcción de esta delimitación fueron:

- Fenómenos por remoción en masa
- Zonas inundables
- Incendios forestales

Es importante resaltar que es decisión de cada modelador escoger los parámetros biofísicos a considerar. En este caso, las definiciones de dichos parámetros son:

- Remoción en masa: movimientos en masa incluye todos aquellos movimientos ladera abajo de una masa de roca, de detritos o de tierras por efectos de la gravedad (SGC 2016). El considerar esta variable biofísica está relacionada con el hecho que muchas residencias de ingreso bajo se encuentran ubicadas en zonas de alto riesgo y alta pendiente.
- Zonas inundables: corresponde a todas las zonas secas adyacentes a cualquier cuerpo de agua que en periodos de alta precipitación o crecientes pueden presentar inundaciones ocasionales o periódicas. El considerar esta variable biofísica está relacionada con el hecho de que en la zona estudio, varios predios y residencias de ingresos bajos se encuentran dentro de estas zonas, lo que en épocas de crecientes desencadenan emergencias ambientales y socioeconómicas en la población.
- Incendios forestales: corresponde a toda perturbación física asociada a una aceleración de procesos de oxidación con liberación súbita de energía, gases y nutrientes en forma de ceniza, que se presenta en los ecosistemas de cobertura vegetal y que tiene efectos directos sobre la fauna, flora, suelo, agua, aire paisaje y el hombre. Este fenómeno se puede dar por causas naturales o antropológicas y generar un retraso en la autorregulación de los ecosistemas existentes, llegando a la destrucción de los mismos (SIRE 2008). Entre 1999 y 2007, en Bogotá se presentaron 136 eventos que consumieron 2,241 ha de bosque y generaron perdidas económicas.

Una vez definidas las variables biofísicas que conforman la delimitación por factores de riesgo ambiental, se procedió a hacer la construcción de cada una de las capas, para finalmente construir una capa global de aptitud. Todas las capas se construyeron en el software ArcMap 10.5. A continuación se hace una descripción paso a paso de la construcción de cada capa.

2.2.1. Capa remoción en masa

Se revisó toda la información entregada por la SDP para determinar la información relevante que permita construir la capa de remoción en masa. Dentro de la información entregada, se encontró la capa: *amenaza_remoción_masa.shp*. Esta capa sólo tenía información para Bogotá.

Con base a lo anterior, se recurrió al Servicio Geológico Colombiano (SGC), en cuyo geoportal se encuentra un visor geográfico que muestra un mapa nacional de amenaza por fenómenos de remoción en masa.

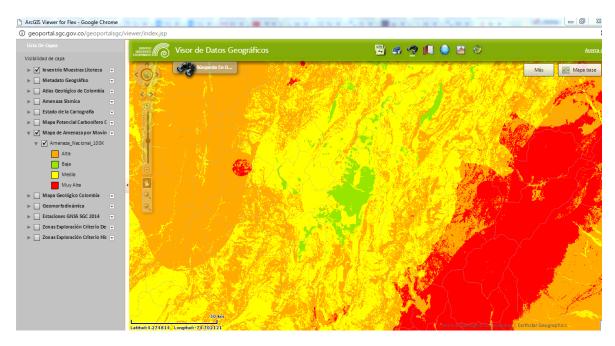


Figura 13. Visor de Datos Geográficos Fuente: Visor Datos Geográficos (SGC)

Una vez obtenida la imagen (debe guardase en formato PNG – formato permite mantener la resolución de pixel, al alejarse o acercarse), se debe agregar la capa a la tabla de contenidos de ArcMap. Una vez allí, la imagen debe georreferenciarse con la herramienta *georeferencing*. Para ello se utilizó la capa de la zona estudio. Cuando la imagen se encuentre georreferenciada, se debe transformar de formato PNG en el que se encuentra a formato .TIFF o *raster*. Para hacer esto, es necesario utilizar la herramienta *classification*.

Como se observa en la Figura 14, se hizo una construcción de varios polígonos para que el software asocie los niveles de reflectancia y el color que tiene el polígono con todos los demás de la imagen; con ello se obtiene una capa *raster* por clasificación y valor según el color de celda.

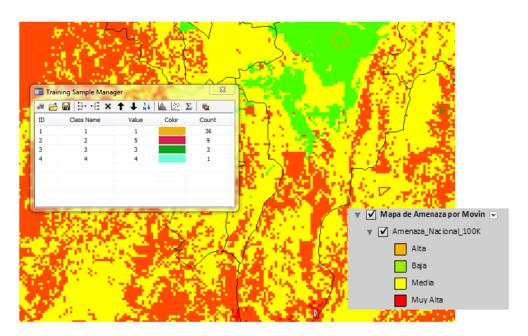


Figura 14. Herramienta Image Classification

La clasificación llevada a cabo fue la misma que el SGC. De esta forma se tiene que:

- 0 Sin color sin información
- 1 Color verde riesgo bajo
- 2 Color amarillo riesgo medio
- 3 Color naranja riesgo alto
- 4 Color rojo riesgo muy alto

De acuerdo con esta clasificación, se obtuvo una capa de remoción en masa. Sin embargo, el tamaño de celda no es acorde al ya definido. Por eso mediante la herramienta *resample* se cambió el tamaño de celda a 60x60 m.

Una vez hecho el cambio de tamaño de celda, se procede a hacer un *extract by mask* (herramienta que permite recortar la capa al tamaño del área de estudio) para obtener una capa *raster* uniforme de la zona de estudio. La capa final de remoción en masa se observa en la Figura 15.

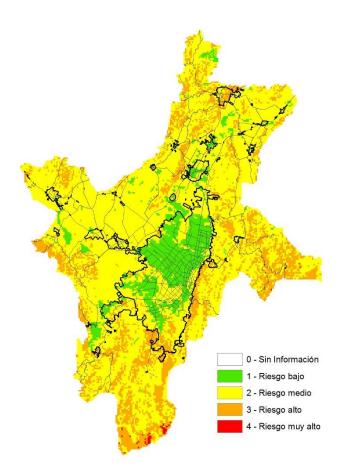


Figura 15. Capa resultante remoción en masa para la zona de estudio

2.2.2. Capa de inundación

Se procedió a revisar toda la información entregada por la SDP, para determinar cual permitiría construir la capa de zonas de inundación. Dentro de la información entregada, se encontró la capa: *Red_Hidrica.shp*.

Debido a que la capa se encontraba en otro sistema de coordenadas (WGS_1984), fue necesario proyectarla al sistema de coordenadas plano. Es fundamental que todas las capas queden en el mismo sistema de coordenadas, en el caso del presente proyecto, todas deben estar en Magna_Colombia_Bogota.

Para proyectar la capa es necesario utilizar la herramienta *projection*. Una vez hecho esto, se procedió hacer un *clip* entre la zona estudio y la capa de *Red_Hidrica.shp* con el fin de obtener así todos los cuerpos de agua de la zona de interés (ver Figura 16).

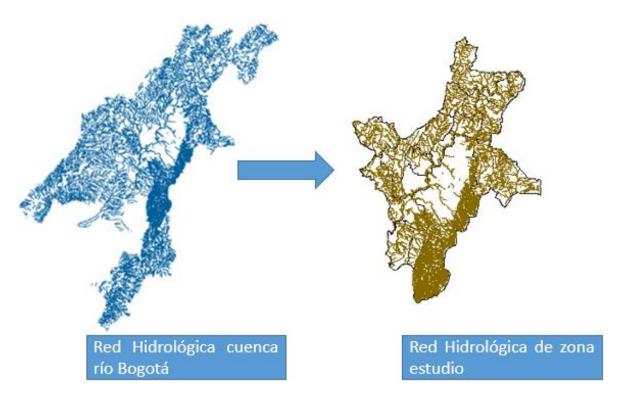


Figura 16. Capa red hídrica sin procesar ni proyectar (izquierda) y la capa de red hídrica procesada y definida para la zona estudio (derecha)

Una vez definida la red hídrica, se hizo una investigación para establecer cuáles son los lineamientos para definir la zona de inundación y con ello se encontró que, el Plan de Ordenamiento Territorial de Bogotá, Decreto de 190 de 2004, dentro de los artículos 76 y 78, tiene la siguiente definición "Ronda hidráulica: Zona de protección ambiental e hidráulica no edificable de uso público, constituida por una franja paralela o alrededor de los cuerpos de agua, medida a partir de la línea de mareas máximas (máxima inundación), de hasta 30 m de ancho destinada principalmente al manejo hidráulico y la restauración ecológica".

Por otro lado, las rondas hidráulicas de los ríos tienen una zona de amortiguación la cual se conoce como la zona de manejo y preservación de la ronda hidráulica, la cual está definida dentro del Artículo 99 del Decreto 469 de 2003, según el cual "a zona de manejo y preservación del Río Bogotá, es el área contigua a la ronda hidráulica, que tiene como mínimo 270 m de ancho. Su manejo debe contribuir al mantenimiento, protección y preservación ambiental del ecosistema".

Conocidos estos dos elementos, se construye el área de influencia con la herramienta *Multiple Ring Buffer* para obtener dos polígonos con las distancias que dicta la norma.

Una vez generados los polígonos, se creó una capa *raster* con ayuda de la herramienta *Feature to Raster* (herramienta que permite transformar capas en *vector* a *raster*), allí se

definió que el tamaño de celda fuese de 60x60 m y que tendrá la misma extensión que toda la información previamente descrita.

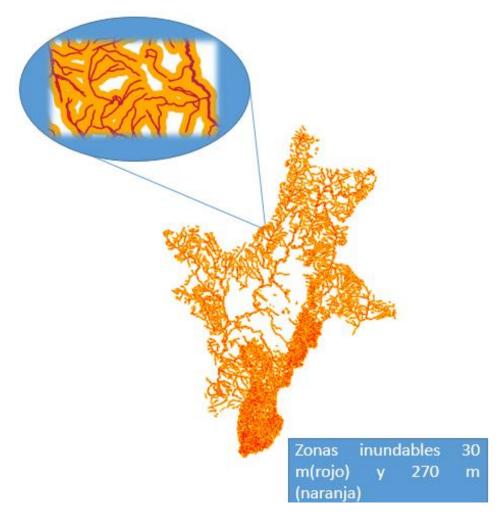


Figura 17. Capa raster resultante de los dos pasos anteriores

Finalmente se hizo una reclasificación de la capa obtenida. Para esta capa sólo existen tres categorías pues en ninguna parte de la legislación se indica una zona de riesgo medio (ver Figura 18):

- 0 Sin Color sin información
- 1 Color verde riesgo bajo
- 3 Color naranja riesgo alto
- 4 Color rojo riesgo muy alto

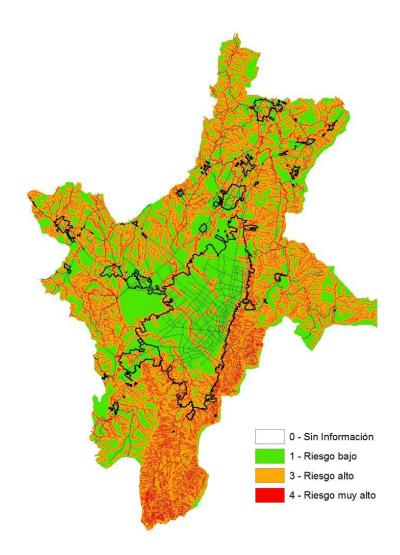


Figura 18. Capa resultante de zonas inundables para la zona de estudio

2.2.3. Capa de incendios forestales

Se procedió a revisar toda la información entregada por la SDP, para determinar cual permitiría construir la capa de incendios forestales. Dentro de la información entregada, se encontró la capa: *amenaza incendios forestales.shp*.

Sin embargo, se repite la misma situación con la información de remoción en masa, donde sólo hay información para Bogotá. Adicionalmente, dentro de la información entregada por la SDP se encuentra una capa que se llama *cobertura vegetal.shp*.

Dentro de esta capa se encuentra una columna *TIP_GEN*, la cual describe los atributos y el tipo de cobertura vegetal. Allí se observa que se tienen unas especies que según FOPAE (actual IDIGER) son especies propensas a generar incendios forestales (sotobosque, arbustivo, xenófilas y boscoso), por tal motivo con la herramienta *select by attributes* se seleccionan todas las especies que sean xenófilas, boscosas y sotobosque en la capa.

Esta capa resultante, la cual se creó mediante la herramienta *create from selected features*, es necesario transformarla de vector a *raster*. Para ello se utiliza *feature to raster* (tamaño de celda 60x60 m y extensión igual que las anteriores).

Debido a que se desconoce qué nivel de amenaza asignar a las celdas de esta capa, se sabe que son especies propicias para generar incendios, aunque se desconoce en qué proporción. Por esta razón, se asumió este valor como 2 o medio (este valor se puede modificar).

Con esta capa en *raster*, y con la capa *amenaza incendios forestales.shp* también en *raster*, se suman las dos mediante *raster calculator*. Esta herramienta permite hacer una suma entre dos capas de tipo *raster. Raster calculator* puede hacer diferentes operaciones de algebra de mapas (sumas, restas, divisiones u operaciones más complejas, todo ello mediante lenguaje Python). Las categorías resultantes obtenidas son:

- Capa amenaza incendios forestales.shp
 - 1 bajo
 - o 2 medio
 - o 3 alto
 - o 4 muy alto
- Capa cobertura vegetal seleccionada
 - o 2 media

Luego, estas capas se reclasifican con la herramienta *reclassify* en cuatro categorías nuevamente (ver Figura 19):

- 0 Sin información
- 1 Color verde riesgo bajo
- 2 Color amarillo riesgo medio
- 3 Color naranja riesgo alto
- 4 Color rojo riesgo muy alto

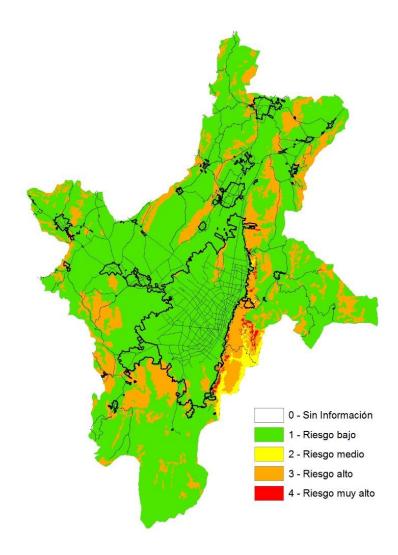


Figura 19. Capa resultante incendios forestales para la zona de estudio

2.2.4. Capa final de aptitud ambiental

La capa de aptitud ambiental corresponde a la unión o suma de las tres capas anteriormente creadas. Para realizar esto, en las tres capas ya definidas, se procedió a utilizar la herramienta *Reclassify*, de manera que se tuviera una ponderación que diera mayor peso a los riesgos más altos. De esta forma, sin importar el tipo de riesgo, cada celda con cualquiera de los tres tipos de riesgo alto, quedaría inhabilitada:

- 0 Sin información 0
- 1 Riesgo bajo 1
- 2 Riesgo medio 10
- 3 Riesgo alto 100
- 4 Riesgo muy alto 1,000

A continuación, se hace un resumen de la forma en que quedó cada capa, con el color y valor numérico correspondiente, así como el nivel de riesgo asociado a cada valor (ver Figura 20).

- Remoción en masa:
 - 0 Sin color sin información
 - 1 Color verde riesgo bajo
 - 10– Color amarillo riesgo medio
 - 100– Color naranja riesgo alto
 - 1,000 Color rojo riesgo muy alto
- Zona de inundación:
 - 0 Sin color sin información
 - 1 Color verde riesgo bajo
 - 100 Color naranja riesgo alto
 - 1,000 Color rojo riesgo muy alto
- Zona de incendios forestales:
 - 0 Sin información
 - 1 Color verde riesgo bajo
 - 10 Color amarillo riesgo medio
 - 100 Color naranja riesgo alto
 - 1,000– Color rojo riesgo muy alto

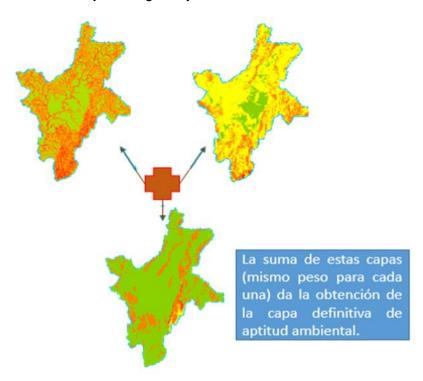


Figura 20. Formación de la capa de aptitud ambiental

Con la unión de las capas de riesgo a través de la herramienta *Raster Calculator* (Figura 21), se obtuvo un rango de sumas hasta 2,100 debido a las diferentes combinaciones posibles de las tres capas.

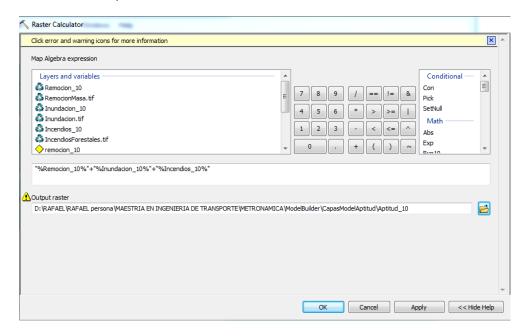


Figura 21. Herramienta raster calculator

A partir de lo anterior y teniendo en cuenta que para Metronamica el valor 1 representa el tipo de aptitud más riesgoso, se establecieron los rangos de aptitud a partir de los cuales se van a trabajar los riesgos, quedando la aptitud definitiva de la zona de estudio (Figura 22):

- 0 Sin información
- 1– Color rojo No Apto
- 4– Color naranja Aptitud Baja
- 7- Color verde claro Aptitud Media
- 10- Color verde oscuro Aptitud Total

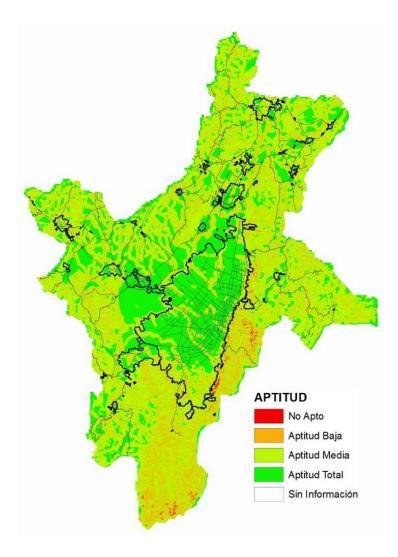


Figura 22. Capa definitiva de aptitud ambiental

Analizando la capa resultante, se muestran las zonas donde es menos riesgoso la ocupación de territorio (aptitud total hasta aptitud moderada). Éstas zonas corresponden a todas aquellas celdas que se ubican en la sabana de Bogotá.

2.2.5. Model builder de aptitud ambiental

Model Builder es un lenguaje de programación visual para crear flujos de trabajo de geoprocesamiento. Los modelos de geoprocesamiento automatizan y documentan los procesos de análisis espacial y de administración de datos. El modelo creado para la capa de aptitud base se muestra en la Figura 23, en la cual se encuentran los siguientes procesos:

 Parámetros de aptitud: corresponde a la información de entrada al modelo. Esta debe ser tipo raster y con las mismas características de las capas de usos del suelo en cuanto

- a tamaño de celda y extensión. Con valores entre 0 y 4 (0, sin Información, 1 bajo, 2 medio, 3 Alto y 4 muy alto).
- Clasificación un parámetro: en esta etapa se reclasifican los parámetros de entrada entre 0 y 1,000 (0, sin Información, 1 bajo, 10 medio, 100 Alto y 1,000 muy alto) para poder distinguir cada tipo de riesgo cuando se realice la ponderación.
- Unión de parámetros: este paso consiste en sumar las capas de entrada. La fórmula se muestra en la Figura 21.
- Clasificación de los parámetros: se reclasifica la capa resultante de la sumatoria del paso anterior en cinco categorías, de 0 a 10, donde 1 es el riesgo más alto.
- Exportación a Metronamica: este último proceso convierte la capa final en formato ASCII para poder ser ingresado al software Metronamica.

Parámetros Aptitud Parámetros Incendios For est ales 317 Reclassify (3) Incendios For est ales 317 Reclassify (3) Inundacion 11 Reclassify (2) Reclassify (2) Remocion Masa. Reclassify (4) Remocion Masa. Reclassify (4) Remocion Masa. Reclassify (4) Remocion Masa. Remocion Masa. Remocion Masa. Remocion Masa. Remocion Masa. Reclassify (4) Remocion Masa. Remocion

Modelo para la creación de la Aptitud base

Figura 23. Model Builder de aptitud ambiental

2.3. CREACIÓN DE LAS CAPAS DE ZONIFICACIÓN TERRITORIAL

En la actualidad la mayoría de las ciudades buscan herramientas para delimitar y definir la forma en que se ocupará el territorio bajo unos lineamientos claros de política pública. La forma como se logra esto es generalmente a través de un Plan de Ordenamiento Territorial, donde se divide el espacio geográfico a partir de unos criterios para estimular o desestimular el desarrollo ordenado del espacio.

Para elaborar su plano oficial de clasificación del suelo los municipios utilizan las categorías del Artículo 30 de la Ley 388 de 1997 "Clases de suelo. Los planes de ordenamiento territorial clasificarán el territorio de los municipios y distritos en suelo urbano, rural y de expansión urbana. Al interior de estas clases podrán establecerse las categorías de suburbano y de protección, de conformidad con los criterios generales establecidos en los artículos siguientes".

Sin embargo, se ha establecido que esta clasificación estructural en cada POT está en la práctica, matizada o suplantada por herramientas de nivel instrumental o procedimental de

la gestión urbanística. Una evidencia de esto se puede citar en la publicación "Región metropolitana de Bogotá: una visión de la ocupación del suelo" (SDP 2014), donde se establece que entre los factores más determinantes del modelo de ocupación están los códigos de contractibilidad o normativas de edificabilidad. Por lo tanto, el autor de dicho estudio propone una interpretación más capciosa de la clasificación del suelo urbano, rural, de expansión, suburbano y de protección. Esta propuesta se puede verificar en la cartografía a continuación:

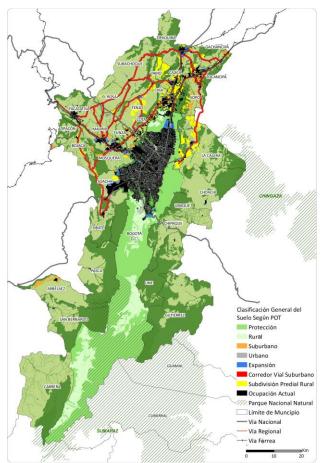


Figura 24. Proyección del modelo de ocupación de la región metropolitana de Bogotá

Para este estudio, se decidió adoptar una nomenclatura equivalente a la Ley 388 de 1997. Sin embargo, el producto final de zonificación aún se ve afectado por la debilidad de la reglamentación oficial de los POT de cada municipio, así que específicamente para la clasificación rural, expansión y suburbana, se unificaron en una sola categoría:

- Suelo Urbano: corresponde a la cabecera municipal.
- Suelo Protegido: corresponde a los usos de carácter ambiental como humedales, bosques, laguna, paramo, selvas, etc.
- Suelo de Rural-Expansión: corresponde a los usos disponibles para ocupación como pastos, maleza, bodegas, suburbano, etc.

A continuación, se presentan los pasos realizados para el procesamiento de la información referente a la zonificación territorial:

- Recolección de información POT municipios. El Grupo de Estudios de Sostenibilidad Urbana y Regional, SUR, consiguió los shapes de los POT de 5 de los 17 municipios en el proyecto. Estos son Cota, Facatativá, Funza, Madrid, Mosquera y Chía.
- 2. Recolección de información IGAC. Los municipios que tenían esta información disponible fueron Bojacá, La Calera, Sopó, Tabio, Gachancipá, Zipaquirá, Soacha, Cajicá y Bogotá.
- 3. Digitalización de información oficial. Para los municipios faltantes se decidió hacer una búsqueda de documentos oficiales de las alcaldías y proceder a digitalizar manualmente sus usos del suelo agrupándolos en las tres categorías descritas. Estos municipios fueron Tocancipá, Tenjo y Sibate, (ver Anexo I Mapas digitalizados de los planes de ordenamiento territorial de municipios). El resultado de los pasos anteriores se puede ver en la Figura 25.
- 4. **Conversión a los usos de Metronamica.** La herramienta necesita que la zonificación se clasifique en las categorías "permitido" y "prohibido". Por esta razón, los usos de suelo Urbano y Rural-Expansión se clasificaron como permitidos para el desarrollo, mientras que el uso Protegido se clasificó como prohibido. Ver Figura 26.

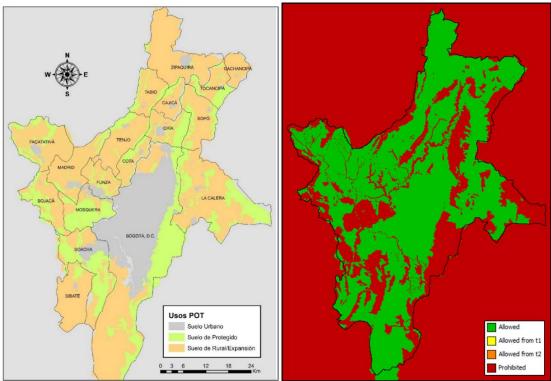


Figura 25. Mapa usos POT

Figura 26. Mapa resultante zonificación

2.3.1. Model builder de la zonificación territorial

El modelo de zonificación permite identificar a través de varias herramientas de agrupación y reclasificación, los usos que serán prohibidos o permitidos en el modelo (ver Figura 29). La zonificación se genera de acuerdo a los POT de los municipios. Sin embargo, es posible agregar más reglas para zonas específicas en la fase de creación de los escenarios. Los distintos procesos del *model builder* son:

- Municipios. Son las capas de entrada a la herramienta. Para unir un municipio al modelo de zonificación se requiere únicamente una capa vector con un atributo llamado "POT" que tenga una clasificación numérica o el uso en caracteres: suelo urbano (1), protegido (2) y rural-expansión (3).
- 2. Agrupación/Clasificación 1 y 2. Estos pasos consisten en la transformación de las capas vector de los municipios a raster, así como la clasificación de los usos POT adoptada. Si el municipio tiene los valores del atributo llamado "POT" en caracteres, debe ingresarse la capa por el primer merge (Figura 27), mientras que si son numéricos debe ingresar por el segundo merge (Figura 28). La herramienta merge permitirá combinar diferentes shapes del mismo tipo de datos (líneas, puntos o polígonos) en uno solo.

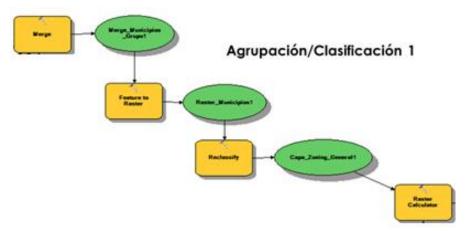


Figura 27. Agrupación/Clasificación 1

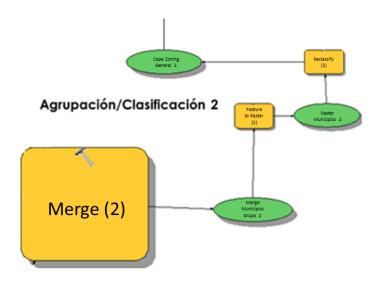


Figura 28. Agrupación/Clasificación 2

3. **Unión/Clasificación 3.** Consiste en la unión de las capas rasterizadas que pueden verse en la Figura 25 (Mapas POT) y su posterior clasificación para ingresar a Metronamica con las categorías permitido (Urbano y Rural/Expansión) y prohibido (Protegido).

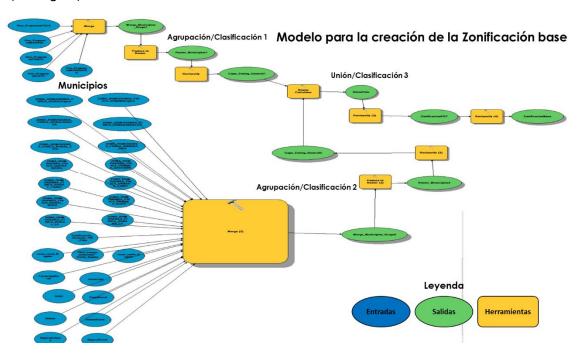


Figura 29. Model Builder zonificación base

3. LA HERRAMIENTA METRONAMICA

Metronamica (RIKS 2012) es una herramienta de ayuda para planificadores y tomadores de decisión. Fue diseñada para simular y evaluar los efectos integrados de diferentes políticas en el desarrollo urbano y regional. La herramienta simula de forma interactiva el impacto de una variedad de influencias externas (crecimiento de la población, cambios macroeconómicos) y políticas (zonificación del territorio, políticas de conservación ambiental, políticas de densificación, etc.) sobre el desarrollo de una ciudad, región, país o continente. Bajo diferentes escenarios, se pueden realizar análisis que ayuden a evaluar planes alternativos de ocupación del territorio bajo diversas condiciones externas.

Esta herramienta consiste en un modelo dinámico y espacial de cambios de usos del suelo. Los cambios en el uso del suelo se simulan en función de una serie de atributos. En primer lugar, existen factores externos como el crecimiento de la población o la disminución de áreas naturales (suelo disponible), lo cual determina la demanda de los diferentes usos de suelo. La población y los empleos se localizan en diferentes zonas, según su atractividad. Esta atractividad depende a su vez de una serie de factores, como las actividades existentes y las características locales, como la accesibilidad. Finalmente, los usos del suelo se determinan en función de factores socioeconómicos, regulación y factores biofísicos.

La herramienta se calibra con base en los cambios históricos del uso del suelo, el cual se extrapola para simular desarrollos futuros. Una vez hecho esto, es posible experimentar con escenarios, cambios de política y cambios de influencias externas, como por ejemplo planes de ordenamiento, expansión de la red de transporte o escenarios de crecimiento de la población. Esto permite a los planificadores obtener información sobre posibles desarrollos futuros del uso del suelo y de la influencia de dichas políticas.

3.1. CAMBIOS EN LOS USOS DEL SUELO

El cambio de estado en cada celda (uso) se calcula en pasos discretos siguiendo un conjunto de reglas de transición. Con la combinación de dichas variables se calcula el potencial de transición, el cual indica que la probabilidad de cambio del uso de suelo en una localización está influenciada no solo por el uso actual, sino también por los usos de suelo y las infraestructuras de transporte circundantes (Hagoort, Geertman et al. 2008).

El potencial de transición forma la base, en la que el algoritmo de asignación determina qué uso del suelo se localizará en cada celda después de un periodo de tiempo. Esto se puede interpretar como el nivel de utilidad que una tiene una ubicación para un uso particular de suelo existente y, viceversa. Es decir, la utilidad que un uso de suelo atribuye a su ubicación en dicha ubicación particular.

El potencial de transición combina el efecto de las curvas de vecindad, la accesibilidad, la aptitud y la zonificación, en una ubicación particular. Además, el efecto de las curvas de vecindad incluye un componente estocástico, el cual simula el efecto de comportamientos impredecibles. Este efecto estocástico se puede controlar con el parámetro α.

Para cada momento en el tiempo, los usos de suelo activos son ubicados en los lugares con mayor potencial para su desarrollo. El potencial de cada celda está dado por la siguiente expresión:

$$P_{k,i} = r_{k,i} * A_{k,i} * S_{k,i} * Z_{k,i} * N_{k,i}$$

Donde, $P_{k,i}$ es el potencial para el desarrollo el uso de suelo k en la celda i, $r_{k,i}$ es un término de perturbación aleatoria, $A_{k,i}$ es la accesibilidad para el tipo de uso de suelo, $S_{k,i}$ es la aptitud física para el desarrollo de determinado uso de suelo y $N_{k,i}$ es la influencia de las curvas de vecindad. Para el cálculo del potencial de transición la herramienta sigue la secuencia descrita en la Figura 30.

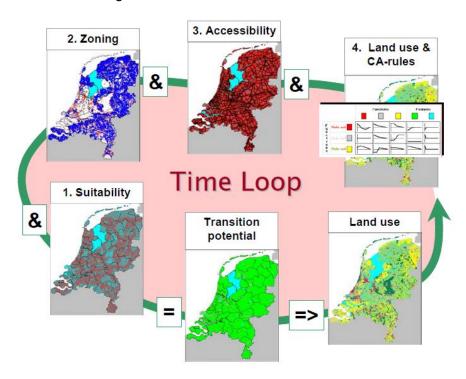


Figura 30. Factores que influencian el cambio de uso de suelo en una celda

Primero suma de manera ponderada los valores de aptitud (1) y zonificación (2), con el fin de encontrar el efecto combinado de las restricciones naturales del suelo y las restricciones normativas. El valor resultante es posteriormente multiplicado por la accesibilidad (3) para encontrar una medida de heterogeneidad en el área de modelación en términos de estos tres factores. Finalmente, se incluyen las reglas de vecindad (4), teniendo en cuenta si

existe atracción o repulsión entre las diferentes categorías de usos de suelo. En el primer caso, los valores anteriores (1, 2, 3 y 4) se multiplican para encontrar el potencial de transición final. En el caso de existir repulsión en las reglas de vecindad, la medida de heterogeneidad es computada para obtener un inverso y después este resultado es multiplicado por el valor de la regla de vecindad. La lógica de este último paso es que al darse un decrecimiento en el nivel de heterogeneidad, el potencial de transición también va a decrecer. Las siguientes ecuaciones representan el proceso descrito hasta aquí:

$${}^{t}V_{f,c} = \left\{ \begin{array}{cc} {}^{t}R_{f,c} \cdot (1+e) & si \ \alpha > 0 \\ {}^{t}R_{f,c} & para \ el \ resto \end{array} \right.$$

$${}^{t}P_{f,c} = \left\{ \begin{array}{cc} {}^{t}V_{f,c} \cdot {}^{t}S_{f,c} \cdot {}^{t}Z_{f,c} \cdot {}^{t}A_{f,c} & si \ {}^{t}V_{f,c} > 0 \\ {}^{t}V_{f,c} \cdot \left(2 - {}^{t}S_{f,c} \cdot {}^{t}Z_{f,c} \cdot {}^{t}A_{f,c} \right) & para \ el \ resto \end{array} \right.$$

Donde ${}^tR_{f,c}$ se refiere a las reglas de transición en del uso de suelo f en la celda c en el momento t. ${}^tS_{f,c}$ es la aptitud, ${}^tZ_{f,c}$ es la zonificación y ${}^tA_{f,c}$ es la accesibilidad. Si se decide incluir una perturbación estocástica en las reglas de vecindad, se deben tener en cuenta dos factores extra (e) que es un valor aleatorio con distribución Weibull $\left(\frac{1}{\alpha},1\right)$ y un valor α que determina la extensión de la perturbación. El rango de este último parámetro es [0,1].

Para los usos de suelo disponibles las ecuaciones se simplifican a la siguiente expresión:

$${}^tP_{f,c} = {}^tS_{f,c} \cdot {}^tI_{v,t_{Lu_c}}$$

Donde ${}^tI_{f,{}^tLu_c}$ es la inercia del uso de suelo tipo disponible v en la celda c.

La inercia se entiende como la probabilidad que tiene una celda (que representa un tipo de uso de suelo especifico) en cambiar sus características para cambiar en un nuevo tipo de uso del suelo, en un tiempo establecido. Esta se puede calcular por medio de la siguiente ecuación:

$$Probabilidad\ cambio = \frac{n\'umero\ de\ celdas\ que\ cambian\ de\ A \to B}{n\'umero\ de\ celdas\ de\ A\ en\ el\ pasado}$$

Donde \bf{A} es el número de celdas de un uso de tipo de suelo \bf{A} y \bf{B} es el nuevo tipo de suelo al que puede cambiar \bf{A} . En la Figura 31 se presenta un ejemplo de cómo se calcula dicho valor. Si en $\it{t}=0$ se tiene un área ocupada por un uso de suelo tipo \bf{A} y en $\it{t}=1$ se tiene una combinación de usos diferentes, donde \bf{B} es el número de celdas al que puede cambiar \bf{A} . Al aplicar la fórmula anterior, se tiene que $\it{P}_{AB}=4/16=0.25$, esto quiere decir que con una probabilidad de 0.25 el uso de suelo \bf{A} (rosado) puede cambiar al uso del suelo \bf{B} (azul).

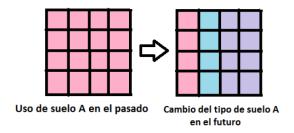


Figura 31. Ejemplo del cálculo de inercias

Ahora, cargar la información en Metronamica es un proceso que implica diferentes actividades asociadas con la estandarización de la información en un formato reconocido por la herramienta. También es necesario identificar en qué módulo de la herramienta se deben cargar los datos de entrada.

3.2. TRANSFORMACIÓN DE LA INFORMACIÓN A ASCII

Primero es necesario transformar los archivos raster obtenidos en la fase anterior, a un formato ASCII (*.rst, *.img o *.asc) el cual sea compatible con Metronamica. La infraestructura es el único input ingresado al modelo que no requiere ser transformado y puede ser cargado directamente desde el formato shape. Para el caso de la infraestructura que se implementará en el futuro (vías, metro, cables, aeropuertos, entre otros), ésta debe ser agregada con sus respectivos años de entrada, teniendo presente los parámetros de accesibilidad.

Para la transformación a formato ASCII se hizo uso del software ArcMap 10.5. En la Figura 32 se puede observar la herramienta utilizada para la transformación de los raster de extensión del área de estudio, usos de suelo (2007 y 2016), zonificación ambiental y aptitud.

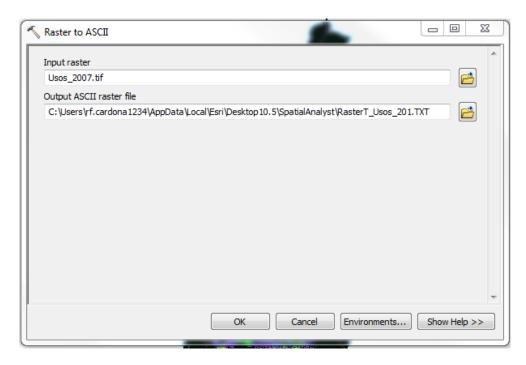


Figura 32. Herramienta para conversión de Raster a ASCII

La transformación de archivos raster a tipo ASCII convierte el aspecto gráfico del raster en una matriz alfanumérica que permitirá identificar los valores de cada celda. Es importante saber que, a la hora de transformar archivos a algún formato tipo ASCII, éstos deben quedar todos con la misma resolución (tamaño de celda), tamaño (igual número de celdas de ancho y alto), posición (las mínimas coordenadas en x y y de la esquina inferior izquierda) y con la misma proyección.

En la Figura 33 se presenta un pantallazo del archivo *.asc que permite identificar el número de columnas y filas (*ncols* y *nrows*, respectivamente), coordenadas mínimas (*xllcorner* y *yllcorner*) y la resolución de trabajo (*cellsize*).

```
ncols 1205
nrows 1693
xllcorner 960696,44856134
yllcorner 962319,64720988
cellsize 60
```

Figura 33. Información base de los archivos ASCII

3.3. DATOS DE ENTRADA

Esta fase consiste en cargar todos los datos de entrada en el formato adecuado y determinar los parámetros requeridos por el modelo para su correcto funcionamiento.

3.3.1. La demanda de suelo

La demanda es el número de hectáreas/celdas que se espera que haya de un uso de suelo f en el año final de simulación. En Metronamica se incluye como un elemento externo al modelo. Para cargar esta variable se accede a la ventana "Main window" y dentro de ella "Drivers" y "External factors".

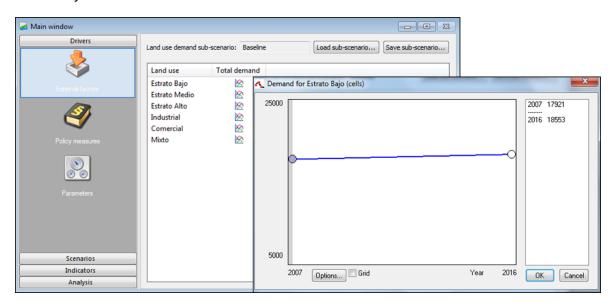


Figura 34. Demandas de suelo en Metronamica

En la Tabla 3 se muestran las demandas calculadas para el año 2016. Estas demandas se obtuvieron del número de celdas de la capa 2016, creada con la información base.

Uso Número de celdas Estrato Bajo 18,553 Estrato Medio 32,896 Estrato Alto 7,460 Industrial 14,418 Comercial 3,106 Mixto 5,841 Servicios 7,550

Tabla 3. Demanda de suelo 2016

3.3.2. Zonificación

Como se describió anteriormente, la zonificación representa una política que permite o restringe el desarrollo de los usos del suelo activos en áreas particulares, como reservas forestales, zonas protegidas o de alto riesgo. La zonificación se representa con 4 clases

que provienen de una capa raster creada en ArcGIS 10.5 con valores de 0 a 3, cuya codificación es la siguiente:

- (0) Permitido,
- (1) Permitido desde tiempo 1
- (2) Permitido desde tiempo 2
- (3) Prohibido.

Para esta etapa del proyecto no se utilizaron tiempos intermedios debido a que éstos representan planes urbanos de expansión en años intermedios, los cuales no estaban disponibles para el periodo inicial de calibración.

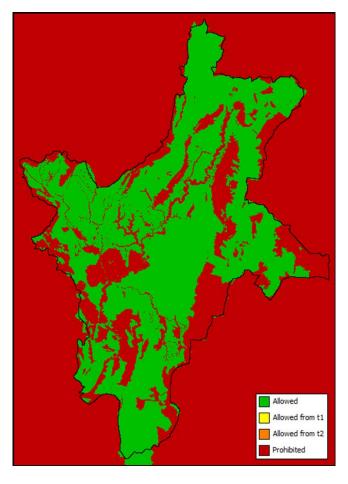


Figura 35. Zonificación base en Metronamica

A continuación, se presenta la ventana para agregar la zonificación a los usos activos:

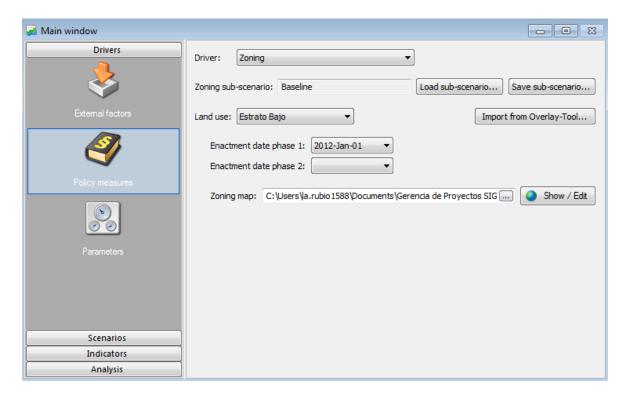


Figura 36. Ventana zonificación usos activos

Desde la ventana principal, se selecciona "Policy Measures", driver "Zoning", uso del suelo y ruta de la capa.

3.3.3. Aptitud Ambiental

La aptitud está representada en el modelo por un mapa para cada tipo de suelo activo. Los valores en el mapa de aptitud cuantifican el efecto que las características físicas del suelo tienen en la posible aparición de futuros usos.

La aptitud en la herramienta se puede clasificar hasta en 11 clases. Se decidió utilizar 4 clases para unificar las clases en que están los mapas de riesgo. La aptitud fue creada en ArcGIS 10.5 y se muestra en el mapa en colores que varían de rojo a verde, representando 4 aptitudes dentro de las 11 posibles así: No Apto (1), Aptitud Baja (4), Aptitud Media (7) y Aptitud total (10).

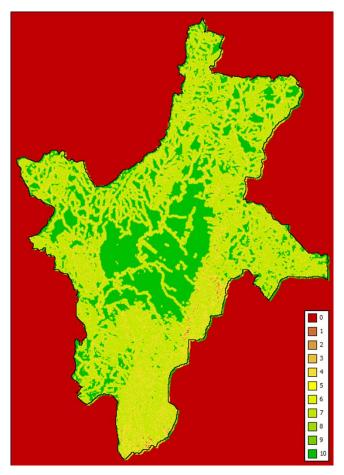


Figura 37. Aptitud ambiental en Metronamica

Para agregar la capa se aptitud se va a la ventana principal, "Parameters", "Land Use", "Suitability" y seleccionar la ruta del archivo.

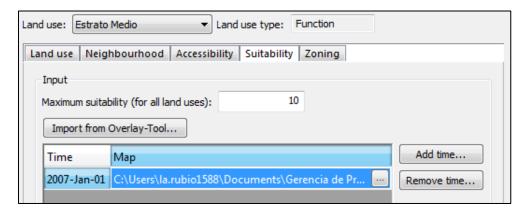


Figura 38. Aptitud en Metronamica

3.3.4. Infraestructura

Dentro de la información con la que se cuenta para modelación de la infraestructura está:

- La malla vial principal compuesta por:
 - o Vías regionales para el 2007 por un total de 1,392 Km
 - o Vías regionales para el 2016 por un total de 1,400 Km
- La red de Transmilenio (estaciones por troncales y portales) de acuerdo con sus años de implementación como se presenta en la Tabla 4 y Tabla 5:

Tabla 4. Troncales de Transmilenio

Troncal de Transmilenio	Año de implementación	Fase
Caracas	2001	I
Caracas Sur	2001	I
Autopista Norte	2001	I
Tunal	2001	I
Eje Ambiental	2002	II
Extensión Autopista Norte	2002	II
Américas	2003	II
NQS	2005	II
Suba	2006	II
Calle 80	2006	II
Calle 26	2012	III
Carrera 10	2013	III
20 de Julio	2014	III
Soacha	2014	III

Tabla 5. Portales de Transmilenio

Portal Transmilenio	Año implementación	Fase
Portal Usme	2001	I
Portal Tunal	2001	I
Portal Norte	2001	I
Portal Américas	2003	II
Portal Sur	2005	II
Portal 80	2006	II
Portal Suba	2006	III
Portal El Dorado	2012	III
Portal 20 de Julio	2013	111

- La red de transporte público colectivo en el que se incluyen las rutas del SITP, con un total de 18,904 Km.
- La red de ciclorrutas compuesta por:
 - Red de ciclorrutas al 2007 con una extensión de 195 km
 - Red de ciclorrutas al 2016 con una extensión de 286 km

La infraestructura permite ser cargada directamente desde archivos tipo shape (.shp). En la Figura 39 se presenta la vista de la infraestructura cargada en la herramienta.

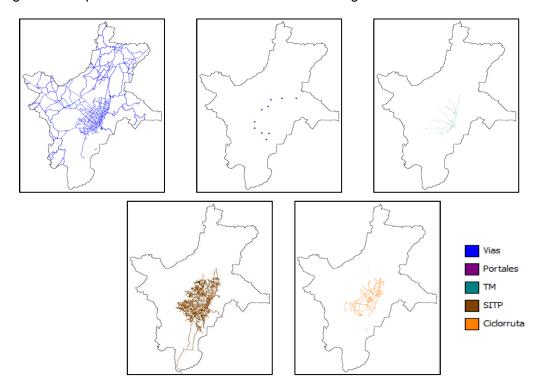


Figura 39. Infraestructura de transporte en Metronamica

3.3.5. Definición parámetros de accesibilidad

Para conocer la influencia de la infraestructura sobre el desarrollo de los diferentes usos de suelo, se deben estimar los parámetros de accesibilidad de Metronamica que están compuestos por cuatro categorías:

- Accesibilidad zonal: medida basada en el costo generalizado del transporte construido a partir de un modelo de transporte. No se utiliza al no disponer de un modelo de transporte.
- 2. Accesibilidad local: refleja la medida en que puede satisfacerse la necesidad de contar o no con la red de transporte. La red consta de varias capas que se componen de nodos, como las estaciones y portales y enlaces, como carreteras y rutas de SITP. La accesibilidad local se determina primero para cada nodo o tipo de enlace por separado y, a partir de esto, se combina en un valor para cada uso del suelo y cada celda.

Para cada uso de suelo, la accesibilidad local para cierto tipo de infraestructura disminuye con la distancia de manera hiperbólica como se presenta en la Figura 40 siguiendo la función:

$$AL_{s,f,c}^t = \frac{a_{s,f}}{D_{s,c}^t + a_{s,f}}$$

En donde $AL^t_{s,f,c}$ es la accesibilidad local para una celda c a cierto nodo o link de la infraestructura de transporte s, de un tipo de suelo f determinado en un tiempo t. $a_{s,f}$ es la distancia de decaimiento de la accesibilidad de un uso de suelo f y un nodo o link de infraestructura de transporte s; y $D^t_{s,c}$ es la distancia de una celda c a un nodo o link de infraestructura s, en un tiempo t.

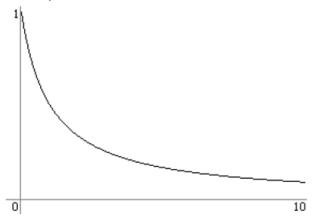


Figura 40. Función de accesibilidad local

Los parámetros a estimar para cada tipo de infraestructura y uso de suelo, son la distancia de decaimiento (que define la función presentada anteriormente) y el peso relativo, que representa la importancia que tiene cada infraestructura con respecto a las demás infraestructuras para cada uso de suelo. Una vez definidos estos parámetros para cada uso de suelo y tipo de infraestructura, se calcula la accesibilidad en base a la ecuación:

$$AL_{f,c}^{t} = \frac{\prod (1 - w_{s,f} * AL_{s,f,c}^{t})}{\prod (1 - w_{s,f})}$$

En donde, $AL_{f,c}^t$ es la accesibilidad local calculada para una celda c con respecto a un uso de suelo f en un tiempo t, $AL_{s,f,c}^t$ es la accesibilidad local para una celda c a cierto nodo o link de la infraestructura de transporte s, desde un uso de suelo f en un tiempo t. Y $w_{s,f}$ es el peso de cualquier nodo o link de infraestructura de transporte s con respecto al uso de suelo f.

 Accesibilidad implícita: refleja el hecho que cuando un área está siendo ocupada por un suelo urbano, a éste se le asegurará su accesibilidad. Este es el caso para los usos de suelo urbanos que no hacen parte de la red de transporte. Esto es importante para el modelo, ya que el CA modela los cambios en los usos del suelo, pero no genera ningún cambio sobre la infraestructura del transporte. La accesibilidad implícita toma uno de dos posibles valores dependiendo del uso de suelo. Uno para las zonas urbanizadas y otros para las zonas que no. Las zonas urbanizadas deberán ser por lo tanto marcadas en la opción "built-up area".

4. **Accesibilidad explícita:** Esta accesibilidad tiene en cuenta aquellos usos de suelo que no permiten ningún tipo de desarrollo, tales como lagos o parques.

En la Figura 41 se presenta la ventana a través de la cual se puede agregar y gestionar la infraestructura y la accesibilidad para el modelo. Para agregar las capas de accesibilidad e infraestructura se usa la ventana principal, "Parameters", "Land Use", "Accessibility". En "Go to infrastructure layers" se podrán gestionar las capas de infraestructura de transporte y en las demás opciones de la pantalla se establecen los parámetros de accesibilidad.

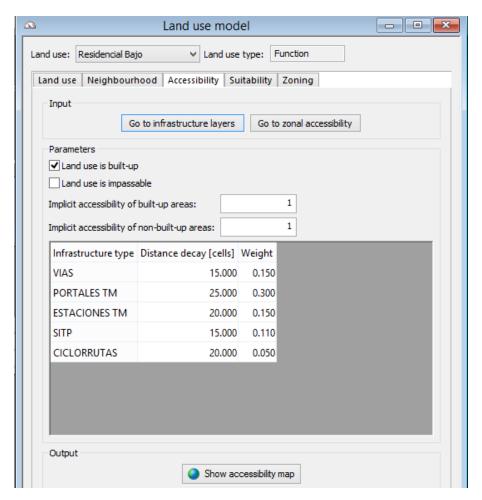


Figura 41. Ventana de accesibilidad en Metronamica

Para determinar los parámetros de accesibilidad, se estudiaron diferentes referencias de trabajos, encontrando que estos varían mucho y depende del contexto de cada aplicación. En la Tabla 6, se presentan los parámetros de accesibilidad local utilizados para cada uso de suelo y tipo de infraestructura en Bogotá, los cuales se basaron en los establecidos en Furtado (2009). Estos parámetros se ajustan en el proceso de calibración.

Tabla 6. Parámetros iniciales de accesibilidad local

	Resid Ba		Medio		Residen	cial Alto
	Decay Dist.	Peso	Decay Dist.	Peso		Peso
Vías principales	15.00	0.15	25.00	0.29	10.00	0.90
Portales	25.00	0.30	10.00	0.30	10.00	0.10
Estaciones TM	20.00	0.15	10.00	0.40	10.00	0.15
SITP	5.00	0.11	10.00	0.30	7.50	0.11
Ciclorrutas	20.00	0.05	10.00	0.04	5.00	0.03

	Indu	strial	Comercio		Mix	xto	Servicios	
	Decay Dist.	Peso	Decay Dist.	Peso	Decay Dist.	Peso	Decay Dist.	Peso
Vías principales	10.00	0.95	10.00	0.80	16.67	0.45	10.00	0.80
Portales	4.00	0.08	10.00	0.75	15.00	0.23	10.00	0.75
Estaciones TM	4.00	0.06	10.00	0.60	13.33	0.23	10.00	0.60
STIP	2.00	0.04	7.50	0.30	7.50	0.18	7.50	0.30
Ciclorrutas	1.00	0.00	10.00	0.05	11.67	0.04	10.00	0.05

Para la accesibilidad implícita se utilizaron como zonas urbanizadas (usos residenciales, industrial, comercial, mixto, servicios y dotacional). Y como suelos impasables para la accesibilidad explícita se incluyeron los usos de cuerpos de agua y de rellenos.

En la Figura 42 se representan gráficamente los valores de accesibilidad atribuidos a los tres usos de suelo residenciales (residencial bajo a la izquierda, medio en el centro y alto a la derecha). Se observa la alta influencia de la infraestructura sobre el valor de la accesibilidad para cada uso. Por ejemplo, para el uso residencial bajo, se destaca el valor de accesibilidad más alto (verde) alrededor de los portales y estaciones de Transmilenio, mientras que para el uso residencial alto, los valores más altos se ven reflejados en los lugares donde hay presencia de vías.

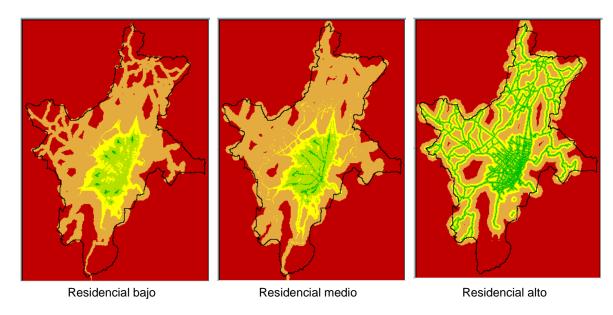


Figura 42. Accesibilidad para los usos de suelo residenciales

3.3.6. Parámetros de accesibilidad utilizados en la simulación

Para la etapa de evaluación de escenarios, fue necesario hacer supuestos de los parámetros de accesibilidad que tendrían los nuevos elementos del sistema de transporte público, como el metro o los cables. En la Tabla 7 se muestran los parámetros de accesibilidad con los que se simularon los escenarios. Para el caso del metro y los centros de intercambio modal se utilizaron los mismos parámetros de importancia y distancia de decaimiento utilizados para los portales de Transmilenio.

Tabla 7. Parámetros de accesibilidad de los escenarios futuros.

	Residencial Bajo		Residencial Medio		Resider Alto		Industrial		
	Dist. Decay	Peso	o Dist. Decay Peso Dist. Decay F		Peso	Dist. Decay	Peso		
Metro	25,00	0,40	10,00	0,50	10,00	0,30	8,00	0,08	
Centro de Intercambio Modal	28,00	0,40	10,00	0,50	10,00	0,30	8,00	0,08	
Aeropuerto El Dorado II	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00	25,00	0,30	

	Come	ercio	Mix	to	Servicios		
	Dist. Decay	Peso	Dist. Decay	Peso	Dist. Decay	Peso	
Metro	10,00	0,75	15,00	0,53	10,00	0,75	
Centro de Intercambio Modal	10,00	0,75	15,00	0,53	10,00	0,75	
Aeropuerto El Dorado II	25,00	0,80	1,00	0,00	25,00	0,80	

Finalmente, es importante aclarar que los cables aéreos tenidos en cuenta dentro de la simulación se incluyen dentro de la infraestructura de estaciones de Transmilenio.

3.3.7. Curvas de vecindad

Las dinámicas de vecindad, es decir, las relaciones entre todos los usos del suelo consisten en reglas de atracción o repulsión de un uso con respecto a otros tipos de usos. El modelo acepta las relaciones de todos los usos del suelo vs los usos activos, pero es el modelador, quien a través de su experiencia decide cuales relaciones serán las más importantes.

Para la representación gráfica de las reglas de vecindad se realizó una comparación de atracción vs la distancia en celdas, teniendo en cuenta las observaciones de la subestimación o sobreestimación de usos del suelo (desarrollos) alrededor de otros tipos de uso (Verburg, de Nijs et al. 2004). A manera de ejemplo, en la Figura 43 se muestra la relación del uso de suelo residencial estrato alto con los demás usos. El eje Y representa la atracción o repulsión y el eje X la distancia (medida en celdas). En el Anexo II – Curvas de vecindad para Bogotá y la Región, están las curvas de vecindad estimadas para todas las combinaciones de usos de suelo.

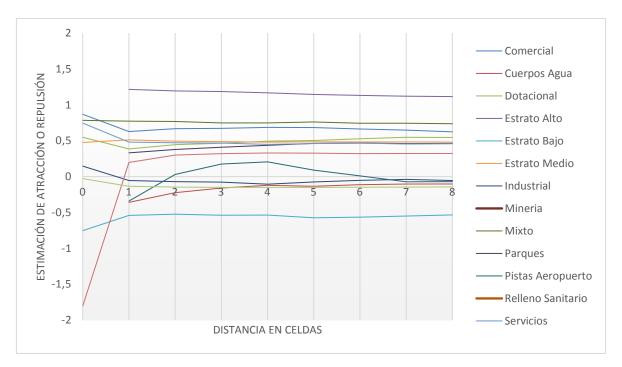


Figura 43. Curvas de vecindad para el uso residencial alto

En la Figura 44 se muestra la interfaz donde se consignaron los valores finales para las inercias y relaciones de vecindad. La inercia es la fuerza que tiene una celda para quedarse en su uso actual o transformarse en otro. Cabe aclarar que no todas las relaciones de vecindad calculadas en primera instancia se emplearon en el modelo. Solo se dejaron las que hacían que el modelo mejorara en los indicadores Kappa (ver Sección 4).

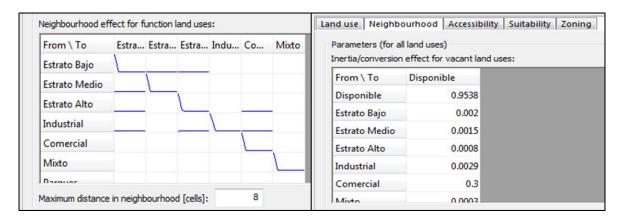


Figura 44. Relaciones de vecindad en Metronamica

4. CALIBRACIÓN DEL MODELO

El proceso empieza por definir los usos del suelo en el periodo inicial y final. Posteriormente, es necesario estimar los valores (mapas) para la aptitud ambiental, la zonificación territorial y los elementos de la infraestructura vial (accesibilidad), de manera que el resultado de la simulación para el año 2016, partiendo del 2007, sea lo suficientemente parecida con los usos de suelo observados (reales) para ese mismo año. La Figura 45 resume el proceso de calibración realizado.

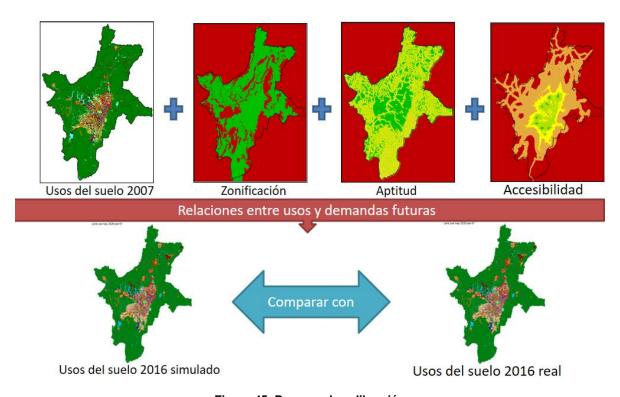


Figura 45. Proceso de calibración

Para estimar el nivel de similitud entre los dos mapas (2016 simulado y observado), se utilizó el software Map Comparison Kit 3 (RIKS 2012), el cual mide el nivel de semejanza entre los usos de cada mapa. Para poder realizar la comparación del mapa simulado y el observado, se realizaron dos actividades previas que consisten en la corrección de los mapas observados a través de la interpretación visual y las tablas de contingencia, con las que se logró corregir errores procedimentales en la construcción de las capas de usos de suelo.

4.1. INTERPRETACIÓN VISUAL

La interpretación visual es el primer paso utilizado en el proceso de calibración. Los cambios que se han producido durante los años se pueden observar a simple vista, lo que da una idea clara de cómo han cambiado los diferentes usos del suelo a lo largo de los años.

Los errores encontrados durante esta etapa se deben a las imágenes satelitales utilizadas para la construcción de las capas. La nubosidad y la temporada de lluvias afectaron algunas áreas de la zona de estudio: algunos usos del suelo en el año 2007 desaparecían para el año 2016 por estar cubiertos bajo una nube, o, algunos cuerpos de agua que en el año 2007 no existían y aparecían en el 2016, debido a la temporada invernal.

Para este paso es necesario contar con personal que conozca el territorio o se apoyen en personas expertas. En la Figura 46 se pueden observar algunos de los ejemplos de correcciones hechas sobre las capas de usos de suelo debido a los errores anteriormente descritos.

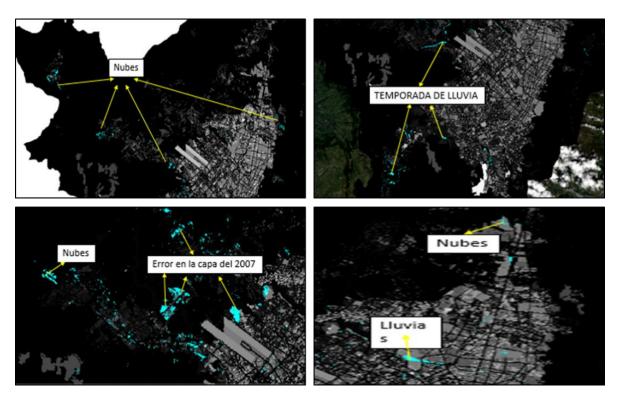


Figura 46. Errores detectados visualmente

4.2. TABLAS DE CONTINGENCIA

Con las tablas de contingencia se calcula el número total de celdas que han cambiado de una determinada categoría (uso actual) a otra. Realizando este procedimiento en ArcGIS 10.5 con la herramienta "Combine", es posible generar la tabla y además un mapa donde cada entidad representa un cambio entre ambos escenarios.

Las tablas de contingencia son de gran ayuda y complemento para la interpretación visual, ya que identifican errores que se escapan a la percepción de los expertos. Con este método se lograron corregir errores en la red vial, parques y cuerpos de agua. En la Tabla 8 se muestra la última tabla de contingencia construida. Cabe aclarar que siguen existiendo transformaciones poco probables según las condiciones establecidas para Bogotá, pero son muy pocas celdas comparadas a la totalidad de la zona de estudio.

Usos de suelo 2007 \ 2016 2,690 1,071 615,495 3,852 1,1104 6,673 1,121 1,526 13,034 2,245 16.698 3,978 1,871 4,958 1,603 3,227 9,486 19,321 2,834 342 4,155 1,550 30,709

Tabla 8. Tabla de contingencia final

Usos de suelo

- 1. Disponible
- 2. Residencial Bajo
- 3. Residencial Medio
- 4. Residencial Alto
- 5. Comercial
- 6. Industrial
- 7. Mixto
- 8. Parques
- 9. Cuerpos de Agua
- 10. Servicios

- 11. Dotacional
- 12. Pistas Aeropuerto

1,213

6,657

- 13. Vías
- 14. Relleno Sanitario
- 15. Minería

4.3. KAPPA Y FUZZY KAPPA

Haciendo uso del software Map Comparison Kit 3, se logró hacer una comparación de una serie de mapas simulados con el mapa de usos de suelo observado para el 2016. Este software hace uso de diferentes algoritmos de comparación para calcular el grado de similitud entre todos los mapas (ver Figura 47). Para este caso la evaluación se hizo con los estadísticos Kappa y Fuzzy Kappa (Hagen- Zanker 2009).

El método de comparación Kappa se basa en una comparación directa de mapas celda por celda, considerando si cada par de celdas en cada mapa, son iguales o no. Esto da como resultado un mapa de comparación que muestra la distribución espacial de la coincidencia.

Este método de comparación no requiere ningún parámetro adicional y se calcula como el número de celdas iguales (coincidentes), dividido por el número total de celdas. El Kappa no se considera muy fiable como medida general de validación para mapas con pocas categorías, ya que su resultado puede ser sesgado y tiende a considerar distribuciones de manera desigual. Sin embargo, para este modelo, con 14 categorías de usos de suelo, el estadístico se considera aceptable, para representar la validez de la calibración.

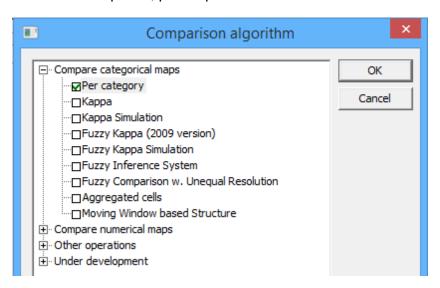


Figura 47 Algoritmos de comparación de mapas

Por otro lado, con el algoritmo Fuzzy Kappa se tiene en cuenta que hay grados de similitud entre pares de celdas en dos mapas. Se basa en una comparación de mapas celda por celda, con una diferencia significativa respecto al Kappa: la comparación para este caso, es una comparación de conjunto difusa, que toma en cuenta el vecindario de una celda para expresar la similitud de esa celda en un valor entre 0 (completamente distinto) y 1 (completamente idéntico).

En la Figura 48 se muestran los parámetros para la configuración de la estimación del Fuzzy Kappa, donde se establecen el número de celdas a las que se quiere evaluar el grado de similitud con respecto a cada celda y la función de decaimiento, que expresa cómo las celdas que se encuentran alrededor de la celda en estudio, pierden importancia.

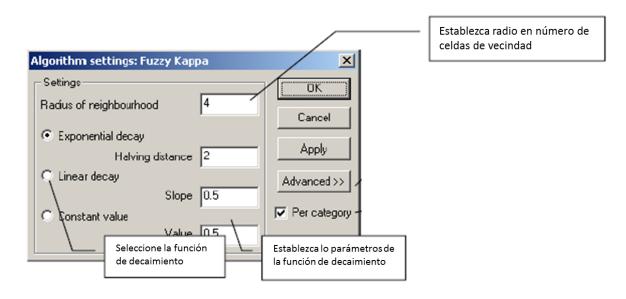


Figura 48. Configuración del algoritmo de comparación Fuzzy Kappa

Los valores que se obtienen de Kappa y Fuzzy Kappa pueden variar dependiendo de la calidad de la información construida para los usos de suelo observados en 2007 y 2016. Así que, basados en de Silva, Wimaladasa et al. (2015) se establecieron rangos a partir de los cuales se podría aceptar la validez del modelo (ver Tabla 9).

Validez del modelo	Rango de Kappa y Fuzzy Kappa
Pobre	Menor a 0.20
Justa	0.20 a 0.40
Moderada	0.40 a 0.60
Buena	0.60 a 0.80
Muy Buena	0.80 a 1.00

Tabla 9. Rangos de Validez del modelo.

En la Tabla 10, se presenta el avance de los indicadores de calibración Kappa y Fuzzy Kappa a medida que se iba agregando la información en Metronamica y se iban generando una serie de mapas:

Tabla 10. Iteraciones en la calibración del modelo

ID	DESCRIPCIÓN	КАРРА	FUZZY KAPPA
0	El punto de partida corresponde a la capa arrojada por el Modelo en Metronamica incluyendo únicamente las demandas después de la calibración por interpretación Visual y Tablas de Contingencia	0.760	0.830
1	Abarca las iteraciones realizadas para la incorporación de la zonificación, aptitud y accesibilidad.	0.798	0.852
2	Resultados obtenidos tras la incorporación inercias y la primera modificación de las curvas de vecindad.	0.781	0.839
3	Abarca las iteraciones realizadas en la segunda modificación de las curvas de vecindad.	0.781	0.838
4	Abarca las iteraciones realizadas en la tercera modificación de las curvas de vecindad.		0.849
5	Abarca las iteraciones realizadas en la cuarta modificación de las curvas de vecindad.	0.794	0.850
6	Abarca las iteraciones realizadas en la quinta modificación de las curvas de vecindad.	0.795	0.850
7	Abarca las iteraciones realizadas en la sexta modificación de las curvas de vecindad.	0.795	0.850
8	Abarca las iteraciones realizadas en la séptima modificación de las curvas de vecindad.	0.795	0.850
9	Abarca las iteraciones realizadas en la octava modificación de las curvas de vecindad.	0.794	0.850
10	Abarca las iteraciones realizadas en la novena y última modificación de las curvas de vecindad.	0.796	0.853

Aunque el valor del Kappa no se logró subir por encima de 0.80, el valor de 0.796 es considerado válido y de buen ajuste. De acuerdo a los criterios definidos en la literatura, se determinó que estos parámetros validan el modelo y la calibración de forma correcta. Como se ve en los resultados, los parámetros de calibración finalmente obtenidos dan una validez muy buena.

5. DEFINICIÓN DE ESCENARIOS

Con la creación de los escenarios se busca encontrar los efectos sobre el uso del suelo que puedan causar las diferentes alternativas de crecimiento y desarrollo de Bogotá y sus municipios aledaños. Para esto, se realizó una detallada labor de construcción de diferentes situaciones que dependen de la infraestructura, la demanda y la regulación. Estas situaciones incluyen 8 diferentes escenarios con diferentes combinaciones de política.

La infraestructura de transporte varía en cada escenario. La regulación puede cambiar en cada sector para permitir o prohibir un uso de suelo y la demanda para estos casos, se mantiene igual para el 2050.

5.1. CÁLCULO DE LAS DEMANDAS

Para poder simular el modelo calibrado en Metronamica, hace falta tener las demandas de usos de suelo para el año 2050. En este contexto, la Dirección de Economía Urbana de la Secretaria Distrital de Planeación (SDP-DEU) desarrolló un modelo a través del cual se logró estimar la demanda de usos de suelo para los usos activos de Metronamica.

Para esta labor el Observatorio de la Dinámica Urbano Regional (ODUR) plantea que, para encontrar la ocupación futura de suelo con vocación residencial, se debe tener en cuenta la población y sus densidades, que a su vez podrán ser diferenciadas en las zonas urbanas y suburbanas. Asimismo, éstas podrán también ser agrupadas por municipios de acuerdo con parámetros de similitud hallados entre ellos. Para esto se plantearon diferentes escenarios de proyección de población en la zona de estudio.

Para los usos de suelo con vocación económica, el ODUR estableció como requerimiento principal los cambios en el PIB para cada uno de los municipios. De igual forma estableció la necesidad de considerar el tamaño de las empresas, ya que las grandes industrias necesitan mayores demandas de suelo. Una vez analizada y procesada esta información, el modelo planteado por el ODUR estimó las demandas de usos de suelo activos para el año 2050 de manera independiente, obteniendo los resultados que se muestran en la Tabla 11. Como dato adicional, se entregó la estimación al año 2030.

Cabe aclarar que en la tabla anterior los datos corresponden a ocupación, lo cual incluye la ocupación actual y la demanda. Esta última puede ser calculada restando los datos para 2016 y 2050. Como el modelo necesita los datos acumulados no se presenta el resultado de esta operación.

Tabla 11. Demandas de suelo 2050

Uso de Suelo	Ocupación 2016 Ha	Ocupación 2016 Celdas	Ocupación 2030 Ha	Ocupación 2030 Celdas	Ocupación 2050 Ha	Ocupación 2050 Celdas
Estrato Bajo	6.679	18.553	15.428	42.856	20.767	57.686
Estrato Medio	11.843	32.896	17.986	49.961	23.525	65.347
Estrato Alto	2.686	7.460	7.947	22.075	9.336	25.933
Industrial	5.190	14.418	8.022	22.283	10.401	28.892
Comercial	1.118	3.106	1.728	4.800	2.241	6.225
Mixto	2.103	5.841	3.250	9.028	4.214	11.706
Servicios	2.718	7.550	4.201	11.669	5.447	15.131
Total	32.337	89.824	58.562	162.672	75.931	210.919

5.2. ZONIFICACIÓN E INFRAESTRUCTURA

Para cargar los diferentes escenarios de simulación, se debe tener en cuenta la configuración de la infraestructura de transporte. A continuación se describen los parámetros que se cargan en cada uno de los ocho escenarios con los que se realizaron las simulaciones.

La fuente para la creación de estos escenarios fue la SDP-DEU. Estas medidas fueron usadas en este proyecto únicamente con el objetivo de analizar las características del modelo desarrollado.

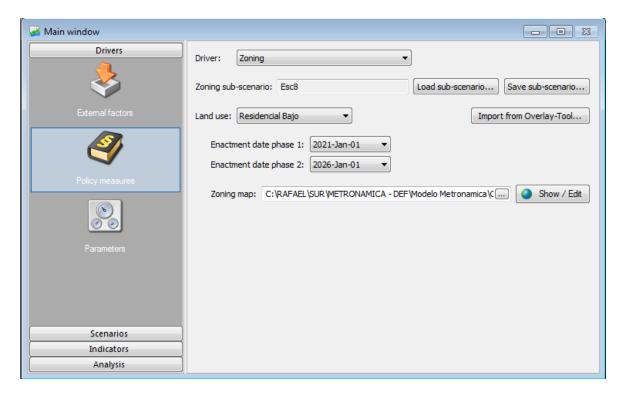
En la Tabla 12 se muestran las variables tenidas en cuenta para cada uno de los escenarios. De estos parámetros, algunos corresponden a la zonificación, mientras que otros incluyen la infraestructura de transporte y la accesibilidad. También existe un parámetro que se modifica por medio de la aptitud del modelo, el cual corresponde a la cuarta fila en la tabla, la cual se refiere a la restricción en categorías agrícolas 2 y 3. Este parámetro afecta la aptitud de manera restrictiva, haciendo más difícil el desarrollo de los usos de suelo en las zonas en las que se presente alguna de estas dos categorías.

Tabla 12. Escenarios a 2050

Escenario	1	2	3	4	5	6	7	8
El Distrito y los municipios mantienen su	,	,						
perímetro de expansión vigente	•	V						
El Distrito habilita Ciudad norte, Ciudad Río,								
Lagos de Torca y Ciudad Tunjuelo. Los								
municipios habilitan sus propuestas de suelo			✓	✓	✓	✓	✓	✓
urbano, expansión y suburbano según las								
últimas expectativas								
El municipio de Mosquera habilita suelo red vial							,	,
y continuidad del metro en Ciudad Mosquera							•	V

Escenario	1	2	3	4	5	6	7	8
Se aplican restricciones de la ocupar suelo en	,	,	1					
Categoría Agrológica 2 y 3	•	•	•					
El Distrito reglamenta la ocupación ordenada del								
borde de transición sur. Se incluyen líneas de				✓				
cable borde sur								
La oferta de suelo urbanizable se instrumenta					./	./	./	./
bajo estrategias DOT a estaciones medio férreo					V	•	•	•
Plan vial regional y centros de intercambio modal		✓	✓	✓	✓	✓	✓	√
Sistema transporte masivo modo férreo regional.					1	,	,	,
Línea Facatativá a y a Gachacipá					V	~	V	•
Tres pistas de Aeropuerto El Dorado II (AEDII)						✓	✓	✓
La Región promueve la ocupación orden nada								
alrededor de AEDII. Se incorpora una red de								✓
acceso complementaria al AEDII								

El proceso de cargue de los escenarios en Metronamica se hace a través de la ventana principal del software en el menú "Drivers" y el submenú "Policy Measures", como se observa en la Figura 49. Allí se gestionan los sub-escenarios que corresponden a las diferentes zonificaciones e infraestructuras de transporte previamente definidas. Por otro lado, se tiene el menú de "Scenarios" (Figura 50) que corresponde a la opción por medio de la cual se construyen los escenarios que se simulan en el modelo mediante la combinación de los diferentes sub-escenarios.



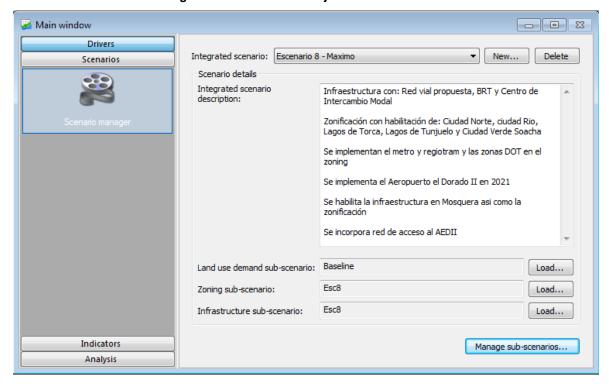


Figura 49. Interfaz de manejo de sub-escenarios

Figura 50. Interfaz de manejo de escenarios

Teniendo en cuenta que el proceso de introducción de información proyectada tiene múltiples detalles, a continuación, se profundiza en los cambios que se realizaron en cada escenario. Primero se dará una descripción general de todas las modificaciones para zonificación e infraestructura. Después se hará una descripción puntual por cada escenario.

En los escenarios 1 y 2, Bogotá y los municipios mantienen su perímetro de expansión actual. Adicionalmente se aplican restricciones para ocupar el suelo de uso capacidad agrícola. La principal diferencia entre estos dos escenarios consiste en la introducción de nuevas infraestructuras de transporte masivo y la construcción de vías regionales.

En el escenario 3, se habilitan en Bogotá las áreas de vivienda en el norte de la ciudad, mientras que los municipios habilitan sus propuestas de suelo urbano, de expansión y suburbano. Por su parte en el escenario 4, la ciudad reglamenta la ocupación ordenada del borde de transición sur y se elimina la restricción para ocupar el suelo denominado Capacidad Agrícola.

Para los escenarios 5 y 6 se incluye en la simulación el modo de transporte férreo. Por lo tanto, la oferta de suelo urbanizable se instrumenta bajo estrategias de Desarrollo Orientado al Transporte (DOT) con un buffer alrededor de las estaciones de ese nuevo modo de transporte. Finalmente es los escenarios 7 y 8, se habilita la segunda etapa del aeropuerto el Dorado, permitiendo al mismo tiempo la entrada de suelos residenciales en las periferias

de los municipios del occidente y generando estrategias de ocupación comercial en el área de influencia del nuevo terminal aéreo.

En la Tabla 13 se muestra un resumen de los diferentes años en los que se introducen los diferentes tipos de infraestructura, siendo los desarrollos relacionados con el transporte aéreo los que más tardan en incluirse en la modelo, iniciando en el año 2028 con la primera pista del aeropuerto el Dorado II.

Tabla 13. Años de ingreso de la infraestructura

				Esc	enario			
	1	2	3	4	5	6	7	8
Centros de intercambio modal		2024	2024	2024	2024	2024	2024	2024
Transmilenio fase 4		2023	2023	2023	2023	2023	2023	2023
Transmilenio fase 5		2027	2027	2027	2027	2027	2027	2027
Red vial propuesta regional		2023	2023	2023	2023	2023	2023	2023
Red vial propuesta ciudad norte			2023	2023	2023	2023	2023	2023
Red vial aeropuerto el Dorado II								2023
Transmicable fase1				2023	2023	2023	2023	2023
Transmicable fase2				2027	2027	2027	2027	2027
Metro primera línea					2023	2023	2023	2023
Metro a Mosquera							2023	2023
Red vial Mosquera							2023	2023
Regiotram Occidente (Facatativá)					2021	2021	2021	2021
Regiotram Norte (Gachancipá)					2023	2023	2023	2023
Aeropuerto el Dorado II (Primera pista)						2028	2028	2028
Aeropuerto el Dorado II (Segunda pista)						2033	2033	2033
Aeropuerto el Dorado II (Tercera pista)						2038	2038	2038

5.3. ESCENARIO 1 - TENDENCIAL

Este escenario plantea el "Business as Usual" en donde se hace la simulación únicamente cargando las demandas de usos de suelo, manteniendo el perímetro de expansión vigente y la zonificación con todas las restricciones que rigen el POT vigente. De igual forma la infraestructura tampoco cambia.

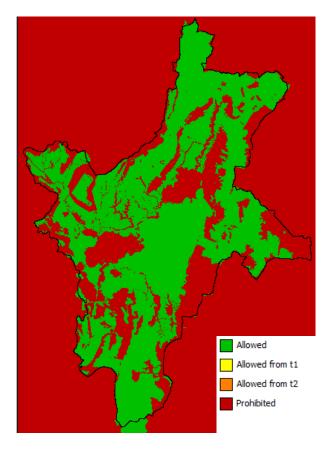


Figura 51. Zonificación - Escenario 1

En la Figura 51 se muestra la zonificación cargada para este escenario en donde las zonas verdes son las zonas que permiten desarrollos, mientras las zonas rojas son las áreas donde éstos se encuentran restringidos. Por otra parte, la infraestructura de transporte para este escenario no tiene ningún cambio, por lo que se presenta igual a como se había cargado en el 2016, ver Figura 52.

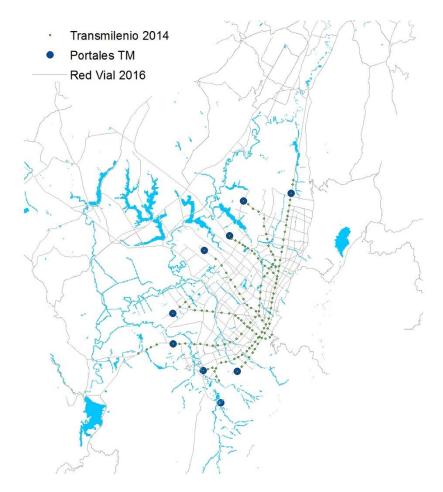


Figura 52. Infraestructura de Transporte - Escenario 1

Este escenario incluye una modificación en la aptitud ambiental en la que de acuerdo con la categoría agrológica del suelo, se castiga el parámetro de aptitud de los usos de suelo activo cuando la categoría agrológica es de segundo o tercer grado. Estas categorías corresponden a zonas necesarias para la conservación de los recursos hídricos, control de procesos erosivos o zonas de protección forestal.

En la Figura 53 se observa la nueva capa de aptitud (con datos de capacidad agrológica) en la que los valores más bajos presentan aptitud baja, mientras los valores altos y con colores en tonalidades verdes poseen la mayor aptitud. Para el proceso de construcción del raster de aptitud con capacidad agrológica, se utilizó la capacidad base y se impuso un valor restrictivo a las celdas que tenían categoría agrológica de tipo 1 y 2, disminuyendo su aptitud en un nivel, es decir, si la aptitud base tiene un valor de 7, y converge con una celda cuya categorización agrológica es 1, su valor en la aptitud será de 6, haciéndola menos apta en el desarrollo de los usos activos para el modelo.

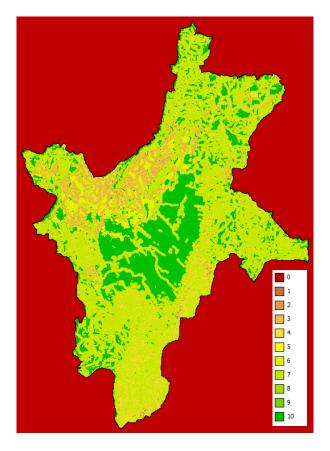


Figura 53. Aptitud con categorías agrológicas 2 y 3

5.4. ESCENARIO 2

El segundo escenario como se plantea en la Tabla 12, incluye la misma zonificación del escenario 1. Sin embargo, la infraestructura de transporte incluye el subsistema vial regional propuesto para el año 2023, las líneas de Transmilenio propuestas para los años 2023 y 2027 y los centros de intercambio modal del año 2024. Toda esta información fue proporcionada por la Dirección de Vías, Transporte y Servicios públicos y la Dirección de Economía Urbana de la SDP. Ver Figura 54.

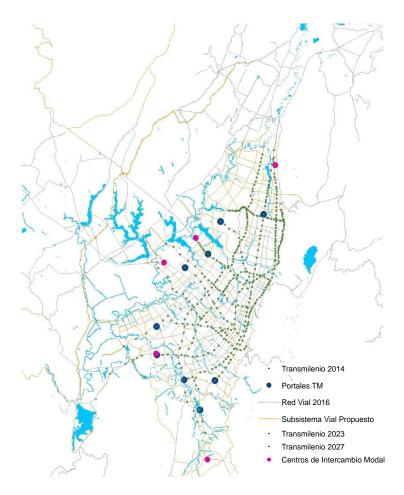


Figura 54. Infraestructura de Transporte - Escenario 2

Adicionalmente, este escenario incluye la aptitud que se muestra en la Figura 53, en la que se desincentiva el desarrollo de usos de suelo en las categorías agrológicas.

5.5. ESCENARIO 3

Para este escenario, la infraestructura de transporte se amplía en el año 2023 en la zona norte de Bogotá, mientras que la zonificación se ve afectada por la habilitación de las zonas de desarrollo de Ciudad Norte, Ciudad Río, Lagos de Torca, Lagos de Tunjuelo y Ciudad Verde en Soacha. La Figura 55 muestra en verde las zonas habilitadas para el desarrollo. En la Figura 56 se hace énfasis en la zonificación e infraestructura desarrollada al sur de la ciudad de Bogotá, puntualmente en los límites con Soacha.

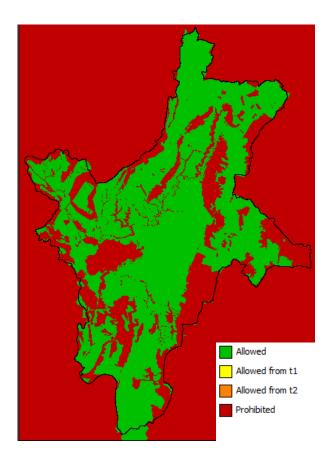


Figura 55. Zonificación – Escenario 3

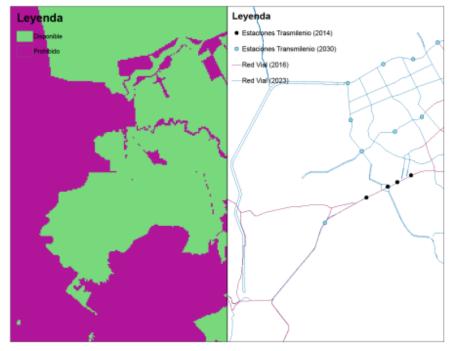


Figura 56. Detalle zonificación e infraestructura escenario 3 - Ciudad Verde

Adicionalmente, este escenario incluye la aptitud que se muestra en la Figura 53, en la que se castiga el desarrollo de usos de suelo en las categorías agrológicas.

5.6. ESCENARIO 4

El escenario 4 retorna a la aptitud base (Figura 57), la cual tiene en cuenta únicamente las variables de remoción en masa, incendios e inundaciones.

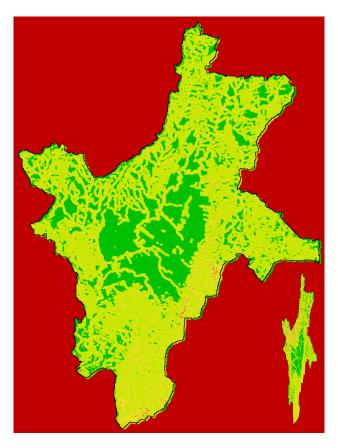


Figura 57. Aptitud base - Escenario 4

Adicionalmente, en la región se reglamenta la ocupación ordenada del borde de transición sur. Esto implica que la zonificación se ve afectada en dicha zona al habilitarla para el desarrollo, como se muestra en color verde en la Figura 58. Finalmente, se incluyen las estaciones de Transmicable propuestas para los años 2023 y 2027 como se observa en la Figura 60.

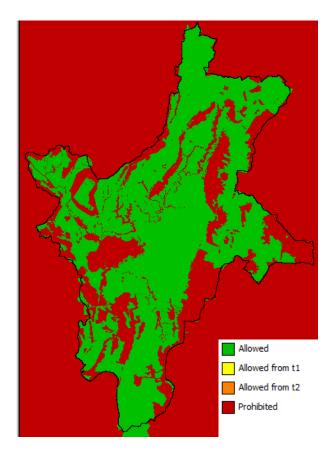


Figura 58. Zonificación – Escenario 4

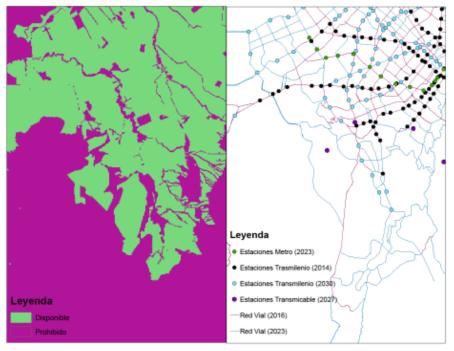


Figura 59. Detalle zonificación e infraestructura escenario 4 - Expansión Sur

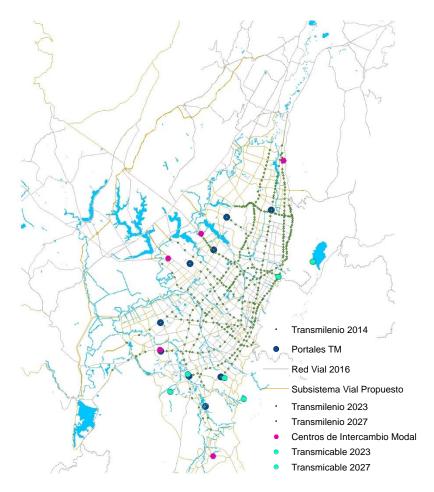


Figura 60. Infraestructura de Transporte - Escenario 4

5.7. ESCENARIO 5

Como se ilustra en la Tabla 12, este escenario incluye la primera línea del metro de Bogotá, a implementar en el 2023 y el Regiotram, el cual es implementado en el 2021 y 2023, para Facatativá y Gachancipá, respectivamente (ver Figura 61). Para la zonificación, se habilitan las zonas de influencias alrededor de las estaciones de metro y tren, incentivando el desarrollo orientado al transporte (DOT), tal como se muestra en la Figura 62.

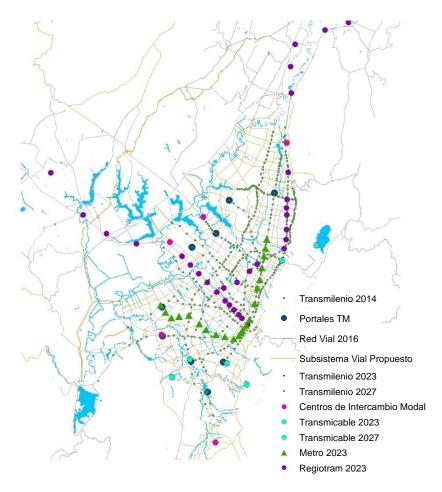


Figura 61. Infraestructura de Transporte – Escenario 5

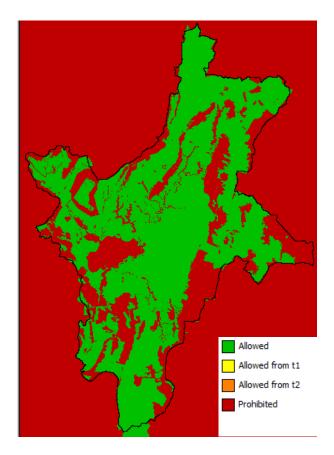


Figura 62. Zonificación – Escenario 5

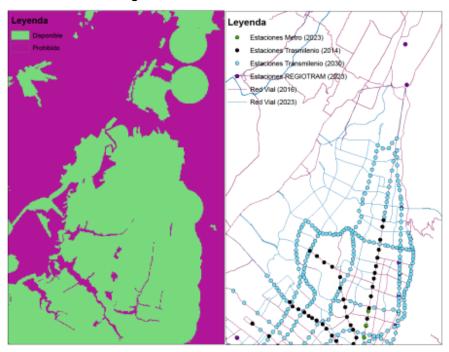


Figura 63. Detalle zonificación e infraestructura escenario 5 - Ciudad Norte y Desarrollos DOT

5.8. ESCENARIO 6

Para el escenario 6 se habilita el Aeropuerto el Dorado II en la zona occidental de la región (ver Figura 64). Este escenario pretende evaluar el desarrollo en las vecindades del futuro aeropuerto que se plantea implementar en el año 2028 en su primera pista. La zonificación no se ve modificada.

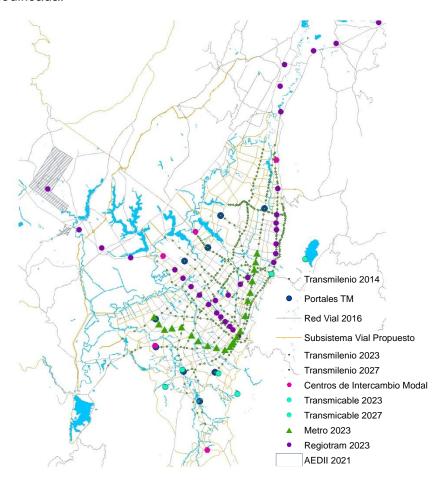


Figura 64. Infraestructura de Transporte - Escenario 6

5.9. ESCENARIO 7

El escenario 7 plantea el desarrollo completo en ciudad Mosquera. Esto implica que en la zonificación, se habilita el desarrollo en el sector de Mosquera (Figura 65) y se implementa la propuesta de red vial en Mosquera y su extensión del metro en el año 2023, como se muestra en la Figura 67.

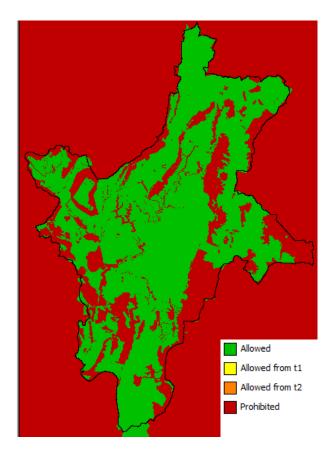


Figura 65. Zonificación – Escenario 7

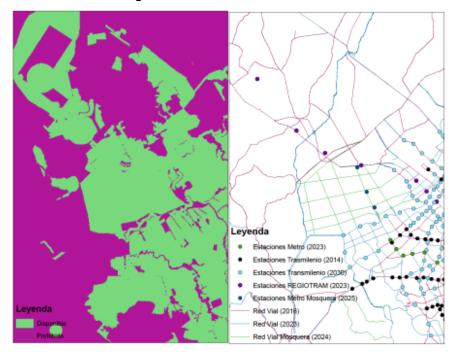


Figura 66. Detalle zonificación e infraestructura escenario 7 - Ciudad Mosquera

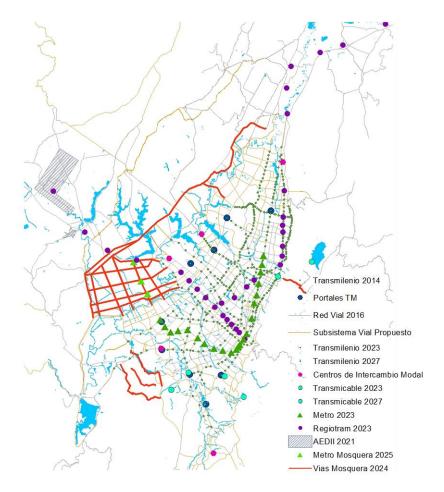


Figura 67. Infraestructura de Transporte - Escenario 7

5.10. ESCENARIO 8 - ESCENARIO MÁXIMO

Este escenario posee toda la infraestructura de transporte propuesta en los escenarios anteriores, así como las zonificaciones que habilitan los diferentes proyectos de desarrollo con excepción del borde sur, el cual fue omitido para este escenario. En este escenario se promueve el desarrollo de la zona de influencia del Aeropuerto el Dorado II mediante la habilitación de una zona próxima a éste, en donde se permite el desarrollo de suelo comercial y de servicios (Figura 68). Esto se controla por medio de los parámetros de accesibilidad del nuevo aeropuerto. Adicionalmente, se incorpora red vial en las zonas de influencia con el fin de aumentar la accesibilidad de esta zona para el año 2023, antes de la entrada en operación del AEDII (Figura 70).

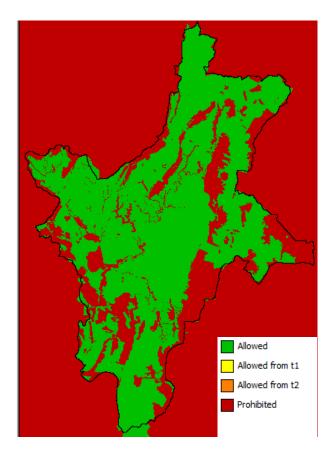


Figura 68. Zonificación – Escenario 8

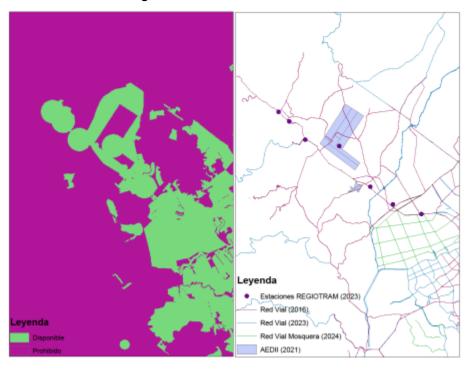


Figura 69. Detalle zonificación e infraestructura escenario 8 - Aerópolis

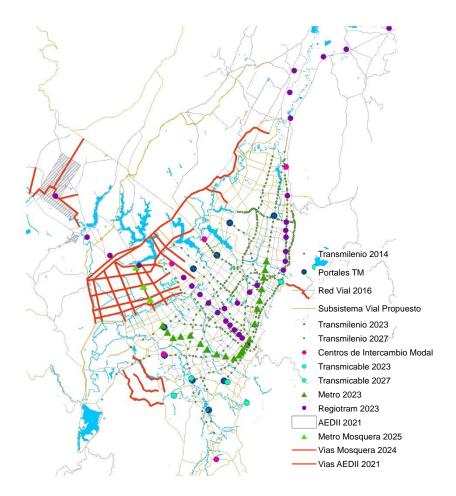


Figura 70. Infraestructura de Transporte – Escenario 8

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Es necesario tener presente que la ocupación del suelo resultado de cada una de las simulaciones, se da en función de un potencial de transición, que depende a su vez de todas las variables expresadas en los capítulos anteriores. Esto implica que, por ejemplo, a pesar de que se proponga algún tipo de infraestructura de transporte (que aumentará la accesibilidad), en los escenarios existirán áreas en las que no se presenten desarrollos o se presente alguno completamente diferente al esperado. No ha yque olvidar que esto es un modelo y será muy importante el juicio y experiencia de los expertos en la interpretación de sus resultados.

También se debe tener en cuenta que existe la comparación visual entre los diferentes escenarios a 2050 induzca a errores a ojos no expertos, debido a la gran extensión de la zona de estudio. Así que una correcta interpretación y diferenciación entre escenarios dependerá más del análisis de indicadores e impactos y su discriminación por zonas geográficas de menor tamaño.

6.1. DEFINICIÓN DE INDICADORES

Para poder tener una mejor percepción de los efectos y resultados de cada uno de los escenarios, es necesario apoyarse en indicadores que permitan medir de manera objetiva las afectaciones que pueda tener cierta política sobre la población y el territorio. Para esta labor, la Universidad de los Andes en conjunto con la Dirección de Economía Urbana de la SDP construyó un banco de indicadores que se presenta en la Tabla 14.

Tabla 14. Banco de indicadores

	Indicador	Tipo	Definición
1	Mapa más probable	Gráfico	Mapa en donde se representa la máxima probabilidad de desarrollo de los usos activos.
2	Distancia media de usos residenciales al Transporte público (Km)	Numérico y gráfico	Promedio de las distancias de los usos residenciales bajo, medio y alto a la infraestructura de transporte público más próxima.
3	Distancia media de egreso de la infraestructura del transporte a los usos económicos	Numérico y gráfico	Promedio de las distancias desde la infraestructura del transporte hasta los usos comercial, industrial, servicios y dotacional más próximos.
4	Distancia media de los usos residenciales a los usos económicos	Numérico	Indicador obtenido del software Metronamica que arroja el promedio de las distancias entre los usos residenciales y los usos económicos más cercanos a cada celda
5	Área ocupada en suelo de restricción agrológica (%)	Numérico	Porcentaje de área desarrollada en zonas con restricción por categorización agrológica
6	Porcentaje de expansión urbana en municipios	Numérico	Tasa de crecimiento de las zonas urbanas calculada como el total de área urbana nueva desarrollada en cada municipio, sobre el total de área del municipio.

	Indicador	Tipo	Definición
7	Exposición usos residenciales frente a la aptitud (riesgo)	Numérico y gráfico	Relación entre el número de celdas residenciales que se encuentran en zonas de aptitud baja (riesgo alto) con respecto al total de celdas residenciales Mapa en donde se refleja la exposición por parte de los usos residenciales frente a los factores físicos que afectan la aptitud del suelo.

6.2. PROCESO DE CÁLCULO DE INDICADORES

En esta sección se describe la metodología para calcular cada indicador y el proceso de construcción de un esquema en la herramienta *model builder* de Arcmap para procesar automáticamente la información entregada por Metronamica. Es decir, los mapas en formato ASCII que resultan después de simular el modelo para cada uno de los escenarios.

El primer indicador "<u>Mapa más probable</u>" se obtiene por medio de un análisis de sensibilidad, simulado 100 veces el mismo escenario e identificando en cada celda cual es el tipo de uso de suelo más probable. Metronamica tiene un módulo especial para cumplir con este objetivo (ver Figura 71).

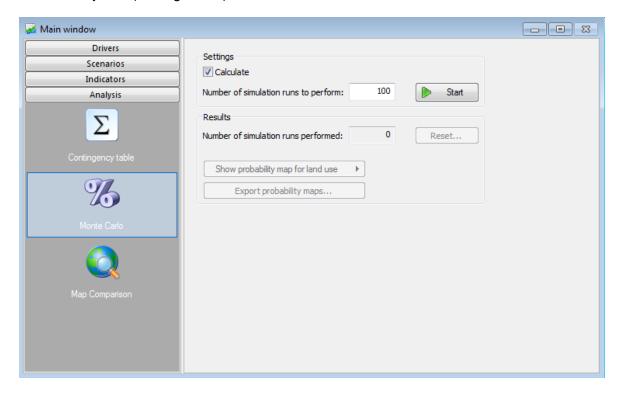


Figura 71. Diálogo para generación de mapas de probabilidad

Una vez Metronamica termina de procesar las simulaciones, se exportan los mapas en formato TIFF a una carpeta local. La herramienta entrega un mapa por cada uno de los

usos de suelo activos, en una escala de grises, donde las zonas más blancas indican que hubo un mayor número de simulaciones que resultaron en el uso de suelo que se está evaluando.

Estos mapas de probabilidad son insumo para el primer módulo del *model builder*, ver Figura 72. Este esquema construido con la herramienta de ArcGIS 10.5 se entrega a la SDP como anexo en medio magnético junto con los mapas de probabilidad de cada uso de suelo activo para cada uno de los escenarios.

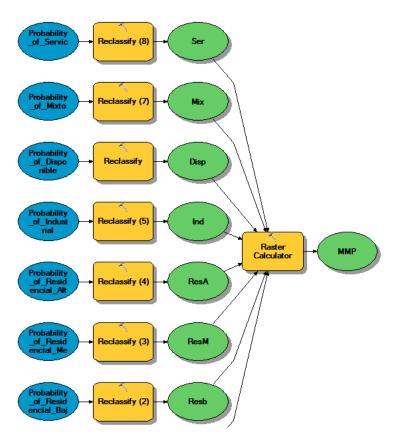


Figura 72. Model builder para calcular mapa más probable

En la herramienta "Reclassify" se da un código a cada uso de suelo que tenga probabilidad del 95% o más. Posteriormente en el "Raster calculator" se combina todas las capas para finalmente tener un mapa representativo con la mezcla de todos los usos de suelo que se presentaron consistentemente. Este producto se denominó mapa más probable (MMP). Para la presentación gráfica de este indicador, se utilizó la misma paleta de colores del proyecto, con la excepción que el color blanco, el cual representa áreas donde los suelos tuvieron una probabilidad menor al 955 de convertirse en un uso particular. Todos los mapas de probabilidad obtenidos en el proyecto se encuentran agrupados en el

Anexo IV — Cuadro maestro de indicadores, bajo el título Indicador 1.

Ahora, se describe el procedimiento para obtener el indicador "<u>Distancia media de los usos residenciales a los usos económicos</u>", este dato es extraído directamente de Metronamica accediendo por la ventana principal al módulo indicadores, una vez se ha corrido el modelo una vez, ver Figura 73. Este dato no necesita ningún otro tipo de procesamiento y puede ser comparado con los datos de otros escenarios.

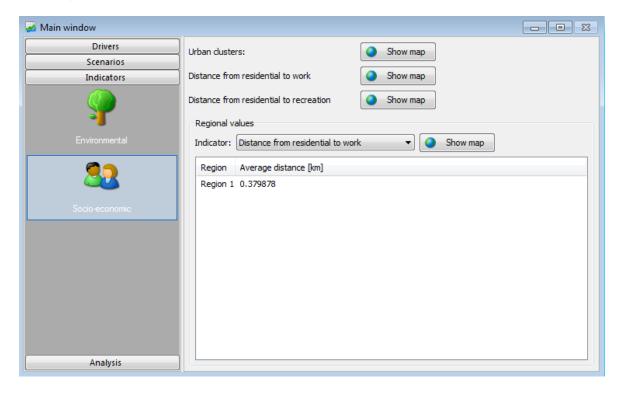


Figura 73. Modulo de indicadores en Metronamica

Para el resto de indicadores definidos en la Tabla 14, se diseñó un solo *Model Builder* que agrupa las diferentes herramientas de procesamiento necesarias (ver Figura 74). Como entrada de este módulo se va a tener el mapa de usos de suelo y el mapa de expansión urbana, obtenidos al activar los logs correspondientes en Metronamica. Adicionalmente, como insumos se requerirá las capas de zonificación, aptitud e infraestructura definidas

para cada escenario. Como resultado de este módulo se obtendrán los siguientes productos:

Indicador "<u>Distancia media de usos residenciales al Transporte público</u>". Se obtienen tablas con la distancia media en metros desde los usos de suelo residencial hasta las infraestructuras de transporte público más cercanas. En el perímetro urbano se consideró el transporte masivo de pasajeros y en el sector rural se definieron las vías regionales, ya que estas sirven al transporte intermunicipal. Las tablas de distancia están discriminadas por estratos Bajo (DM_RB), Medio (DM_RM), Alto (DM_RA) y Mixto (DM_mix), para todos los municipios. Adicionalmente el *model builder* entrega una capa tipo raster (DMT_Res) en la cual se observa con diferentes tonalidades la distancia en metros desde los usos residenciales hasta el transporte público. Para este proyecto el indicador cambia de tono cada 500 m en 5 intervalos. Todos indicadores de este tipo obtenidos en el proyecto se encuentran agrupados en el

 Anexo IV – Cuadro maestro de indicadores, bajo el título Indicador 2.

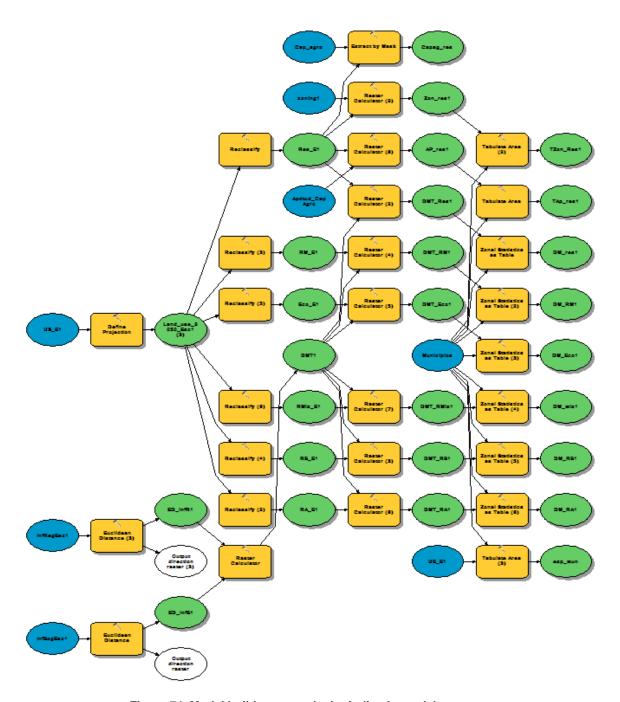


Figura 74. Model builder para calcular indicadores del proyecto

• Indicador "<u>Distancia media de egreso de la infraestructura del transporte a los usos económicos</u>". Éste se obtiene la misma información que el indicador anterior, pero con la diferencia que los usos de suelo objetivo de medición serán aquellos definidos como económicos (servicios, industrial, comercial y dotacional). La tabla de datos y la capa raster se denominan en el *model builder* (DM_Eco) y (DMT_eco) respectivamente. Se pueden consultar los resultados numéricos y gráficos en el

•

•

•

- Anexo IV Cuadro maestro de indicadores, bajo el título Indicador
 3.
- Indicador "Área ocupada en suelo de restricción agrológica". Este indicador se trabajó
 con la capa de suelos residenciales y la capa de restricción agrológica con el propósito
 de calcular el porcentaje de usos residenciales que se desarrollaron en zonas con
 restricciones de aptitud. Este dato se calculó para toda el área de estudio mediante la
 formula

% área ocupada en restricción agrológica =
$$\frac{\textit{Capag_res}}{\textit{Total área residencial}}$$

Dónde (Capag_res) es el resultado de utilizar el *model builder* para extraer las celdas de uso residencial que no tuvieron en cuenta la restricción de desarrollo en usos denominados como Capacidad agrológica II y III. Este dato es procesado después en Excel para poder convertir todo de celdas a unidades estándares de área (Ha) y estimar el indicador. Este indicador numérico puede ser consultado en el

Anexo IV – Cuadro maestro de indicadores, bajo el título Indicador 5.

• Indicador "Porcentaje de expansión urbana en municipios". Este indicador se trabajó con el mapa de expansión urbana, al cual se le aplicó la herramienta "Tabulate area" mediante el model builder y con esto se obtuvo la tabla (exp_mun) que muestra el área urbana desarrollada por cada municipio. Para obtener el indicador final y por efectos de facilidad en la interpretación, este dato fue dividido entre el total del área del municipio y multiplicado por 100, indicando de esta manera el crecimiento relativo de cada municipio. Este indicador numérico puede ser consultado en el

•

•

- Anexo IV Cuadro **maestro de indicadores**, bajo el título Indicador
- Indicador "Exposición usos residenciales frente a la aptitud". Este indicador es presentado de forma gráfica y numérica, partiendo de las salidas del model builder denominados TAp_res y AP_res, siendo el primero una tabla con las áreas por municipio desarrolladas en cada una de las clases de aptitud. Por lo tanto, para saber el porcentaje de suelo desarrollado en riesgo alto o muy alto es necesario sumar por municipio las áreas en aptitud 1 a 4 y dividir entre el total del área residencial desarrollada. Estos resultados se complementan al observar la capa raster (AP_res) que muestra la misma información en un mapa con diferentes tonalidades, siendo rojo y amarillo los colores asignados a las áreas de mayor riesgo o baja aptitud. Se pueden consultar los resultados numéricos y gráficos en el

•

•

•

Anexo IV – Cuadro maestro de indicadores, bajo el título Indicador
 7. Este módulo desarrollado en model builder fue entregado a la SDP en medio magnético junto con todos los otros insumos del proyecto.

Teniendo en cuenta el número de indicadores resultante de los 8 escenarios y la necesidad de compararlos, se decidió utilizar un cuadro maestro en el cual se encuentran agrupados dentro de una misma hoja todos los resultados por escenario para cada indicador. Este formato de presentación facilita a los interesados realizar comparaciones entre datos de una manera expedita, sin embargo, por el tamaño de hoja de este producto se tuvo que entregar en forma de anexo (ver

Anexo IV – Cuadro maestro de indicadores) a este documento.

6.3. ANÁLISIS DE ESCENARIOS

En esta sección se hace un análisis de los cambios observados en los escenarios y sus indicadores. La Figura 75 muestra el mapa más probable de los escenarios 1 y 3.

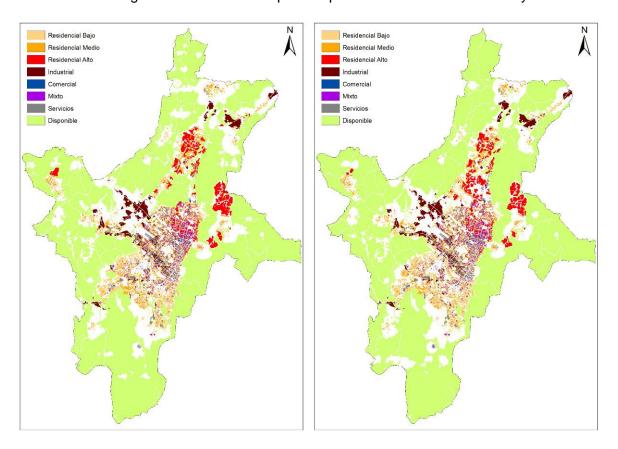


Figura 75. Mapa más probable Escenario 1 (izq) y Escenario 3 (der)

Los resultados muestran cambios importantes al modificar la zonificación del área norte de Bogotá. En los escenarios 1 y 2 se encuentran restringidas las áreas de lagos de Torca, ciudad Norte entre otras. En estos casos, el uso residencial alto se agrupa alrededor de Chía, Cota y los alrededores de la autopista Norte en Bogotá. Cuando se habilita la zona norte de Bogotá en el escenario 3, se ve la ocupación de esta área principalmente por el uso residencial, siendo predominante la aparición del residencial alto, mientras que el residencial medio se ubica alrededor del corredor Suba - Cota.

Esta evidencia gráfica es soportada de forma numérica con el análisis del indicador 6, porcentaje de expansión urbana de los municipios. Se observa el cambio en el paso del escenario 2 al 3, donde el porcentaje de ocupación en Bogotá es mucho mayor cuando la zona norte es habilitada. Este indicador muestra que inicialmente el desarrollo en Bogotá es 10% pero tras dicha modificación, el desarrollo llega al 15%. La situación inversa ocurre con los municipios aledaños: el hecho de tener restringida la zona norte de Bogotá hace que haya mayores desarrollos urbanos en los municipios, por ejemplo, Zipaquirá pasa de un desarrollo de 21% en el escenario 1, al 16% en el escenario 3.

Continuando con el análisis del mapa más probable, se encuentra que el escenario 7, en donde se habilita Ciudad Mosquera, tiene un alto impacto en la forma en que se desarrolla la región, ver Figura 76. En este escenario los resultados muestran que en la zona cercana al corredor de la Calle 13 es probable que se genere una competencia entre los usos de suelo por ubicarse allí, sin que haya un uso predominante, lo cual se señala con color blanco. Para los escenarios previos esto era suelo disponible.

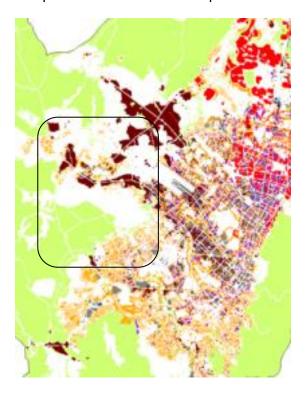


Figura 76. Desarrollo del Escenario 7 en área habilitada en Ciudad Mosquera

El segundo indicador, distancia media de usos residenciales al transporte público, muestra que al implementarse los diferentes planes de expansión del sistema de transporte público habría menores distancias de acceso para todos los estratos residenciales, ver Figura 77. En el escenario 1, este indicador muestra que una alta proporción de usos residenciales está a más de 1 km del transporte público. De hecho, la distancia media calculada muestra que el uso residencial bajo está en promedio a 2 km de las paradas del transporte público.

En el escenario 2, en cambio, se evidencia que una alta proporción de los usos residenciales está entre 500 y 12,00 m, siendo el residencial bajo el que mayor distancia tiene que recorrer. En la Figura 77 se muestra el cambio de tonalidades en los mapas de rojo y amarillo a colores verdes. Por otro lado, en el escenario 4 se introducen las estaciones de Transmicable, lo cual rompe el cluster rojo en la zona sur de Bogotá, con dos puntos verdes, lo que reflejan menores distancias de acceso al transporte público.

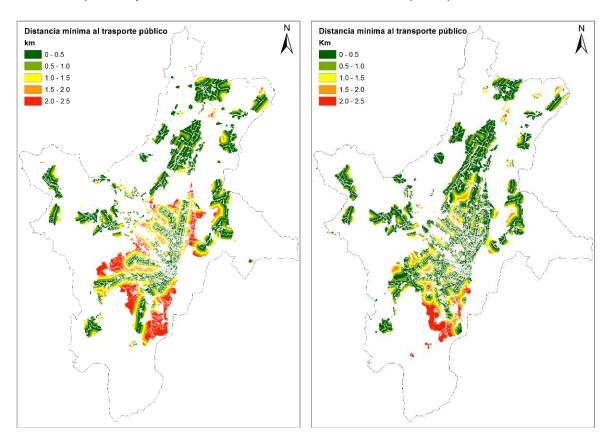


Figura 77. Indicador distancia al transporte público, Escenario 1 (izq) y Escenario 4 (der)

El tercer indicador, distancia media de egreso de la infraestructura del transporte a los usos económicos, muestra menor respuesta a la introducción de nueva infraestructura de transporte. Si bien la distancia se reduce al comparar el escenario 1 y los demás, 1,1 km en el primer escenario y 0,7 km en los otros, una gran proporción de este tipo de usos ya se encontraba en distancias menores a 1 km.

El indicador 4, distancia media de los usos residenciales a los usos económicos, es una medida extraída directamente de la herramienta, la cual indica el promedio de distancia entre un uso de suelo residencial y uno económico. Es evidente que los valores de 0.44 km (mayor valor – Escenario 2) y 0.35 km (menor valor – Escenario 5) no implican directamente que las personas tendrán su trabajo a menos de un kilómetro de distancia. Se consideró que este indicador puede estar relacionado con el desarrollo compacto de la región, al

informar de la cercanía entre los dos principales usos de suelo en términos de generación y atracción de viajes. El cambio de esos valores entre los escenarios 1 y 2 con respecto a los demás, puede ser explicado por la habilitación de la zona norte de Bogotá y la introducción de políticas DOT en las cercanías a las estaciones del modo férreo. Como ya se explicó, la zona norte probablemente se desarrollará en usos residenciales que buscarán estar cerca de los centros de trabajo en Bogotá y/o la zona industrial de la Calle 80 al occidente.

Los indicadores 5 y 7 miden la ubicación de los usos residenciales en los diferentes niveles de aptitud. En las capas de aptitud existen dos clases, la primera tiene que ver con el riesgo generado por fenómenos naturales como remoción de masa e inundaciones. Entre menor sea la aptitud del suelo para el desarrollo de un uso, menor es la probabilidad de que allí se desarrolle ese uso. La otra capa es la aptitud de los suelos denominados como capacidad agrologica 2 y 3, los cuales en su mayoría están ubicados en la zona noroccidental de la región (ver Figura 78). En estos suelos no se restringió totalmente el desarrollo de usos residenciales, pero si se afectó su potencial de desarrollo porque es preferible que estos suelos mantengan vocación agrícola.

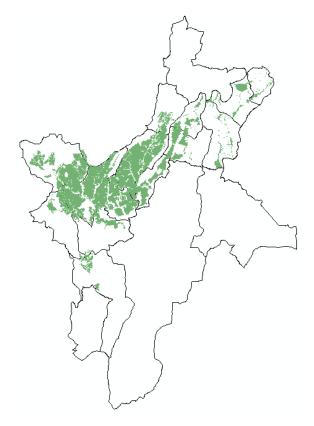


Figura 78. Suelos con capacidad agrológica 2 y 3 (color verde)

La restricción de aptitud para el suelo de capacidad agrícola solo se incluyó en los escenarios 1 al 3. Entonces en los escenarios 4 a 8, los usos residenciales tenían mayor posibilidad de ocupar esas zonas, y consecuentemente el indicador 5, área ocupada en

suelo de restricción agrológica, lo refleja así, dando un salto de 25% en los escenarios 1 y 2, a un 28% en el escenario 4. En este sentido, también es interesante ver que para el escenario 3 el desarrollo en áreas con capacidad agrícola fue el menor con 22%. Esto se explica porque había restricciones en la capa de aptitud y también porque se habilitó la zona norte de Bogotá. El mismo efecto se presenta cuando se habilita Ciudad Mosquera en el Escenario 7, donde muchos de los desarrollos que iban a estar en la zona noroccidental de la región pasan a estar en las cercanías de Bogotá y dejan de ocupar el suelo de capacidad agrológica.

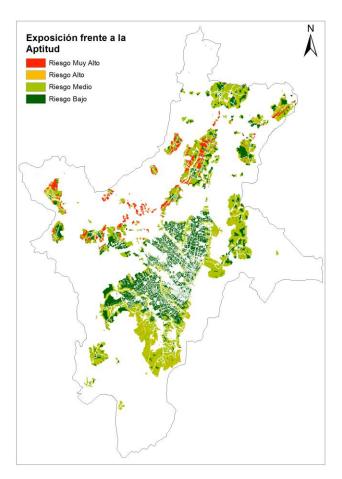


Figura 79. Exposición de usos residenciales frente a la aptitud para el escenario 2

Finalmente, el indicador 7, exposición usos residenciales frente a la aptitud, muestra claramente la flexibilidad de la herramienta para simular patrones como la generación de asentamientos residenciales en zonas de alto riesgo o con restricción por capacidad agrológica (ver Figura 79), pues para los primeros 3 escenarios, aunque los dos tipos de aptitud están activos, aún se dan desarrollos residenciales en zonas de alto riesgo ambiental, puntualmente un 13%. Cuando no se tuvo en cuenta la aptitud por capacidad

agrologica, los resultados indican que es probable que haya asentamientos residenciales en zonas de alto riesgo en menor proporción, 6.4% en el peor de los casos.

Los resultados de las simulaciones son acordes a las expectativas iniciales, en el sentido que recogen las dinámicas de ocupación del territorio, particularmente al comparar las políticas que habilitan la zona norte de la capital. Los usos comerciales y residenciales medio y bajo entrarán a ocupar los proyectos denominados Ciudad Norte y Lagos de Torca, entre otros, dado que ofrecen cercanía a los centros de empleo y conectividad con el sistema de transporte.

6.4. ANÁLISIS ORINETADO A RESPONDER LAS PREGUNTAS ORIENTADORAS DE DECISIÓN

Con el fin de establecer más claramente la relación entre el resultado de la simulación del modelo de Bogotá y la región en Metronamica, a continuación, se hace una breve descripción de las preguntas que son de interés para orientar la toma dediciones de política pública:

- 1. Efectos de un escenario tendencial en el patrón físico de localización y forma de la ocupación resultante: el primer escenario busca conocer el patrón de expansión de la región si se continúa con la zonificación actual y sin implementación de proyectos de infraestructura. Observando los resultados se puede concluir que este escenario significa la menor expansión para Bogotá, contrario a lo que sucede en los diferentes municipios donde se encuentran expansiones urbanas superiores al 30% entre 2016 y 2050, ver por ejemplo el caso de los municipios al norte de Bogotá como Cajicá, Chía. Cota, Gachancipá y Sopó.
- 2. Efectos en la distribución de la ocupación del suelo causados por la RED VIAL REGIONAL sobre el escenario tendencial: este efecto fue evaluado en el escenario 2 de Metronamica, encontrando que el principal resultado es la disminución en la distancia desde los usos residenciales al transporte público y una mayor conectividad con los usos económicos. Como era de esperarse, la distribución de la población para este caso no se ve afectada en mayor medida debido a que se controla la simulación restringiendo los planes de desarrollo en Bogotá y la Región.
- 3. Consecuencias de implementar simultáneamente los POT versión 2018 y mantener la restricción a la ocupación del suelo en zonas de producción agrícola 2 y 3 del Decreto 3600: esta pregunta se pone a prueba principalmente en el escenario 3 que habilita las zonas de desarrollo del POT 2018 (principalmente en ciudad norte y en ciudad Rio) y mantiene las zonas de restricción agrícola. Aquí se puede observar cómo se da una redistribución el desarrollo de la región. Un ejemplo claro se evidencia en la ubicación del uso residencial en la zona norte de Bogotá, afectando a su vez la urbanización en los municipios al norte. Por otro lado, se puede apreciar que al igual que en los escenarios 1 y 2 la exposición de usos residenciales frente a la aptitud es superior al 10%, valor que está altamente influenciado por las zonas al occidente de Bogotá que pertenecen a las categorías 2 y 3 de producción agrícola.

- 4. Efectos en la ocupación del suelo de la Vía Perimetral del SUR: Al habilitar la vía perimetral y otros proyectos de desarrollo como lo es el transmicable se puede ver que la distancia al transporte público es el principal indicador afectado de manera positiva. Esta política de ordenamiento (zonificación) al igual que las demás planteadas en el escenario 3 induce a ocupaciones casi totales de las nuevas áreas, debido la alta demanda de usos principalmente residenciales bajo y medio para el año 2050. Por otro lado, se tiene que la exposición frente a la aptitud disminuye a valores cercanos al 6%, ya que para este caso ya no se tuvieron en cuenta las categorías de producción agrícola y por lo tanto este indicador solo mire la exposición a riesgos naturales, este porcentaje posteriormente tiende a bajar a medida que los usos residenciales se ubican en las cercanías de la capital donde los usos de suelos son más aptos con respecto a los municipios, principalmente por las medidas artificiales de mitigación de riesgo adoptadas en Bogotá.
- 5. Los patrones en la distribución de la ocupación del suelo en respuesta a escenarios de acuerdos regionales acumulativos (a-d):
 - a. Acuerdo regional para construir un sistema de transporte masivo regional en modo férreo. SITMR: Con la implementación del modo férreo tanto en Bogotá como en la región se buscaba encontrar los impactos de este modo de transporte en el desarrollo de usos de suelo en las inmediaciones de las estaciones con políticas DOT. De los indicadores y resultados calculados se puede observar que a pesar de que en el escenario 5 la distancia entre los usos residenciales y los usos económicos disminuye, aún no hay suficientes evidencias para decir que el Regiotram está influyendo cambios en la región, esto es explicado en gran parte por la habilitación de zonas urbanizables en Bogotá. En otras palabras los efectos de la accesibilidad se ven opacados por los efectos de la zonificación.
 - b. Acuerdo regional para para la construcción del Aeropuerto el Dorado II. AEDII: Con este escenario simulado no se está presentando mejora en ninguno de los indicadores formulados. La distancia media al transporte público desde las residencias, así como la distancia desde el transporte hacia los usos económicos está aumentando, evidenciando una distribución poco favorable de los usos con respecto al transporte. Sin embargo, es importante señalar que en términos de desarrollo de usos de suelo se nota una tracción de servicios, comercial y mixto a las inmediaciones del nuevo terminal aéreo.
 - c. Acuerdo regional para la habilitación del suelo Ciudad Mosquera. CM: La expansión urbana es el principal indicador que permite observar las bondades de este escenario en el que no solo el suelo de ciudad Mosquera es habilitado, sino su infraestructura vial y ferroviaria, para esta medida de desempeño el valor pasa de ser aproximadamente 10% a superar el 30%. En gran medida está área será poblada por usos residenciales bajo y medio que se verán beneficiados de la cercanía a la capital.
 - d. Acuerdo regional para coordinación de los municipios en un proyecto integral alrededor del AEII. "Aeropolis": Esta política promueve la coordinación por parte de los municipios alrededor del proyecto del Aeropuerto El Dorado II para promover un desarrollo económico en su área de influencia. Como se señaló anteriormente se evidencia una fuerte atracción de usos industrial, de servicios y mixto en la parte sur de las pistas, en donde se da la expansión

industrial de Funza hacia el aeropuerto nuevo una vez se habilita un área de ocupación alrededor del nuevo terminal aéreo.

6.5. ANÁLISIS POR MUNICIPIOS

Se hizo un análisis discriminando por municipios los resultados de expansión y densidad bruta de acuerdo con la proyección de población calculada por parte de la SDP para el año 2050. En la Tabla 15 se observan las expansiones para cada uno de los escenarios en hectáreas y porcentaje de expansión con respecto a lo que ya se encontraba desarrollado y en la Tabla 16 se muestran las densidades calculadas para cada escenario.

Tabla 15. Expansión por municipio

	Ocupaci ón 2016 (Ha)	Ocupación 2050 Esc 1 (Ha)		Ocupación 2050 Esc 2 (Ha)		Ocupación 2050 Esc 3 (Ha)		Ocupación 2050 Esc 4 (Ha)	
BOGOTÁ	84.978,7	93.782,5	10,4%	94.181,4	10,8%	97.923,6	15,2%	97.208,6	14,4%
BOJACÁ	9.913,3	10.842,5	9,4%	10.787,0	8,8%	10.678,0	7,7%	10.831,7	9,3%
CAJICÁ	5.034,6	7.385,4	46,7%	7.395,1	46,9%	7.143,8	41,9%	7.346,2	45,9%
CHÍA	7.940,5	10.510,2	32,4%	10.505,5	32,3%	10.272,6	29,4%	10.442,2	31,5%
COTA	5.429,2	7.568,3	39,4%	7.585,9	39,7%	7.525,8	38,6%	7.751,9	42,8%
FACATATI VÁ	15.134,4	16.290,0	7,6%	16.223,8	7,2%	16.247,5	7,4%	16.469,3	8,8%
FUNZA	6.715,8	9.523,1	41,8%	9.655,9	43,8%	9.544,0	42,1%	9.817,9	46,2%
GACHANCI PÁ	4.169,2	6.112,4	46,6%	6.137,3	47,2%	6.017,0	44,3%	5.702,8	36,8%
LA CALERA	32.570,6	39.251,9	20,5%	39.156,8	20,2%	38.212,9	17,3%	37.059,5	13,8%
MADRID	11.926,1	13.683,6	14,7%	13.690,1	14,8%	13.041,7	9,4%	13.940,3	16,9%
MOSQUER A	10.602,0	11.569,3	9,1%	11.576,2	9,2%	11.571,1	9,1%	11.620,4	9,6%
SIBATÉ	12.062,2	13.763,9	14,1%	14.003,3	16,1%	13.370,8	10,8%	13.068,0	8,3%
SOACHA	18.151,9	19.809,0	9,1%	19.880,6	9,5%	19.966,0	10,0%	19.929,2	9,8%
SOPÓ	11.077,6	13.389,5	20,9%	13.207,0	19,2%	13.186,8	19,0%	12.743,3	15,0%
TABIO	7.549,6	8.682,5	15,0%	8.523,4	12,9%	8.153,6	8,0%	8.669,5	14,8%
TENJO	11.422,1	13.042,4	14,2%	12.826,4	12,3%	12.525,1	9,7%	13.136,4	15,0%
TOCANCIP Á	7.435,8	8.713,1	17,2%	8.763,5	17,9%	8.539,6	14,8%	8.737,9	17,5%
ZIPAQUIR Á	19.173,2	23.287,0	21,5%	23.100,8	20,5%	22.362,1	16,6%	21.803,4	13,7%

	Ocupaci ón 2016 (Ha)	Ocupación 2050 Esc 5 (Ha)		Ocupación 2050 Esc 6 (Ha)		Ocupación 2050 Esc 7 (Ha)		Ocupación 2050 Esc 8 (Ha)	
BOGOTÁ	84.978,7	97.059,2	14,2%	97.017,5	14,2%	96.887,9	14,0%	96.670,8	13,8%
BOJACÁ	9.913,3	10.969,2	10,7%	10.804,7	9,0%	10.688,8	7,8%	10.694,9	7,9%

CAJICÁ	5.034,6	7.403,0	47,0%	7.355,2	46,1%	7.272,7	44,5%	7.222,3	43,5%
CHÍA	7.940,5	10.598,4	33,5%	10.587,2	33,3%	10.591,9	33,4%	10.556,3	32,9%
COTA	5.429,2	7.720,6	42,2%	7.690,3	41,6%	7.655,0	41,0%	7.657,6	41,0%
FACATATI VÁ	15.134,4	16.693,6	10,3%	16.940,2	11,9%	16.904,2	11,7%	16.517,9	9,1%
FUNZA	6.715,8	9.951,5	48,2%	9.755,3	45,3%	9.800,6	45,9%	9.572,0	42,5%
GACHANCI PÁ	4.169,2	5.371,6	28,8%	5.563,1	33,4%	5.440,3	30,5%	5.575,7	33,7%
LA CALERA	32.570,6	37.041,8	13,7%	37.062,4	13,8%	36.649,8	12,5%	36.759,2	12,9%
MADRID	11.926,1	13.954,3	17,0%	14.215,3	19,2%	13.782,2	15,6%	14.382,0	20,6%
MOSQUER A	10.602,0	11.643,5	9,8%	11.644,6	9,8%	13.805,3	30,2%	13.789,1	30,1%
SIBATÉ	12.062,2	13.113,4	8,7%	13.043,9	8,1%	12.968,3	7,5%	12.699,7	5,3%
SOACHA	18.151,9	20.057,4	10,5%	19.935,7	9,8%	19.847,2	9,3%	20.180,9	11,2%
SOPÓ	11.077,6	12.498,1	12,8%	12.257,3	10,6%	12.284,6	10,9%	12.260,5	10,7%
TABIO	7.549,6	8.836,6	17,0%	8.626,0	14,3%	8.488,4	12,4%	8.443,4	11,8%
TENJO	11.422,1	13.272,8	16,2%	13.493,2	18,1%	13.139,3	15,0%	13.019,4	14,0%
TOCANCIP Á	7.435,8	8.626,3	16,0%	8.723,5	17,3%	8.663,0	16,5%	8.591,0	15,5%
ZIPAQUIR Á	19.173,2	21.321,0	11,2%	21.415,7	11,7%	21.239,6	10,8%	21.453,1	11,9%

Al restringir Bogotá en el escenario 1, su territorio se está expandiendo mucho menos que lo que se logra en los escenarios del 3 al 8. Los municipios que aumentan en mayor medida su expansión al restringir el desarrollo en Bogotá son Cajicá, Chía, Cota y Gachancipá. Al habilitar las posibles políticas de ordenamiento y los proyectos de infraestructura, los municipios que más aumentan su expansión son principalmente Mosquera por la habilitación de Ciudad Mosquera y su respectiva infraestructura, así mismo Madrid y Bogotá poseen altos porcentajes de expansión urbana con respecto a que ya se encontraba desarrollada.

Por otro lado, los municipios que más disminuyen su expansión con la habilitación de los planes parciales y la infraestructura de transporte son Gachancipá, La Calera, Sibaté, Sopó y Zipaquirá. Proyectos como el Regiotram que se encuentra propuesto hacia el occidente y el norte de Bogotá posee gran influencia sobre el desarrollo de los municipios del occidente que aumentan su expansión al momento de implementar las políticas de transporte masivo en modos férreos. Contrario a esto sucede con los municipios del norte en donde los municipios disminuyen su expansión a la hora de implementar los modos férreos.

Tabla 16. Densidad por municipio por escenario

			Densidad (Hab/Ha)							
	Población 2050	Esc 1	Esc 2	Esc 3	Esc 4	Esc 5	Esc 6	Esc 7	Esc 8	
BOGOTÁ	11.048.721	117,8	117,3	112,8	113,7	113,8	113,9	114,0	114,3	
BOJACÁ	19.082	1,8	1,8	1,8	1,8	1,7	1,8	1,8	1,8	

CAJICÁ	100.551	13,6	13,6	14,1	13,7	13,6	13,7	13,8	13,9
CHÍA	219.688	20,9	20,9	21,4	21,0	20,7	20,8	20,7	20,8
COTA	34.889	4,6	4,6	4,6	4,5	4,5	4,5	4,6	4,6
FACATATIV Á	178.186	10,9	11,0	11,0	10,8	10,7	10,5	10,5	10,8
FUNZA	130.299	13,7	13,5	13,7	13,3	13,1	13,4	13,3	13,6
GACHANCIP Á	24.129	3,9	3,9	4,0	4,2	4,5	4,3	4,4	4,3
LA CALERA	31.629	0,8	0,8	0,8	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
MADRID	166.395	12,2	12,2	12,8	11,9	11,9	11,7	12,1	11,6
MOSQUERA	224.802	19,4	19,4	19,4	19,3	19,3	19,3	16,3	16,3
SIBATÉ	51.954	3,8	3,7	3,9	4,0	4,0	4,0	4,0	4,1
SOACHA	1.047.669	52,9	52,7	52,5	52,6	52,2	52,6	52,8	51,9
SOPÓ	38.953	2,9	2,9	3,0	3,1	3,1	3,2	3,2	3,2
TABIO	41.516	4,8	4,9	5,1	4,8	4,7	4,8	4,9	4,9
TENJO	53.447	4,1	4,2	4,3	4,1	4,0	4,0	4,1	4,1
TOCANCIPÁ	159.777	18,3	18,2	18,7	18,3	18,5	18,3	18,4	18,6
ZIPAQUIRÁ	9.907	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5

En términos de densidad poblacional los escenarios que indican mayores impactos para la región son el Escenario 1 y el 3, esto en línea con los análisis anteriores donde se corrobora que la habilitación de zonas para la ocupación de usos activos en Bogotá, serán pobladas por proyectos residenciales de estrato medio y bajo, pero también en menor medida por el estrato alto. El indicador de densidad muestra cómo el Distrito puede generar mayores densidades al no habilitar las áreas discutidas en el POT, Ciudad norte, ciudad rio entre otros. Mientras que en el escenario 1 se tiene 117 hab/Ha al habilitar las nuevas zonas de desarrollo en el escenario 3 se obtiene una cifra de 112 hab/Ha.

Un fenómeno opuesto ocurre en los municipios como Cajicá, Chía y Madrid, donde las implementaciones de los planes de expansión puede que no cuenten con la demanda esperada, condicionada por la nueva oferta en la capital. Por tal motivo el modelo arroja un área ocupada menor para los municipios que cuando Bogotá está restringida, implicando esto a su vez que la población proyectada para estos municipios se localice en una menor área. Cabe resaltar que el Modelo de Metronamica trabaja en dos dimensiones y por lo tanto es imposible desde este enfoque saber si la ocupación de usos de suelo también afecta la proyección poblacional, lo cual llevaría a que si bien el área de los municipios no crese la oblación tampoco lo hará y en esta medida la densidad se mantendrá constante.

Dado que los enfoques pueden varios, en esta sección se intentó condensar un grupo de análisis relacionados con los diferentes resultados en torno a los escenarios simulados. Por tal motivo se recomienda a la SPD incluir dentro de sus labores continuar trabajando sobre el modelo, para así poder sacar el máximo provecho a esta herramienta.

7. CONCLUSIONES

La calidad de los datos es un elemento importante para la aplicación, calibración y validación exitosa de modelos de este tipo. En este proyecto, varias fuentes de datos se han utilizado para realizar estas actividades, incluidas imágenes satelitales, fotografías aéreas, bases catastrales, censos inmobiliarios y planes de ordenamiento. Dada la inconsistente resolución espacial y temporal de estos datos, se han utilizado métodos coherentes y cooperativos de interpretación visual, entre otros, para extraer datos de usos del suelo, particularmente en los municipios vecinos a Bogotá. En el proceso se encontró que existen varios retos para la consecución de información relacionada con los usos del suelo para los municipios, por lo cual herramientas como las fotos satelitales, y posteriormente la inspección visual, junto con las tablas de contingencia, ayudan a mejorar la calidad de los datos.

De otra parte, la calibración de una herramienta de este tipo es un proceso complejo sobre el cual aún existe discusión en las herramientas que se deben utilizar. En el modelo desarrollado para Bogotá, se usó un método iterativo de calibración manual y un conjunto de indicadores de calibración (Kappa y Fuzzy Kappa), obteniendo buenos resultados. Utilizando estos métodos, se logró una alta precisión (entre 80% y 85%) en la calibración del modelo, lo que excede la precisión mínima del 80% establecida para modelos de este tipo (Aljoufie, Zuidgeest et al. 2013; Furtado 2009). Sin embargo, siempre habrá errores inherentes en la extracción y procesamiento de los datos. Estos errores estarán presentes en las simulaciones de los escenarios, pero son bajos en relación con la cantidad de cambios resultantes. Esta baja tasa de error se debe en parte a que los errores se reducen mucho en la simulación, debido a los efectos promedios de las funciones de vecindad y a las interacciones del modelo de CA (Yeh y Li 2006). Los resultados de validación muestran una buena coincidencia del modelo con los datos observados.

En general, este modelo CA calibrado parece ser una herramienta muy útil para analizar la interacción entre los diferentes usos del suelo con la infraestructura de transporte y la zonificación, además del crecimiento urbano. El modelo se puede usar para explorar y simular la ocupación futura de la zona de estudio bajo planes y políticas espaciales alternativas.

Los resultados de esta investigación proporcionan varias direcciones para desarrollos futuros en Bogotá y sus municipios vecinos. En primer lugar, dados los prometedores resultados de calibración y validación, se deja una base sólida y completa para la exploración de la dinámica urbana futura en la zona de estudio. Teniendo en cuenta el rápido crecimiento de los municipios vecinos a Bogotá, y el rápido crecimiento del parque automotor (automóviles y motos), este tipo de herramientas es útil y necesario. En segundo lugar, dada la complejidad de los cambios en los usos del suelo y su interacción con los otros factores considerados, proyectos adicionales en otros lugares podrían dar información

nueva sobre la capacidad de esta herramienta para simular la ocupación del territorio y los cambios en los usos del suelo en nuestro contexto.

BIBLIOGRAFÍA

Aljoufie, Mohammed, Zuidgeest, Mark, Brussel, Mark, van Vliet, Jasper y van Maarseveen, Martin (2013). A cellular automata-based land use and transport interaction model applied to Jeddah, Saudi Arabia. *Landscape and Urban Planning*, 112, pp. 89-99.

de Silva, C., Wimaladasa, J. y Munasinghe, J. (2015). Calibrating Metronamica Land Use Simulation Model for Colombo, Sri Lanka. *Bhumi, The Planning Research Journal*, 4(1), pp. 1-13.

Furtado, Bernardo A. (2009). Modeling social heterogeneity, neighborhoods and local influences on urban real estate prices: spatial dynamic analyses in the Belo Horizonte metropolitan area, Brazil. *Netherlands Geographical Studies*, 385.

Geurs, Karst T. (2006). Job accessibility impacts of intensive and multipleland-use scenarios for the Netherlands' Randstad Area. *Journal of Housing and the Built Environment*, 21(1), pp. 51-67.

Hagen-Zanker, Alex (2009). An improved Fuzzy Kappa statistic that accounts for spatial autocorrelation. *International Journal of Geographical Information Science*, 23(1), pp. 61-73.

Hagoort, Michel, Geertman, Stan y Ottens, Henk (2008). Spatial externalities, neighbourhood rules and CA land-use modelling. *The Annals of Regional Science*, 42(1), pp. 39-56.

Liu, Yan y Phinn, Stuart R. (2003). Modelling urban development with cellular automata incorporating fuzzy-set approaches. *Computers, Environment and Urban Systems*, 27(6), pp. 637-658.

RIKS (2012) *METRONAMICA User Manual.* Research Institute for Knowledge System. Maastricht.

Santé, Inés, García, Andrés M., Miranda, David y Crecente, Rafael (2010). Cellular automata models for the simulation of real-world urban processes: A review and analysis. *Landscape and Urban Planning*, 96(2), pp. 108-122.

SDP (2014) Región Metropolitana De Bogotá: Una Visión De La Ocupación Del Suelo. Secretaría Distrital de Planeación. Bogotá.

SGC (2016) Guía Metodológica Para Estudios De Amenaza, Vulnerabilidad Y Riesgo Por Movimientos En Masa. Colección Guías y ManualesServicio Geológico Colombiano. Bogotá.

SIRE (2008) Documento Técnico Para La Atención De Incendios Forestales En Bogotá D.C. Comisión distrital para la prevención y mitigación de incendios forestales. Bogotá.

USGS (2017) Panchromatic Image Sharpening of Landsat 7 ETM+., 2017.

van Vliet, Jasper, Hurkens, Jelle, White, Roger y van Delden, Hedwig (2012). An Activity-Based Cellular Automaton Model to Simulate Land-Use Dynamics. *Environ Plann B Plann Des*, 39(2), pp. 198-212.

Verburg, Peter H., de Nijs, Ton C. M., Ritsema van Eck, Jan, Visser, Hans y de Jong, Kor (2004). A method to analyse neighbourhood characteristics of land use patterns. *Computers, Environment and Urban Systems*, 28(6), pp. 667-690.

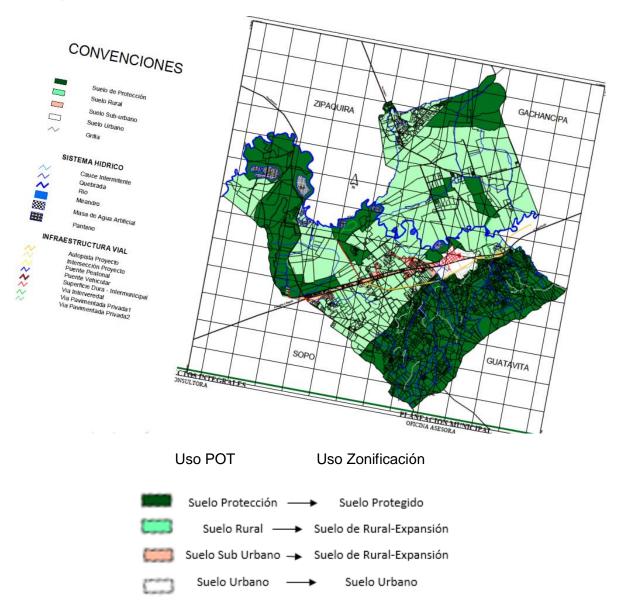
Yeh, Anthony G. y Li, Xia (2006). Errors and uncertainties in urban cellular automata. *Computers, Environment and Urban Systems*, 30(1), pp. 10-28.

ANEXOS

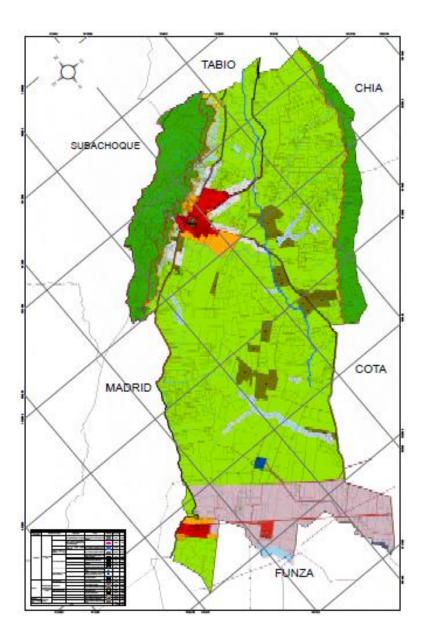
ANEXO I – MAPAS DIGITALIZADOS DE LOS PLANES DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL DE MUNICIPIOS

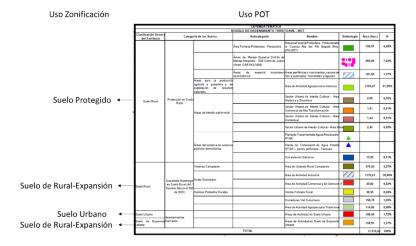
Los mapas aquí presentados fueron digitalizados de los POT de los municipios de Tocancipá, Tenjo y Sibaté. La información necesaria para desarrollar el modelo de estos municipios no estaba incluida en la base de datos del IGAC o demás disponibles. A continuación, se muestran los mapas utilizados y la relación de los usos transformados a los tres usos POT propuestos en la sección de zonificación.

Tocancipá

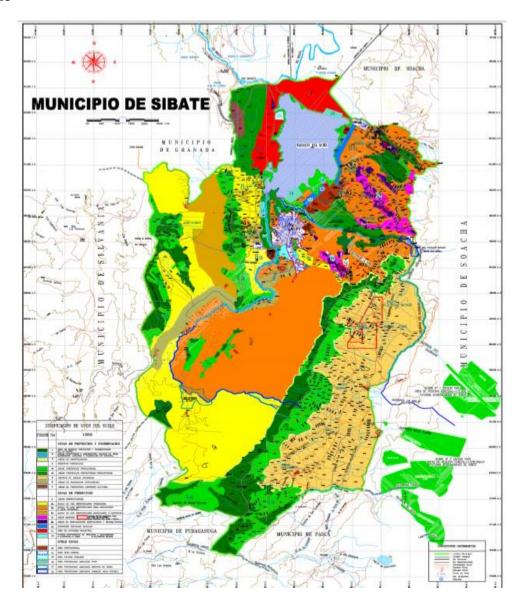


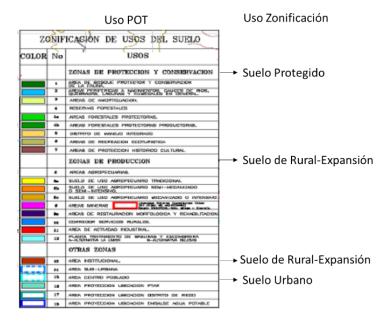
Tenjo





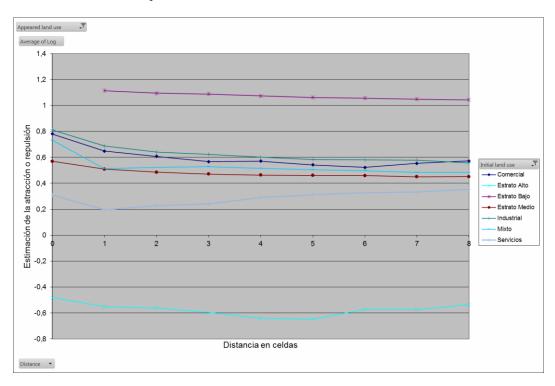
Sibaté



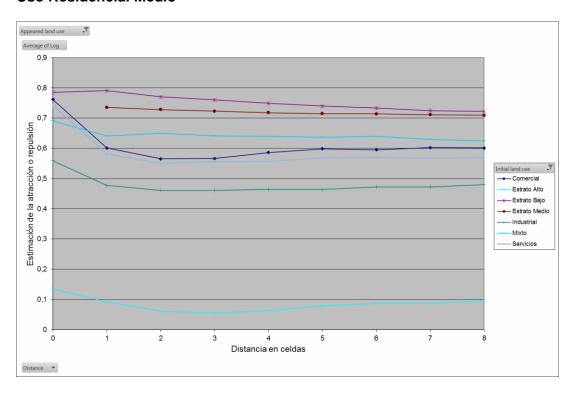


ANEXO II – CURVAS DE VECINDAD PARA BOGOTÁ Y LA REGIÓN

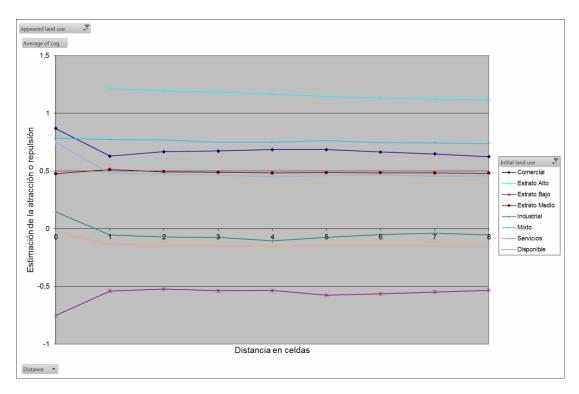
Uso Residencial Bajo



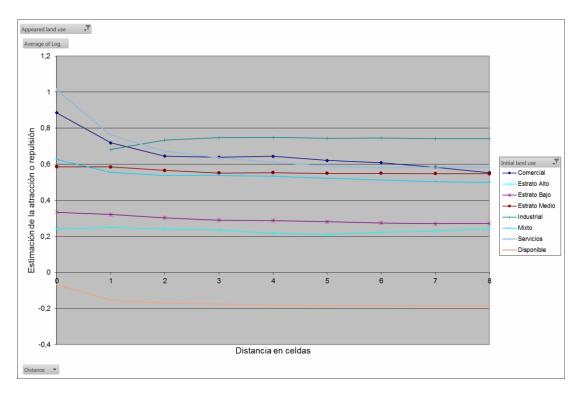
Uso Residencial Medio



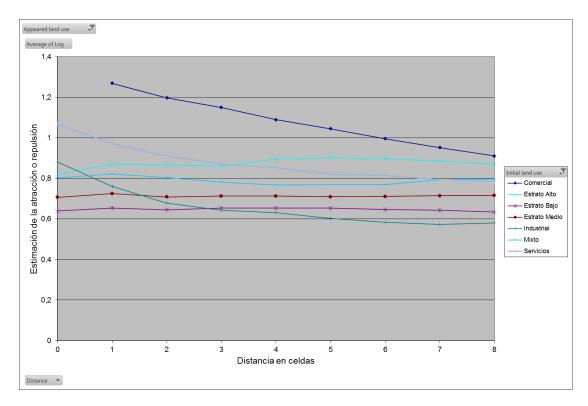
Uso Residencial Alto



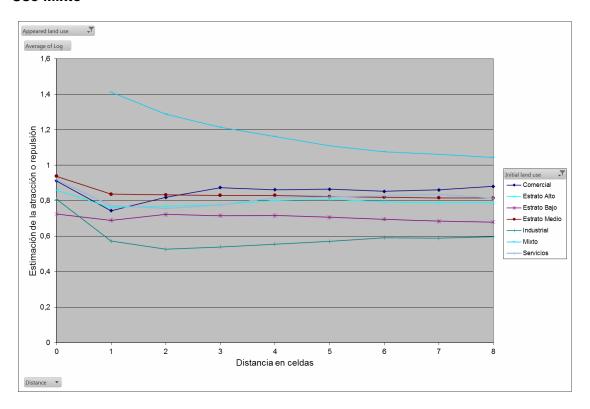
Uso Industrial



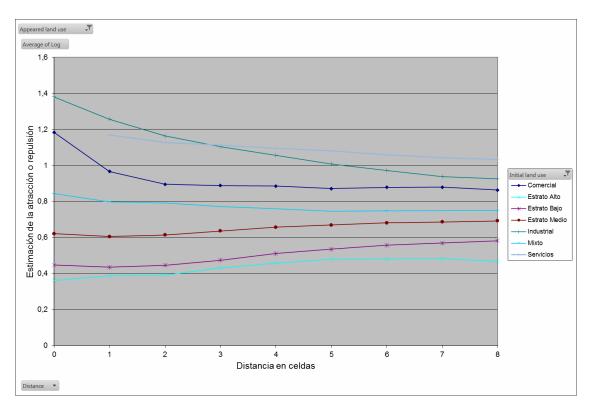
Uso Comercial



Uso Mixto



Uso Servicios



ANEXO III – ENTREGA DE LA BASE DE DATOS GEOGRÁFICA

Una parte importante de este proyecto está compuesta de la entrega de la información digital a la SDP. Para esto se siguieron los estándares técnicos requeridos para la entrega de información geográfica a la entidad.

En primer lugar, se siguieron los "estándares de implementación", los cuales describen la organización de los archivos digites y la separación de cada componente en carpetas individuales con los siguientes títulos: Archivos de Impresión, Base de Datos Espacial, Documentación, Imágenes, Leyendas y Proyecto. Para mayor detalle del contenido en cada una de las carpetas, el lector se puede remitir directamente a los instructivos generados por la SDP.

Posteriormente se diligenció un formato de "*Metadato mínimo*" para cada una de las bases de datos que integran los parámetros geográficos de Metronamica. Con estos formatos se identifican y catalogan los datos o conjuntos de datos geográficos con que contará la SDP, para evitar la duplicación de esfuerzos en cuanto a la producción de información. Para referencia, el lector puede consultar la Norma Técnica Colombiana de Metadatos Geográficos - NTC 4611.

Esta información fue entregada en medio magnético al momento de presentación de este informe.

Ver Subproducto H. Archivos digitales con el Modelo de Bogotá y 17 municipios calibrado.

Esto incluye:

- I. Capas de usos de suelo del área de estudio.
- II. Archivos de modelación y escenarios en el programa Metronamica.
- III. Imágenes satelitales procesadas.

ANEXO IV – CUADRO MAESTRO DE INDICADORES

Ver Subproducto C. Resultados Obtenidos

ANEXO V – DOCUMENTACIÓN METRONAMICA