

"IDENTIFICACIÓN DE ÁREAS VULNERABLES A INCENDIOS FORESTALES APLICANDO UN MODELO DE PROBABILIDAD Y SU SUBSECUENTE PREDICCIÓN POTENCIAL CON LA METODOLOGÍA DE AUTÓMATAS CELULARES EN EL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO"

Oswaldo Padilla Almeida¹; Theofilos Toulkeridis²; John Henry Aguilar Albán³; Raúl David Suárez Villacrés⁴
ovpadilla@espe.edu.ec¹; ttoulkeridis@espe.edu.ec²; henrysamael89@hotmail.com³; rauls_12@hotmail.com⁴

CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE. DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN. ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO.
Av. El Progreso s/n, Sangolquí – Ecuador

RESÚMEN

El modelamiento espacial relacionado a la gestión de incendios forestales para el Distrito Metropolitano de Quito, permite su orientación a varias aplicaciones operativas planteadas en este estudio para: la predicción de incendios forestales (con el modelamiento mediante la información que incluye variables que fueron organizadas como: bióticas, físicas, meteorológicas y antrópicas; para la generación del modelo de predicción y probabilidad de incendios forestales con la técnica de Autómatas Celulares), detección de incendios (para el emplazamiento de puntos de observación considerando áreas con gran visibilidad desde las que se cubra la mayor parte del terreno mediante la generación de cuencas visuales y el conocimiento de cuáles son las áreas de mayor peligro de incendios forestales), extinción de incendios (mediante la identificación de lugares óptimos para la colocación de infraestructura de almacenamiento de agua para la mitigación de incendios forestales utilizando la Evaluación Multicriterio) y la evaluación de los incendios (con la identificación de áreas de concentración de focos de incendio).

Palabras clave: autómatas celulares, cuencas visuales, focos de incendio, incendios forestales, reservorios de agua

SUMMARY

The spatial modeling related to forest fire management for the Metropolitan District of Quito, allows multiple applications operating orientation raised in this study: forest fire prediction (with information modeling by including variables that were organized as: biotic, physical, meteorological and anthropogenic, to generate the prediction model and likelihood of forest fires cellular automata technique), fire detection (for the location of observation points considering areas with high visibility from which will cover most of the field by generating viewshed and knowledge of what are the areas of greatest risk of forest fires), fire suppression (by identifying optimal locations for placement of water storage infrastructure for wildfire mitigation using multicriteria evaluation) and assessment of fires (with the identification of areas of concentration of wildfire hotspots).

Keywords: cellular automata, viewshed, wildfire hotspots, wildfires, water reservoirs

1. INTRODUCCIÓN

Existen ciertos ecosistemas forestales que dependen del fuego para su regeneración, mientras que los más vulnerables pueden quedar devastados por los incendios; los cuales no solamente afectan las funciones y servicios de los bosques, sino también a bienes materiales e incluso a vidas humanas y sus medios de vida.

Según estimaciones de la FAO (2010), anualmente se ven afectadas 350 millones de hectáreas de bosque por los incendios forestales, el 95% de ellos a causa de la actividad humana; constituyéndose menos del 10% de todas las ocurrencias como quemas controladas, mientras que las demás se denominan incendios forestales, los mismos que en promedio, afectan al 1% de todo el bosque mundial cada año.

En el Distrito Metropolitano de Quito (DMQ), entre los meses de junio y septiembre del año 2012, se registraron 2.565 incendios forestales, que quemaron 3.796 hectáreas. De acuerdo a un análisis realizado por el Área de Estudios e Investigaciones Climáticas del INAMHI sobre el comportamiento de las precipitaciones entre el 2009 y 2012 (años caracterizados por su déficit de lluvias), durante junio, julio, agosto y septiembre (meses críticos por la ausencia de lluvias), con los monitoreos de las estaciones Iñaquito (norte) y La Tola (Tumbaco), determinó que en los últimos años el estado del tiempo ha sido muy irregular, por lo que la ciudad tuvo un periodo seco bastante intenso el cual fue un factor determinante para los incendios forestales (El Comercio (a), 2012).

Debido al gran número de incendios forestales ocurridos en el DMQ durante la época seca del año 2009 y 2012, se ha considerado la realización de aplicaciones operativas encaminadas a la gestión de incendios forestales relacionadas a su predicción (simulación y probabilidad de ocurrencia de incendios mediante la técnica de Autómatas Celulares), detección (emplazamiento de puntos de observación para la detección de incendios forestales), extinción (colocación de infraestructura de almacenamiento de agua para la mitigación de incendios forestales) y evaluación (identificación de áreas de concentración de focos de incendio). Todo esto con la incorporación de los componentes espacial y temático de los datos en un mismo proceso, mediante las operaciones que presenta un Sistema de Información Geográfica (SIG) y su posterior integración en procesos más complejos a través del modelamiento espacial.

2. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El Distrito Metropolitano de Quito (DMQ) tiene una superficie aproximada de 423.000 Ha, posee 32 parroquias urbanas y 33 rurales. En el sector urbano predomina la economía basada en el comercio, industria y servicios; mientras que en el sector rural destaca la agricultura, agroindustria y ganadería (MDMQ - Secretaría de Ambiente (a), 2011).

Altitudinalmente se encuentra desde los 500m en el noroccidente, hasta aproximadamente los 4.100m en la cordillera oriental y 4.800m de altitud en la cordillera occidental (Museo Ecuatoriano de Ciencias Naturales (MECN), 2009). La vegetación natural en el DMQ cubre el 72,3% del total de su territorio con 306.705 Ha, las áreas cultivadas corresponden al 20,54% con 87.112 Ha y las áreas artificiales que representan el 5,83% ocupan 24.732 Ha (MDMQ - Secretaría de Ambiente (b), 2011)

3. UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El estudio comprende el Distrito Metropolitano de Quito, perteneciente a la Provincia de Pichincha, Ecuador (*ver Figura 1*).

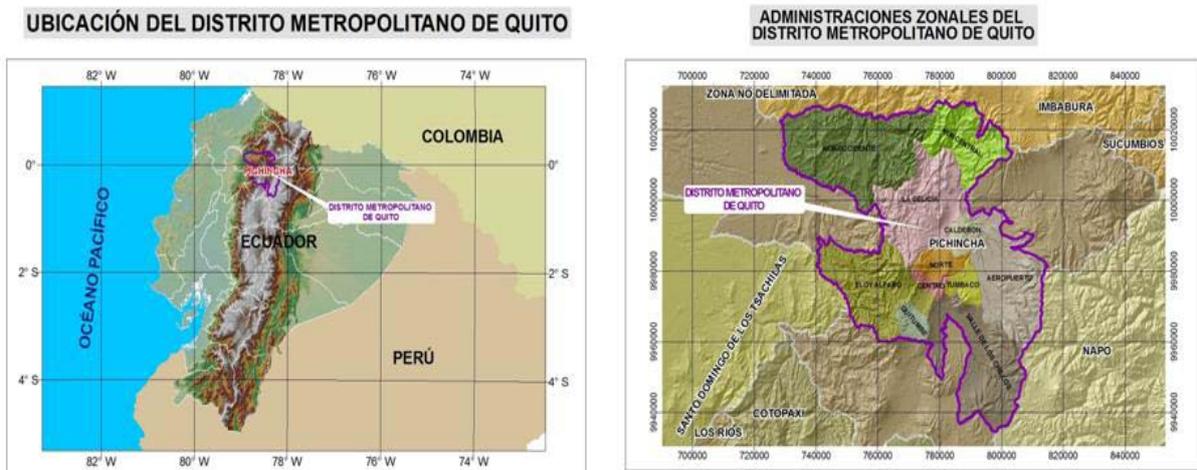


Figura 1: Ubicación del Distrito Metropolitano de Quito

Fuente: INEC (2013)

4. DEFINICIÓN DE VARIABLES

Para el desarrollo de los objetivos propuestos en el estudio, se incluyeron una serie de variables que fueron organizadas como: bióticas, físicas, meteorológicas y antrópicas; las cuales cambian de manera gradual con el paso del tiempo o lo hacen a muy largo plazo (áreas artificiales y cultivadas, cobertura vegetal, índice de combustibilidad, orientación y pendiente del terreno) y otras que lo hacen de manera rápida en un breve período de tiempo (focos de incendio, humedad relativa, precipitación y temperatura) (Chuvieco & Martín, 2004).

5. MODELAMIENTO ESPECIAL DE VARIABLES

Con de la integración de los componentes espacial y temático de los datos en un mismo proceso mediante un conjunto de operaciones que presentan un SIG, es posible generar nuevos datos a partir de los originales, pudiendo ser integrados en procesos más largos a través de modelos espaciales (Gómez & Barredo, 2005). Estos modelos están relacionados a la gestión de incendios forestales (Chuvieco & Martín, 2004), ya que permiten su orientación a varias aplicaciones operativas planteadas en este estudio como:

- **Predicción de incendios:** Modelamiento mediante la información que incluye variables que fueron organizadas como: bióticas, físicas, meteorológicas y antrópicas; para la generación del modelo de predicción y probabilidad de incendios forestales con la técnica de Automatas Celulares.
- **Detección de incendios:** Emplazamiento de puntos de observación considerando áreas con gran visibilidad desde las que se cubra la mayor parte del terreno mediante la generación de cuencas visuales y el conocimiento de cuáles son las áreas de mayor peligro de incendios forestales.
- **Extinción de incendios:** Identificación de lugares óptimos para la colocación de infraestructura de almacenamiento de agua para la mitigación de incendios forestales.

- **Evaluación de los incendios:** Identificación de áreas de concentración de focos de incendio.

5.1 Focos de incendios forestales

A través del sistema *Queimadas* del INPE¹, se recopiló información de 501 focos de incendio (ver *Tabla 1*), representados como puntos en el DMQ y su área de influencia, desde el 1 de enero de 2000 al 31 de diciembre de 2012. A continuación, fueron seleccionados los focos de incendio de los meses de agosto, septiembre, octubre y noviembre, correspondientes a la época seca de la región Sierra.

Tabla 1: Número de focos de incendio en el DMQ por año desde el 2000 al 2012

Año	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	TOTAL
TOTAL _{total}	4	105	43	18	30	38	10	8	2	134	4	7	98	501

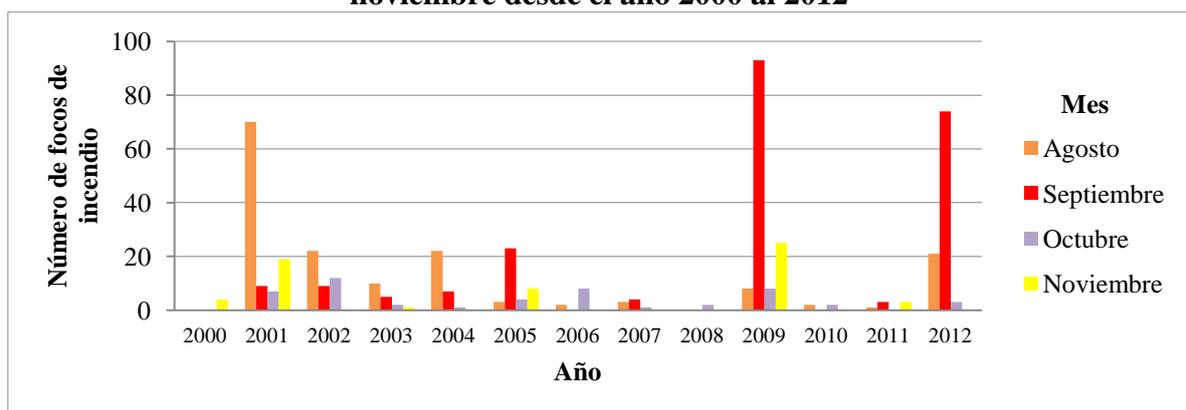
Fuente: INPE (2013)

5.2 Identificación de áreas de concentración de focos de incendio

Mediante la herramienta *Density Kernel* de *ArcGIS 9.3*, que calcula la densidad de las entidades de punto o línea dentro de una vecindad alrededor de cada celda de *raster* de salida, se establecieron superficies de densidad suavemente estrechadas a cada punto en base a la distribución espacial de los 501 focos de incendio para conocer y establecer sus sitios de concentración.

En el Cuadro 1, se observa que los años 2001, 2009 y 2012 durante los meses de agosto, septiembre, octubre y noviembre, fueron registrados mayor cantidad de focos de incendio en el DMQ.

Cuadro 1: Focos de incendio en el DMQ de los meses de agosto, septiembre, octubre y noviembre desde el año 2000 al 2012



Fuente: INPE (2013)

¹ INPE: Instituto Nacional de Investigaciones Espaciales, 2013. Los incendios de supervisión del portal y el fuego. Disponible en <http://www.inpe.br/queimadas>

A los focos de incendio representados como puntos se aplicaron áreas de búsqueda circular de 500, 750, 1.000, 1.500, 2.000 y 3.000m; siendo el radio de búsqueda de 2.000m el que mejor produjo un *raster* de densidad más generalizado y suave.

Se obtuvo una cobertura *raster* de densidad *kernel* con un valor máximo de 1,510 el cual fue normalizado al valor máximo de 1 y mínimo de 0.

Finalmente, el *raster* normalizado resultante, fue reclasificado para determinar zonas de concentración en una escala espacio – temporal (ver *Tabla 2*), en la cual se tomó en cuenta el análisis espacial de densidad y la frecuencia de los focos de incendio (ver *Figura 2*).

Tabla 2: Concentración de focos de incendio en el DMQ desde el 1 de enero de 2000 al 31 de diciembre de 2012

Reclasificación de valores de densidad	Concentración
0,50 – 1,00	Alta
0,30 – 0,50	Media
0,20 – 0,30	Baja

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

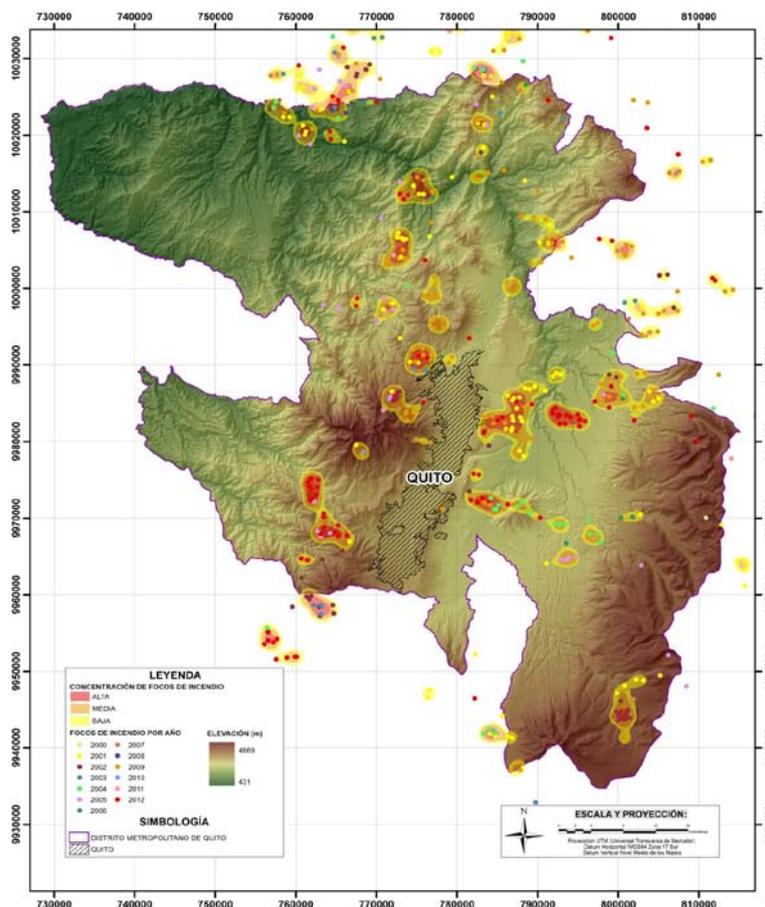


Figura 2: Concentración de focos de incendio en el DMQ desde el 1 de enero de 2000 al 31 de diciembre de 2012

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

5.3 Ubicación de puntos de observación y generación de cuencas visuales para incendios forestales

Para conocer cuán visibles pueden ser los objetos resultan útiles las herramientas de análisis de cuenca visual. Una cuenca visual permite identificar las celdas de un *raster* de entrada, posibles de visualizar desde una o más ubicaciones de observación.

Se considera para el estudio, el uso de la herramienta *Observer Points* de *ArcGIS 9.3*, que genera un *raster* de cuenca visual de salida, con el cual se identifica qué puntos de observador son visibles desde cada ubicación de superficie *raster*.

Fueron procesados los centroides de los cuadrantes de 5 x 5km generados sobre el DMQ, los mismos que representan a los puntos de observación. A este *feature class* de puntos se especificaron restricciones de observación para el control del análisis de visibilidad, las cuales se señalan a continuación (ver *Tabla 3*):

Tabla 3: Restricciones de observación para el control del análisis de visibilidad

Parámetro de restricción	Configuración usada
SPOT	Herramienta <i>Extract Values to Points</i> del MDE de 5m de resolución a los centroides
OFFSETA	25m
OFFSETB	5m
AZIMUTH1	0°
AZIMUTH2	360°
VERT1	90°
VERT2	-90°
RADIUS1	0m
RADIUS2	10.000m

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

Fueron establecidas relaciones espaciales de unión y proximidad. La primera, para asociar el punto de observación con su polígono de visibilidad; y la segunda, los puntos de observación con la infraestructura vial y la concentración de focos de incendio, considerándose para ello la proximidad.

Se determinaron 83 puntos de observación para la detección de incendios forestales distribuidos en el DMQ (ver *Figura 3*), que su implantación fue tipificada según su área de cobertura basada en las zonas denominadas como críticas de acuerdo a la concentración de focos de incendio.

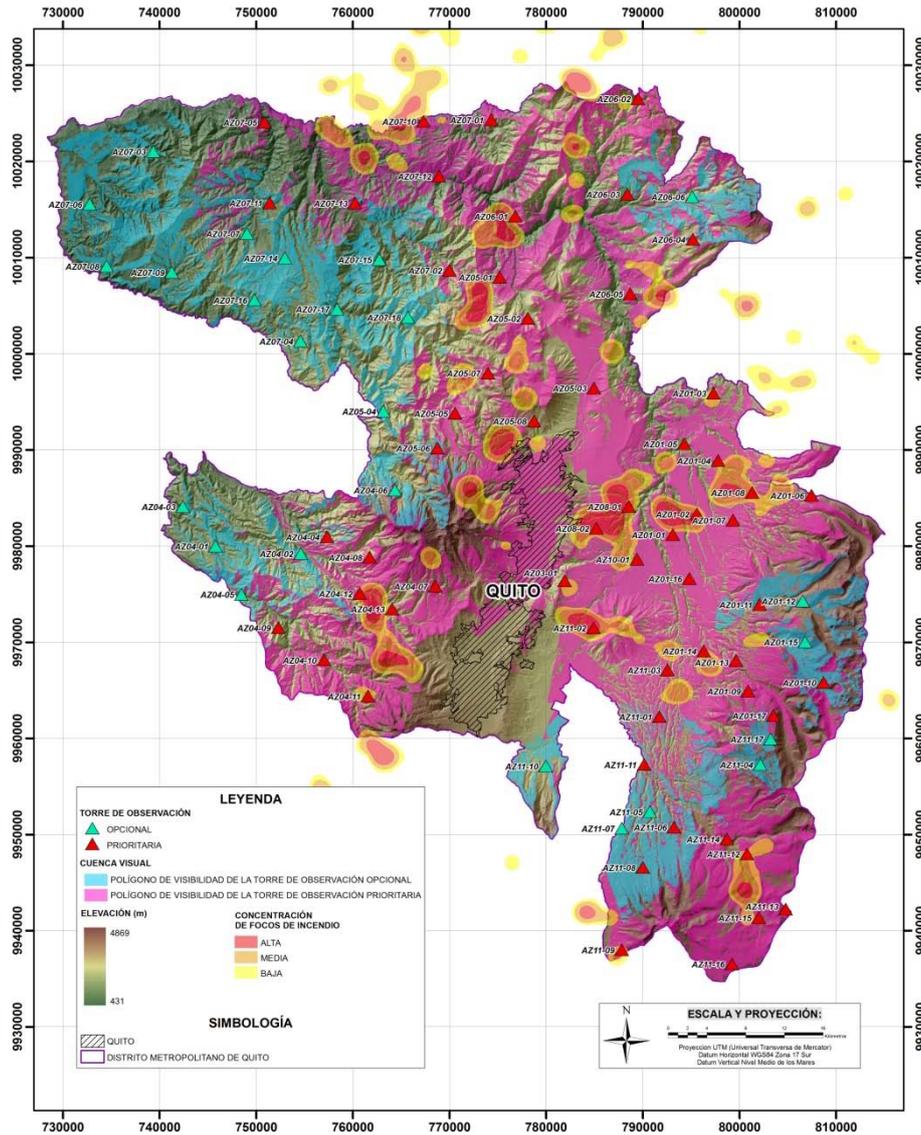


Figura 3: Distribución de los puntos de observación para incendios forestales con sus cuencas visuales

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

5.4 Evaluación multicriterio para la identificación lugares óptimos para la colocación de infraestructura de almacenamiento de agua para la mitigación de incendios forestales

Mediante la técnica de evaluación multicriterio en base al objetivo planteado de identificación de lugares óptimos para la colocación de infraestructura de almacenamiento de agua para la mitigación de incendios forestales, se definieron criterios (variables) que se encuentran asociados a entidades geográficas (factores), que inciden en la actividad a evaluar. A partir de la integración de los criterios en forma de capas temáticas en la regla de decisión, se obtuvo un modelo de acuerdo al objetivo; en dicho modelo cada criterio recibe un valor proveniente de un índice que establece de mayor a menor la ponderación respecto a su objetivo, para lo cual se empleó la escala de Saaty (1997).

En la evaluación se utilizó el Proceso Analítico Jerárquico (APH), con el fin de realizar comparaciones biunívocas (comparaciones entre pares) de los criterios con respecto al objetivo principal. Para esto, el modelo emplea una tabla denominada escala Saaty, con la

cual se realizó la comparación subjetiva biunívoca para la asignación de juicios de valor y con ello obtener sus pesos (*ver Tabla 4*).

Tabla 4: Criterios y pesos obtenidos con el modelo APH

Criterio	Peso
Distancia a redes de distribución de agua	1,688
Cobertura vegetal	0,965
Distancia a concentración de focos de incendio	1,206
Distancia a facilidades de almacenamiento y distribución de agua	1,929
Distancia a infraestructura industrial y de comunicación	0,482
Pendiente del terreno	2,17
Distancia a cuerpos de agua	1,447
Distancia a áreas artificiales	0,241
Distancia a vías	0,723

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

Para conocer la coherencia del modelo, se determinó la relación de consistencia (CR), dando como resultado cero, con lo cual los juicios de valor se consideran adecuados; esto al señalar que el índice anteriormente mencionado debe ser inferior a 0,10.

Posteriormente, con la Sumatoria Lineal Ponderada se estructuró la regla de decisión tomando en consideración los criterios favorables y limitantes; el primero que suma y el otro resta dentro de la ecuación.

Sumada la ecuación, se obtuvo un valor máximo de 1,489 y un valor mínimo de 1,206; los mismo que fueron normalizados a valores entre 1 y 0.

Luego, se seleccionaron valores mayores a 0,95 puesto que se generan áreas más ajustadas de acuerdo a los criterios tomados en cuenta para la evaluación, los mismos que generaron un área de ha.

Por último, las áreas con valores superiores a lo indicado anteriormente se intersecaron con la cobertura de las denominadas áreas protegidas del DMQ resultando un área de ha (*ver Figura 4*).

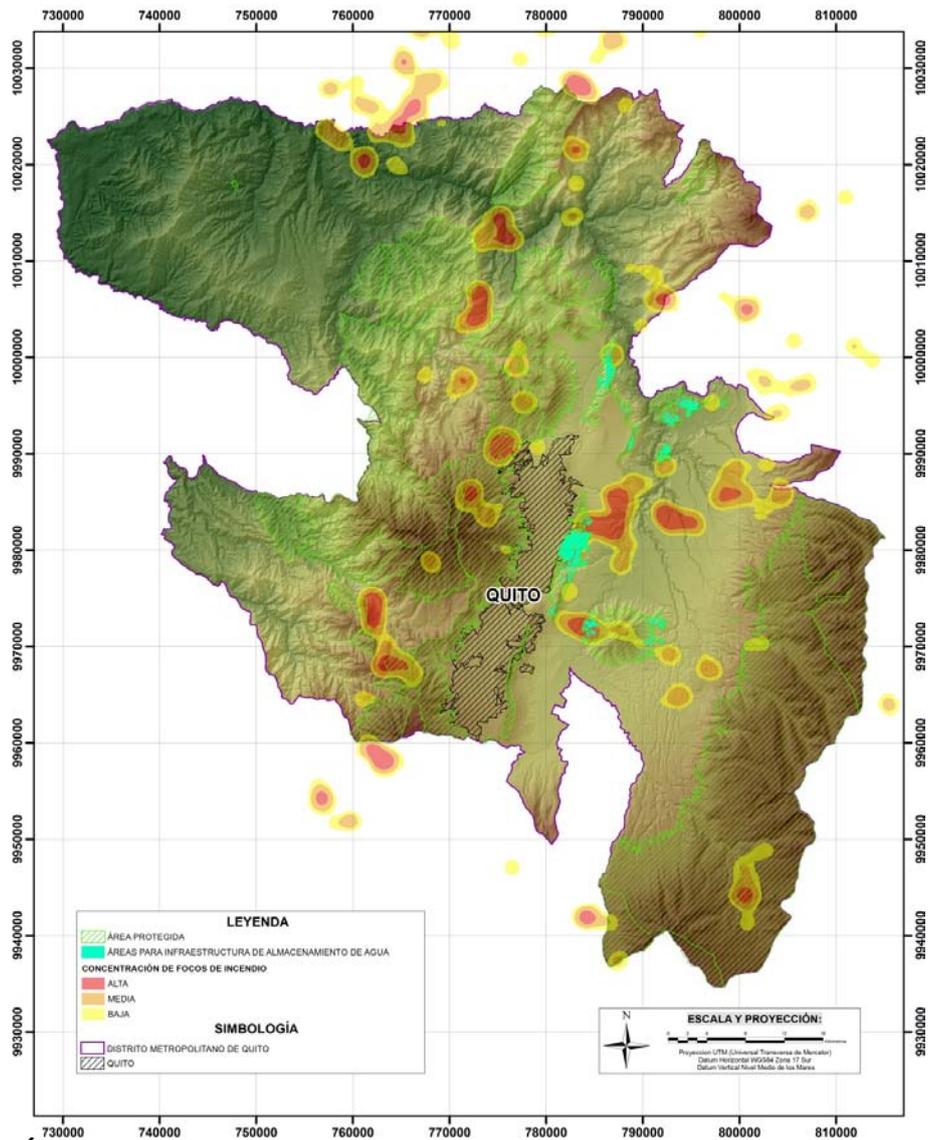


Figura 4: Áreas óptimas para la colocación de infraestructura de almacenamiento de agua para la mitigación de incendios forestales
 Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

5.5 Generación del modelo de predicción y probabilidad de incendios forestales con la metodología de autómatas celulares

a. Los Autómatas Celulares como técnica de simulación para incendios forestales

Para la representación del comportamiento y propagación del fuego, se han diseñado distintos modelos y técnicas que difieren unos de otros ya que las condiciones donde se desarrolla el fuego son distintas y su comportamiento es diverso.

Los modelos de comportamiento del fuego utilizan datos específicos del sitio donde se desarrolla el fuego. Estos modelos que predicen la propagación del fuego son: estadístico, físico, físico – estadístico y probabilístico.

Los simuladores utilizan, a más de un modelo para el comportamiento del fuego, técnicas de simulación que permiten la representación de la propagación del fuego en el terreno, entre

las cuales se encuentran: *bond percolation*, propagación elíptica y Autómatas Celulares; poniendo mayor énfasis a ésta última por ser empleada para el presente estudio.

La técnica de Autómatas Celulares representa el terreno como una malla de celdas, donde cada una de ellas contiene valores (*ver Figura 5*); cada celda presenta un estado inicial y un conjunto de reglas aplicadas para todas ellas (Denham, 2009). Los Autómatas Celulares fueron desarrollados por Jonh Von Neumann como herramienta para la investigación de los sistemas autorreproductivos; actualmente son usados en el modelamiento y simulación de fenómenos urbanos (Aguilera, Carrillo, & Grageda, 2001).

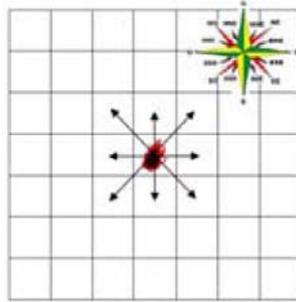


Figura 5: Propagación del fuego mediante Autómatas Celulares
Fuente: Denham (2009)

Un Autómata Celular (AC) constituye un modelo matemático para un sistema dinámico, que se encuentra compuesto por un conjunto de celdas ordenadas en fila, en forma de matriz o en tres dimensiones; las cuales actualizan su estado o valor a partir del estado previo de cada celda y de sus vecinas en un determinado periodo de tiempo. La regla que rige el cambio de un estado a otro del conjunto de celdas, se establece según una expresión matemática conocida como regla de transición local; esta regla determina que la transición sea la misma para todas las celdas y es una función de los estados de las celdas vecinas. Los estados varían de un momento a otro en unidades de tiempo discreto, las cuales son posibles de cuantificar con valores enteros a intervalos regulares (León & Basurto, 2008; López, 2011; Paredo & Ramallo, 2003; Reyes, 2011).

b. Descripción del software para el modelamiento

DINAMICA EGO² constituye una herramienta de modelación para el diseño de modelos espaciales estáticos y modelos dinámicos, que involucran: aproximaciones multi – regionales, complejos algoritmos para el análisis y simulación de fenómenos espacio – temporales, iteraciones anidadas, manipulación y combinación algebraica de datos en distintos formatos (constantes, mapas, matrices y tablas), procesos de decisión para bifurcar y juntar flujos de ejecución y retroalimentaciones dinámicas. Todo esto almacenado en un lenguaje *script* en formato XML o en el lenguaje de programación de EGO (Soares, Rodrigues, & Costa, 2009).

² DINAMICA EGO: Software de modelación para el diseño de modelos espaciales estáticos y modelos dinámicos. El término EGO hace referencia al concepto de *Environment for Geoprocessing Objects* (es español entorno para objetos de geoprocésamiento).

c. Desarrollo del modelamiento por Autómatas Celulares para incendios forestales

La utilización del software DINAMICA EGO, para el desarrollo del modelamiento por Autómatas Celulares presenta varias ventajas. Además de ser un software libre, muestra un análisis minucioso sirviéndose de pruebas estadísticas para demostrar la hipótesis planteada que en este estudio, consiste en averiguar escenarios dónde se puedan mostrar y ubicar focos de incendio para el 2013, tomando en cuenta las variables de influencia empleadas a partir de un estudio previo (ver Figura 6).

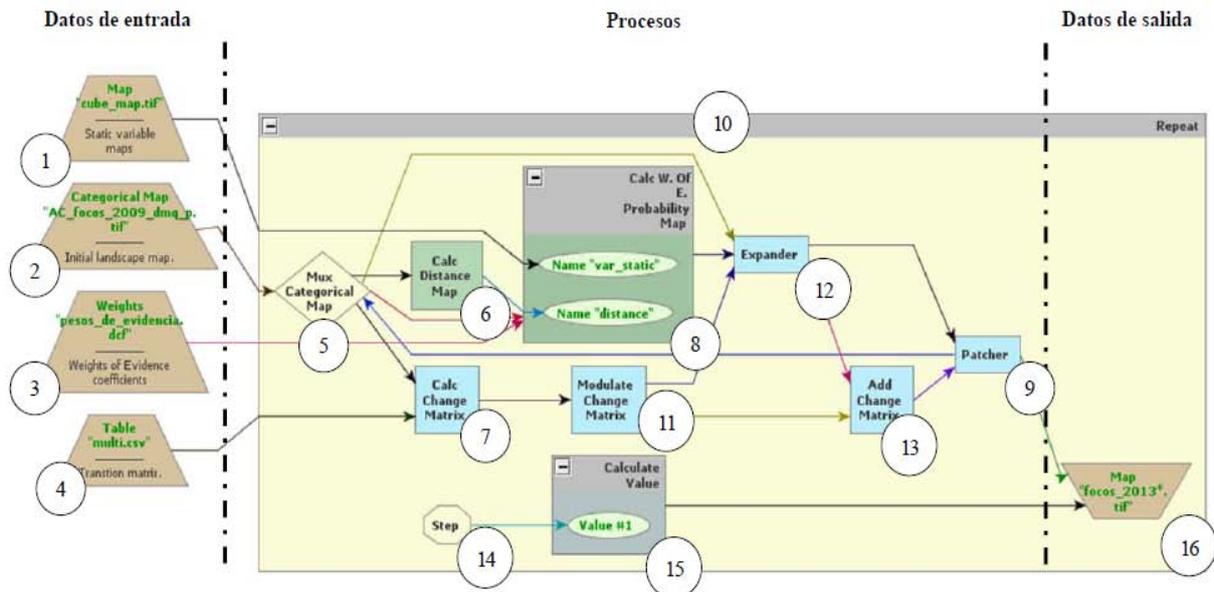


Figura 6: Estructura de modelo de probabilidad y simulación diseñado en DINAMICA EGO

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

Es necesario establecer la independencia entre las variables estáticas y dinámicas, ya que si una variable estática muestra relación con la variable dinámica, se puede enmascarar u ocultar el desenvolvimiento natural de la variable en el modelamiento, siendo en el caso presente la variable focos de incendio. Es así que el aplicar pruebas pareadas, da una mayor validez a las deducciones obtenidas para el control o eliminación de variables sospechosas en el estudio actual (ver Figura 7).

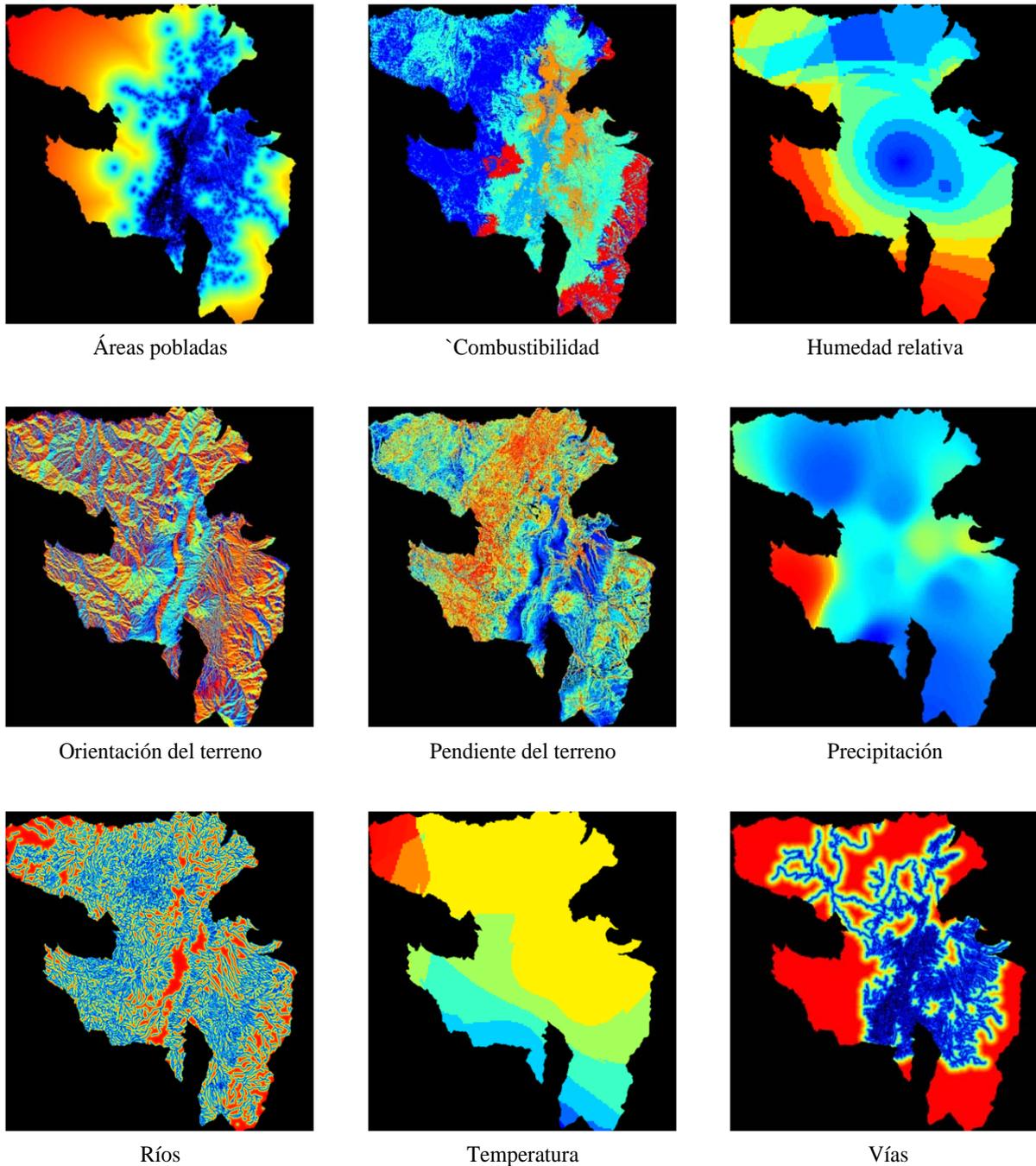


Figura 7: Variables estáticas dentro del Cubo *Raster* visto desde el *Map View* de DINAMICA EGO

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

Las variables que mayor influencia ejercen para el modelo de probabilidad y simulación de incendios forestales son: áreas pobladas, pendiente y orientación del terreno, ríos y vías; mientras que las variables meteorológicas (humedad relativa, precipitación y temperatura) y combustibilidad que tienden a cero, no aportarán significativamente al modelamiento, sin embargo no fueron descartadas.

Al tener validadas las variables con las que se va a trabajar, se procede a utilizar herramientas propias del software, cuya finalidad es crear un modelo de ajuste por medio de épocas ya dadas, en este caso se utilizó los focos de incendio del año 2001 y el 2009, a fin de alcanzar un ajuste óptimo para la simulación de incendios para el 2013 (ver Figura 8).

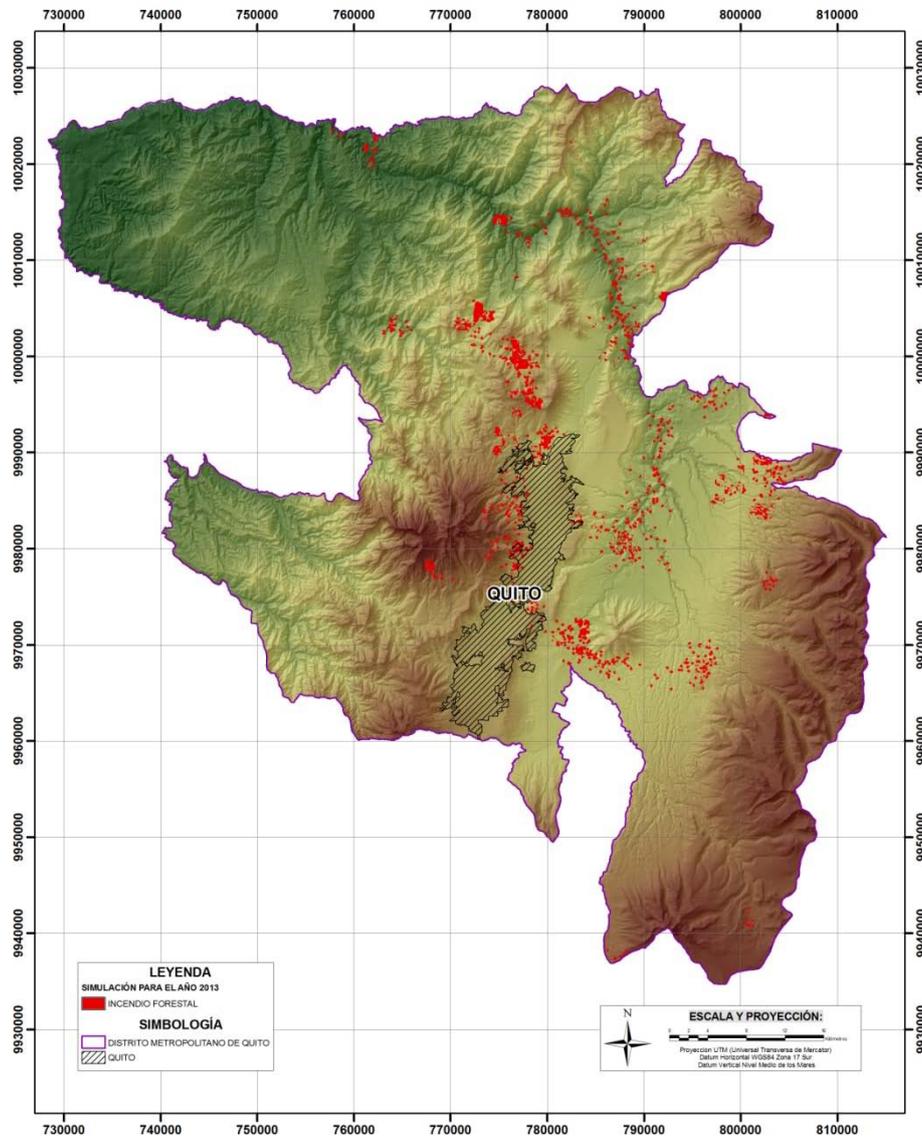


Figura 8: Simulación de incendios forestales para el año 2013

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

Las áreas de color rojo representan zonas con una alta probabilidad para la generación de un incendio forestal en el DMQ (ver Figura 9).

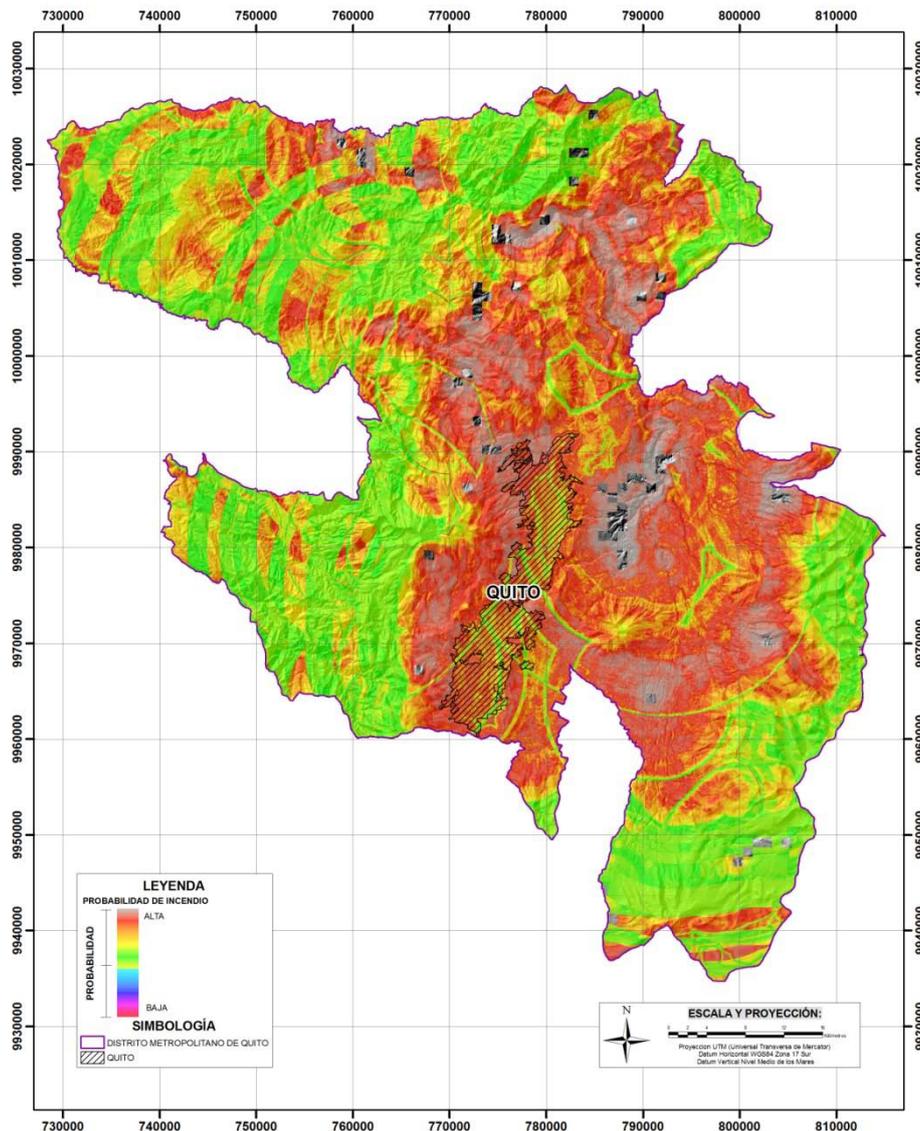


Figura 9: Probabilidad de incendios forestales para el año 2013

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

6. CONCLUSIONES

• Concentración de focos de incendio

- Los focos de incendio seleccionados desde el año 2000 al 2012 durante los meses de agosto, septiembre, octubre y noviembre fueron únicamente 501 para el DMQ y su área de influencia, recopilados por los satélites polares que presentan una resolución espacial de 1km.
- Mediante el análisis e interpretación de imágenes satelitales, se descartaron los focos de incendio localizados en zonas edificadas, principalmente en el área consolidada de la ciudad de Quito. Mientras que los ubicados en zonas de cultivo, algunos fueron tomados en cuenta y otros no, por su cercanía a zonas edificadas o encontrarse en zonas de invernaderos o sus inmediaciones.
- Agosto y septiembre con 164 y 227 focos respectivamente, son los meses que presentan mayor número de incendios desde el año 2000 al 2012.
- El 2001, 2009 y 2012 (con 105, 134 y 98 focos respectivamente), son los años que históricamente mayor número de incendios forestales han sido registrados.

- De acuerdo a la distribución espacial de los focos de incendio dentro del DMQ, 264 de ellos se ubican en las parroquias rurales y 39 en las urbanas, siendo las parroquias rurales de: Calacalí, Lloa, San José de Minas y Pintag con 38, 29, 28 y 24 focos de incendio respectivamente, las que mayor número de ellos se encuentran en sus territorios; además de encontrarse entre las parroquias con mayor presencia de cobertura de vegetación natural y áreas seminaturales.
- Para establecer las áreas de concentración de focos de incendio, el radio de búsqueda circular de 2.000m produjo una cobertura *raster* de densidad *kernel* más generalizado y suave, con un valor máximo de 1,510 el cual fue normalizado al valor máximo de 1 y mínimo de 0.
- Las áreas de concentración a partir de los valores normalizados, fueron: baja (0 – 0,3), media (0,3 – 0,5) y alta (0,5 – 1). Siendo el valor de superficie de densidad más alto en la ubicación del punto y disminuye conforme aumenta la distancia desde el punto llegando a cero.
- Las áreas de concentración de focos de incendio alta y media corresponden a los relieves de montaña del cerro Catequilla, Cruz Loma, Ilaló, volcanes Atacazo, Casitahua y Pichincha; además las inmediaciones de zonas pobladas como Calacalí, Checa, Cumbayá, Iguiñaro, El Naranjal, Guangopolo, Pimaya, Zámbriza y Nayón.

- **Puntos de observación y cuencas visuales para incendios forestales**

- Se determinaron 83 puntos de observación para la detección de incendios forestales, 58 de ellos establecidos como prioritarios y 25 opcionales; los primeros incluyen en sus polígonos de visibilidad áreas de concentración de focos de incendio catalogadas como alta y media; mientras que los otros intersecan con áreas de concentración catalogadas como bajas, y conjuntamente con los prioritarios tratar de cubrir la parte del DMQ.
- Las cuencas visuales generadas a partir de los puntos de observación cubren un área de 225.557,202 Ha, constituyendo el 53,30% del área total del DMQ que es de 423.157,745 Ha.

- **Lugares óptimos para la colocación de infraestructura de almacenamiento de agua para la mitigación de incendios forestales**

- Mediante la técnica de Evaluación Multicriterio y la utilización del Proceso Analítico Jerárquico (APH), se definieron criterios (variables) que se encuentran asociados a entidades geográficas (factores); todo esto, respecto a la identificación de lugares óptimos para la colocación de infraestructura de almacenamiento de agua para la mitigación de incendios forestales. Obteniéndose mediante el empleo de la escala Saaty, como criterio dominante, la distancia a redes de distribución de agua con un peso de 1,668; mientras que el criterio menos influyente con un peso de 0,241 fue la distancia a áreas artificiales.
- La relación de consistencia obtenida en el modelo fue de cero, razón por la cual se lo considera coherente, al igual que los juicios de valor empleados en para su diseño.
- Con los criterios denominados como favorables y limitantes, considerandos para la estructuración de la regla de decisión mediante la Sumatoria Lineal Ponderada, se obtuvo un valor máximo de 1,489 y un valor mínimo de 1,206; los mismos que fueron normalizados a valores entre 1 y 0, para finalmente establecer como áreas óptimas las que presenten valores mayores a 0,95 que se encuentren dentro de las denominadas áreas protegidas del DMQ.

- **Predicción y probabilidad de incendios forestales con la metodología de Autómatas Celulares**

- La utilización del software DINAMICA EGO para el desarrollo del modelamiento por Autómatas Celulares presenta varias ventajas, además de ser un software libre, muestra un análisis minucioso sirviéndose de pruebas estadísticas para demostrar la hipótesis planteada que en el caso presente, es averiguar escenarios donde se puedan mostrar y ubicar focos de incendio para el 2013, teniendo en cuenta las variables de influencia escogidas por los investigadores a partir de un estudio previo.
- Para las variables estáticas y dinámicas, se trató de establecer su independencia, ya que si una variable estática muestra relación con la variable dinámica, se puede enmascarar u ocultar el desenvolvimiento natural de la variable en el modelamiento, siendo en el caso presente la variable focos de incendio.
- Las pruebas pareadas permitieron una mayor validez a las deducciones obtenidas para el control o eliminación de variables sospechosas en este estudio.
- Con la validación de las variables empleadas y la utilización de herramientas de DINAMICA EGO, se diseñó un modelo de ajuste por medio de épocas ya dadas; para ello en este estudio, fueron empleados los focos de incendio del año 2001 y 2009, a fin de alcanzar un ajuste óptimo para la simulación de incendios para el 2013.
- El modelo de Autómatas Celulares indicó que en el año 2013 existirá un aumento en la ocurrencia de focos de incendio en el DMQ, cerca a los centros poblados y vías, determinando que la presencia de incendios forestales dentro del área de estudio son por causas antrópicas.
- Se obtuvo un ajuste del 46.57% en modelo de predicción y simulación de incendios forestales para el año 2013 con la técnica de Autómatas Celulares en el DMQ.
- El modelo de Autómatas Celulares indicó que en el año 2013 existirá un aumento en la ocurrencia de focos de incendio, esto se debe principalmente por causas antrópicas y el desarrollo urbanístico continuo del Distrito Metropolitano de Quito, también se tiene presente que las condiciones geomorfología del terreno como es la irregularidad del terreno o pendiente es de gran ayuda para la presencia de focos iniciales.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilera, A., Carrillo, C., & Grageda, G. (2001). Autómatas Celulares para modelar usos de suelo urbano: una revisión del modelo de White. *Vetas*, 85-87.
- Chuvieco, E., & Martín, M. d. (2004). *Nuevas tecnologías para la estimación del riesgo de incendios forestales*. Madrid: Bouncopy S.A.
- Denham, M. (2009). *Predicción de la evolución de los incendios forestales guiada dinámicamente por los datos*. Tesis doctoral, Universitat Autònoma de Barcelona, Escola d'Arquitectura de Computadors i Sistemes Operatius, Barcelona.
- El Comercio (a). (2 de Octubre de 2012). *El verano fue más seco que el del 2009*. (R. Quito, Ed.) Recuperado el 10 de Enero de 2013, de El Comercio: http://www.elcomerciodelecuador.es/quito/verano-seco_0_784121722.html
- FAO. (2010). *Evaluación de los recursos forestales mundiales 2010*. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- Gómez, M., & Barredo, J. (2005). *Sistemas de Información Geográfica y Evaluación Multicriterio*. Madrid: Alfaomega.
- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciales (INPE). (2013). *Monitoreo de quemas e incendios*. Recuperado el 6 de Enero de 2013, de Preguntas frecuentes: Queimadas: <http://peassaba.cptec.inpe.br/queimadas/qmanova/faq.php>

- León, P., & Basurto, R. (24 de Agosto de 2008). *Introducción a los sistemas dinámicos y autómatas celulares*. Recuperado el 10 de Mayo de 2013, de http://uncomp.uwe.ac.uk/genaro/Papers/Veranos_McIntosh_files/SD.pdf
- López, A. (26 de Agosto de 2011). *Introducción a la vida artificial y autómatas celulares*. Recuperado el 10 de Mayo de 2013, de http://uncomp.uwe.ac.uk/genaro/Papers/Veranos_McIntosh_files/vida_artificial_Miriam.pdf
- MDMQ - Secretaría de Ambiente (a). (2011). *Agenda Ambiental de Quito 2011 - 2016*. Quito: Oleas Grafic.
- MDMQ - Secretaría de Ambiente (b). (2011). *Memoria Técnica del Mapa de Cobertura Vegetal del Distrito Metropolitano de Quito (DMQ)*. Quito: Manthra Editores.
- Museo Ecuatoriano de Ciencias Naturales (MECN). (2009). *Ecosistemas del Distrito Metropolitano de Quito*. Quito: Nuevo Arte.
- Peredo, M., & Ramallo, R. (Diciembre de 2003). *Aplicación de autómatas celulares a simulación básica de incendios forestales (Tesis de Maestría)*. Universidad Católica Boliviana San Pablo, Cochabamba.
- Reyes Gómez, D. (2011). *Descripción y aplicaciones de los autómatas celulares*. Tesis para obtener la licenciatura en Matemáticas Aplicadas y Computación, Universidad Autónoma de Puebla, Departamento de Aplicación de Microcomputadoras, Puebla.
- Saaty, T. (1997). *Toma de decisiones para líderes: el proceso analítico jerárquico, la toma de decisiones en un mundo complejo* (Vol. II). (M. Escudey, E. Martínez, & L. Vargas, Trads.) Rws Publications.
- Soares, B., Rodrigues, H., & Costa, W. (2009). *Modelamiento de Dinámica Ambiental con Dinámica EGO*. Belo Horizonte: Centro de Sensoriamento Remoto/Universidade Federal de Minas Gerais.