

Capítulo II

Modelado de la difusión espacio-temporal de vectores sobre paisajes caracterizados a partir de información de sensores remotos

2.1 Introducción

2.1.1 Fundamentos de la Teledetección

La expresión “Percepción remota” (del inglés “Remote Sensing”), designa la técnica que permite el estudio de un objeto sin entrar en contacto directo con el mismo, basándose en la medición de radiación electromagnética reflejada, absorbida o transmitida por objetos en la superficie de la Tierra (Hay, 2000). Más específicamente, Chuvieco (1990) define la Teledetección como la tecnología que permite obtener imágenes de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas espaciales. Green et al. (2002) lo define como el único medio viable de proveer información a escala regional de variables climáticas y ambientales a intervalos de frecuencia regulares y en tiempo real de extensas áreas geográficas. En este sentido, las imágenes satelitales brindan la posibilidad de monitorear el ambiente, la distribución de los recursos naturales, la variación espacio-temporal del uso de la tierra, la evolución de inundaciones, sequías e incendios, reduciendo el trabajo de campo y brindando disponibilidad de datos con cierta frecuencia (Cigliano y Torrusio, 2003). Debido a que entre los factores principales que regulan la dinámica de las poblaciones de mosquitos se encuentran las variables meteorológicas y las características del paisaje, la información derivada de sensores remotos representa una herramienta para el

desarrollo de indicadores, modelos poblacionales de vectores/reservorios y mapas de riesgo (Mills y Childs, 1998).

Sobre las características de los sensores, algunos autores definen la resolución de un sistema sensor como su habilidad para discriminar información de detalle (Estes y Simonette, 1975), entendiendo como discriminación a la mayor o menor distinción o separación que puede apreciarse entre dos sucesos u objetos próximos en el espacio o en el tiempo (Real Academia Española, 2001). La elección de la resolución de los datos obtenidos por teledetección es crítico para la decisión del tipo y número de imágenes que concuerden con el propósito de la investigación. Para ello, hay que considerar los cuatro tipos de resoluciones característicos en teledetección (Chuvieco Salinero, 2002): 1) Resolución espectral: corresponde con el ancho de las longitudes de onda que los sensores son capaces de captar, es decir, describe la capacidad del sensor para discriminar entre leves diferencias en la energía de los cuerpos; 2) Resolución radiométrica: es la sensibilidad de los sensores a la magnitud de radiación electromagnética y es definida por el número de bits usados para recoger los datos. Por ejemplo, si el sensor usa 8 bits para almacenar los datos, se contará con 256 valores digitales (2^8 bits), o valores de grises, para medir la energía (a esto se denomina rango dinámico del sistema); 3) Resolución espacial: Refiere al tamaño del objeto más pequeño que sea posible detectar. Se define como el área en la superficie de la Tierra contenida en un píxel de la imagen. Un píxel (picture element) es la menor unidad de la que está compuesta una imagen, representada por una matriz de píxeles; 4) Resolución temporal o revisita: se refiere al período de tiempo transcurrido entre dos observaciones consecutivas de la misma área.

Desde los comienzos de las aplicaciones de la tecnología de la Teledetección o Sensado Remoto (SR, del inglés Remote Sensing), los estudios sobre las enfermedades transmitidas por vectores se han centrado en la identificación y cartografía de los hábitats del vector (Barnes y Cibula, 1979; Hayes et al., 1985), la evaluación de los factores ambientales relacionados con la biología de los vectores (Rogers y Randolph, 1993; Kitron, 1998) y al estudio de la epidemiología de las enfermedades (Linthicum et al., 1999; Murray, 2003). Wood et al. (1991) y Glass et al. (1992) investigaron la aplicación de los sensores remotos y técnicas de análisis espacial para identificar y mapear elementos del paisaje que en conjunto definen la dinámica de las poblaciones de los vectores y humana relacionadas con el riesgo de transmisión de enfermedades.

Dentro de la amplia variedad de información derivada de sensores remotos satelitales, existen indicadores relevantes para la cadena epidemiológica que, generalmente no son otra cosa que transformaciones de las imágenes realizadas a través algoritmos de bandas y que se aproximan en gran medida a las variables meteorológicas medidas “in situ” (Hay, 1996; Hay y Lennon, 1999). El cálculo de índices es una técnica de uso habitual en teledetección y son comúnmente utilizados para mejorar la discriminación entre cubiertas o elementos que presenten un comportamiento reflectivo muy distinto entre dos o más bandas, por ejemplo para realzar suelos y vegetación en el espectro visible e infrarrojo cercano, y para reducir el efecto del relieve (pendiente y orientación) en la caracterización espectral de distintas cubiertas (Chuvienco, 1996). Numerosos índices pueden ser obtenidos a partir de algoritmos aplicados sobre bandas originales de sensores, como por ejemplo los índices de Agua (Normalized Difference Water Index: NDWI), Suelo (Normalized Difference Soil Index: NDSI) y Vegetación (Normalized Difference Vegetation Index: NDVI) (Yamazaki et al., 2006), o los índices Tasseled Cap, indicadores de verdor, brillo y humedad, o de Temperatura de Superficie (Land Surface Temperature: LST) (Sobrino y Raissouni, 2000).

Para la identificación de masas vegetales, los cocientes o índices, se basan en el particular comportamiento radiométrico de la vegetación. Una masa vegetal en óptimas condiciones, es decir en buen estado sanitario, posee una firma espectral que se caracteriza por un claro contraste entre las bandas visibles, y en especial la banda que corresponde al rojo (0.6 a 0.7 μm) y el infrarrojo cercano (0.7 a 1.1 μm). Esto se da debido a que la mayor parte de la radiación solar recibida por la planta en el espectro del visible, es absorbida por los pigmentos de las hojas, mientras que éstos apenas afectan a la radiación recibida en el infrarrojo cercano, por lo que se presenta un alto contraste entre una baja reflectividad en el visible y una alta reflectividad en el infrarrojo cercano. Por lo tanto este comportamiento permite separar con relativa facilidad, la vegetación sana de otras cubiertas. En particular el Índice Normalizado de Vegetación (Jensen, 1986) o NDVI transforma datos multiespectrales en una única banda o imagen única, según el siguiente algoritmo:

$$\text{NDVI} = \frac{\text{Infrarrojo Cercano} - \text{Rojo}}{\text{Infrarrojo Cercano} + \text{Rojo}}$$

Para el sensor TM, del satélite Landsat 5:

$$\text{NDVI} = \frac{\text{Banda 4} - \text{Banda 3}}{\text{Banda 4} + \text{Banda 3}}$$

Los valores resultantes del NDVI, como para el resto de los índices normalizados, varían entre -1 y +1, siendo mayor el vigor vegetal presente en la zona observada o en cada píxel, cuanto mayor sea el resultado obtenido del NDVI, permitiendo entre otras aplicaciones la identificación de áreas forestadas-deforestadas, la evaluación del estado de la vegetación y su grado de estrés, la separación entre distintos tipos de masas vegetales, el monitoreo de plagas y la evaluación de riesgos de incendio (Chuvieco Salinero, 2002). A su vez, otros índices como los de Tasseled Cap (Crist y Cicone, 1984; Crist y Kauth, 1986) se obtienen por combinación lineal específica de bandas originales de imágenes Landsat 5TM, representando como imágenes monoespectrales (o en escala de grises) los índices "brillo del suelo", "de vegetación verde" y "tercer componente", relacionado con características del suelo que incluyen el estatus de humedad del mismo.

A su vez, el macroambiente puede ser considerado como paisaje, una superficie espacialmente heterogénea, representada por un conjunto de unidades homogéneas denominadas clases de cobertura, que pueden estar formadas por áreas naturales o intervenidas por el hombre, y entre los que se establecen relaciones espaciales y funcionales (Forman & Gordon, 1986). El tamaño, forma, tipo, heterogeneidad, características del borde y distribución espacial de los parches, de cada tipo de cobertura, definen la estructura del hábitat y afectan de manera directa o indirecta a la distribución y abundancia de los organismos dentro y entre parches (Krawchuk & Taylor, 2003). Elementos como los corredores, o parches alargados que funcionan como conectores permitiendo la dispersión de organismos y el flujo de energía entre los parches que unen, a la vez actúan como hábitat temporal de distintas especies. Todos estos elementos están inmersos dentro de una "matriz", o elemento espacial dominante, que permite un flujo de materia y energía dentro de un paisaje (Forman, 1995; Krawchuk & Taylor, 2003; Grez et al., 2004), y a su vez poseen implicancias directas o indirectas en la dinámica espacial de las especies (Marshall et al., 2002). En referencia a los componentes del paisaje, existen dos componentes principales de la diversidad del paisaje, la "composición" que hace

referencia a la diversidad de las coberturas (tipos y proporciones), y “configuración” que se refiere a la distribución espacial de sus proporciones relativas en el paisaje (Li, 1989). En este sentido, el conocimiento de la manera en que el arreglo espacial de los elementos del paisaje, es decir la estructura, afecta la dinámica de los organismos vivos, se plantea como un área de estudio que puede contribuir al desarrollo de la investigación entomológica aplicada (Garra Muñoz, 2006).

2.2 Objetivos y contexto del capítulo

El presente capítulo, presenta una utilización exploratoria de las imágenes de satélites ópticos en el contexto de la ecología de vectores. El objetivo principal de este capítulo es el de desarrollar computacionalmente y explorar el funcionamiento de un modelo de difusión espacio-temporal, que corre sobre la base de información derivada de Sensores de Remotos, para una mejor comprensión de las características ambientales y los parámetros de la población de vectores que determinan la dinámica de la distribución de los mosquitos en una región endemo-epidémica de dengue en el norte de Argentina.

Las imágenes en este caso son utilizadas para describir el ambiente y como ejemplo se propone la implementación de un modelo numérico para simular la dinámica de difusión espacio-temporal de poblaciones de mosquitos. Este modelo considera parámetros poblacionales del vector como nacimientos, difusión, atracción por mamíferos y muertes, y por otro lado, dinámica de viento superficial y categorías de uso de la tierra derivadas de imágenes satelitales. Ecuaciones diferenciales del transporte, difusión y conservación usados en mecánica de fluidos en su aproximación continua, son adaptadas para el estudio de la dinámica de población de mosquitos culícidos. El entrenamiento del modelo considera parámetros del género *Aedes*, y se utiliza como sitio un área de amortiguamiento de la reserva de la biosfera “Las Yungas”, en la región sur del bosque montañoso este de los andes, en la provincia de Salta – Argentina. Las ecuaciones del modelo de difusión, corren sobre una imagen de rugosidad del paisaje, derivada de imágenes Landsat 5 TM, a través de clasificaciones supervisadas y filtros de textura.

2.3 Materiales y Método

2.3.1. Área de Estudio

Situada en la provincia de Salta - Argentina, en la selva oriental de la cadena montañosa andina, es una zona de amortiguamiento de la Reserva de la Biosfera de Naciones Unidas "Las Yungas". Las características principales de la región son la alta biodiversidad, la presencia de especies de importancia económica, los recursos del paisaje y la convergencia de una gran diversidad de culturas nativas amerindias. El área de estudio (Figura 6) abarca una gran diversidad de paisajes de los ecosistemas alto andinos de bosque de montaña, Chaco Serrano, los bosques nubosos de la selva subtropical de montaña baja, con los bosques montanos, pastizales y tierras de cultivo de caña de azúcar, cítricos, soja y algodón, entre otros (Volante et al. 2004).

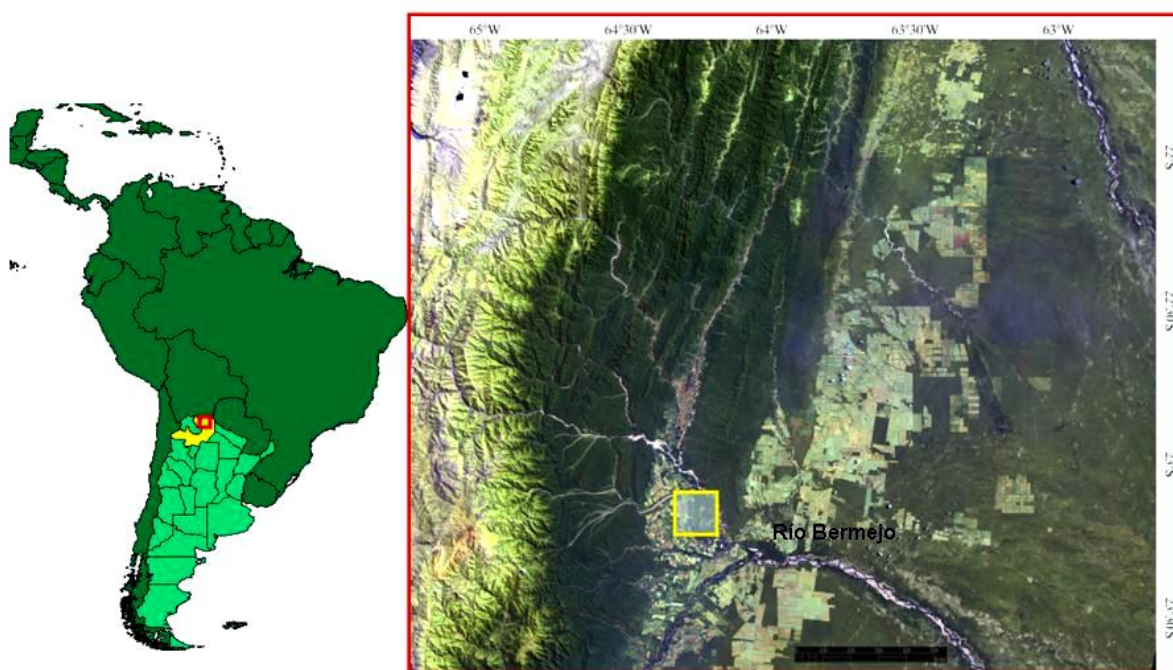


Figura 6. Ubicación general del área de estudio, en la provincia de Salta, Departamento Orán. A la derecha, Mosaico Landsat 5 TM. Paths 230 – 231. Rows 75 – 76, del 16 de Septiembre y 27 Octubre de 2011. (RGB = 7520)

Dos paisajes diferentes de 5,7 Km. x 5,7 Km., fueron elegidos para ejecutar el modelo de difusión sobre información derivada de imágenes Landsat. El primero, al este y en inmediaciones de la ciudad de San Ramón de la Nueva Orán, en área de características rurales, con casas o granjas aisladas, rodeadas de cultivos y surcada de una red de drenaje importante, conteniendo parches de vegetación nativa y forestaciones comerciales (23° 9' 31.08" S, 64° 14' 52.58" W – Datum WGS84).

El segundo (Figura 7), la localidad de Hipólito Irigoyen (epidémica en lo referente a Fiebre del engue) y su región sub-urbana ($23^{\circ} 14' 36''$ S, $64^{\circ} 16' 35.84''$ W - Datum WGS84).

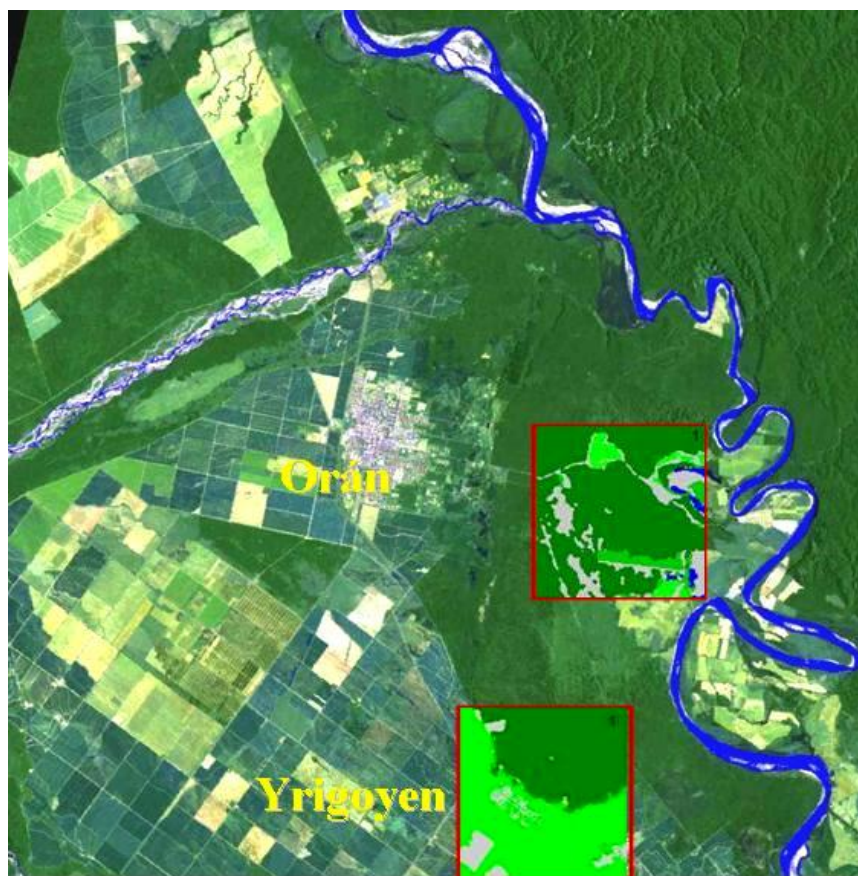


Figura 7: Área de estudio. Los recuadros rojos, indican los sitios de entrenamiento, para los que se generaron sendas imágenes de textura del paisaje, en base a una imagen Landsat 5 TM. Hipólito Irigoyen (al sur) y cercanías de Orán (Centro-Este).

2.3.2 Características de las Imágenes Landsat 5 TM

El satélite de observación de la tierra Landsat 5 pertenece al programa Landsat del gobierno de los Estados Unidos, y es operado por la NASA y el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS). Puesto en órbita el 1° de marzo de 1984, a una altitud de 705 Km., cada imagen cubre un área de 185 x 185 Km., posee una inclinación solar de 98.2° , con órbita polar helio sincrónica, una revisita de 16 días, y un período de revolución de 99 minutos (14.5 orbitas/día), pasando por el Ecuador a las 9:45 AM (± 15 min.) hora local (en modo descendente). En funcionamiento por más de 27 años, los sistemas imageadores

Landsat 5 fueron suspendidos en Noviembre de 2011 debido a fallas en un componente fundamental de transmisión. El equipo de operaciones de vuelo continúa explorando opciones, que incluyen los procedimientos alternativos de operación para el sensor Thematic Mapper (TM) utilizado en este apartado. El sensor TM, opera en siete bandas espectrales diferentes elegidas especialmente para el monitoreo de vegetación a excepción de la banda 7, que se agregó para aplicaciones geológicas. La imagen posee un tamaño de píxel en todas las bandas de 30 metros, a excepción de la banda termal 6, que tiene un píxel de 120 metros en el terreno, presentando las siguientes características:

- Banda 1: (0,45 a 0,52 micrones - azul) fue diseñada para la penetración en cuerpos de agua, y es útil para el mapeo de costas, para diferenciar entre suelo y vegetación y para clasificar distintas cubiertas boscosas como por ejemplo coníferas y latifoliadas. También es útil para diferenciar los diferentes tipos de rocas presentes en la superficie terrestre.

- Banda 2: (0,52 a 0,60 micrones - verde) fue especialmente diseñada para evaluar el vigor de la vegetación sana, midiendo su pico de reflectancia (o radiancia) en el espectro del verde. También es útil para diferenciar tipos de rocas.

- Banda 3: (0,63 a 0,69 micrones - rojo) es una banda de absorción de clorofila, muy útil para la clasificación de la cubierta vegetal. También sirve en la diferenciación de tipos de rocas.

- Banda 4: (0,76 a 0,90 micrones - infrarrojo cercano) es útil para determinar el contenido de biomasa, para la delimitación de cuerpos de agua y para la clasificación de las rocas.

- Banda 5: (1,55 a 1,75 micrones - infrarrojo medio) es indicativa del contenido de humedad de la vegetación y del suelo, y es útil para discriminar nieve y nubes.

- Banda 6: (10,40 a 12,50 micrones - infrarrojo termal o infrarrojo térmico) es útil en el análisis del estrés de la vegetación, en la determinación de la humedad del suelo y en el mapeo termal o de temperatura de superficie.

- Banda 7: (2,08 a 2,35 micrones - infrarrojo lejano) fue especialmente diseñada por su potencial para la discriminación de rocas y para el mapeo hidrotermal. Mide la cantidad de hidroxilos (OH) y la absorción de agua.

A nivel del análisis visual, estas siete bandas pueden combinarse de a tres o más, produciendo una gama de imágenes de falso color compuesto (Figura 5) que incrementan notablemente sus aplicaciones, especialmente en el campo de los recursos naturales (De la Riva y Cabello, 1998; Guichón et. al., 1999; Chuvieco Salinero, 2002).

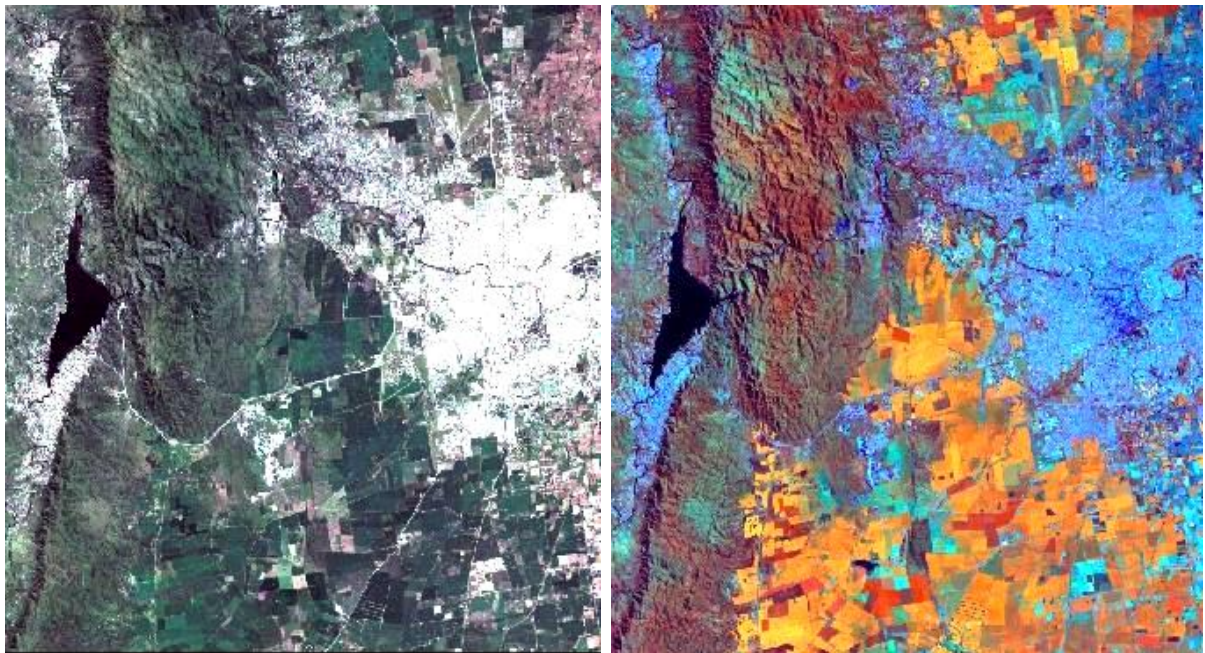


Figura 5: Visualización de sub-escenas Landsat 5 TM, Path: 229- Row: 82). A la izquierda, color verdadero (RGB = B3-B2-B1), y a la derecha falso color compuesto (RGB = B4-B5-B3) que resalta patrones de vegetación (en rojo) y las urbanizaciones (azul).

2.3.3 Descripción del modelo

Se propone un modelo numérico para simular la dinámica de difusión de *Aedes albopictus*, teniendo en cuenta el viento superficial y parámetros de dinámica de poblaciones de vectores relacionados con los usos de la tierra, tales como nacimientos, la difusión, la atracción por las hemato-fuentes (humanos en este caso) y muertes. Ecuaciones diferenciales de transporte, difusión y conservación utilizadas en mecánica de fluidos en su aproximación continua, fueron adaptados para el estudio de la dinámica de población de *Aedes albopictus*. La primera ecuación (1) representa un modelo general sobre la base de las parametrizaciones de Raffy y Tran, 2005, dónde el primer término representa la difusividad, el segundo el transporte del viento y el tercero la atracción por los mamíferos. El último corresponde a las fuentes y sumideros. El sistema de ecuaciones es resuelto mediante diferencias finitas.

$$\frac{\partial \rho(P, t)}{\partial t} = \nabla \cdot (D_R \nabla \rho) - \nabla \cdot (\rho D_W V) - \nabla \cdot (\rho K_H \nabla H) + \alpha - \beta$$

Dónde:

P	Densidad de mosquitos	No homogéneo
α	Tasa de nacimientos	6 (m ² /día)
B	Tasa de muertes	0.2
V	Velocidad Viento Superficie	No homogéneo
K_H	Tensor de Atracción	100
H	Campo de Atracción	No homogéneo
D_R	Tensor de Difusión	No homogéneo / ver Tabla2
D_W	Tensor de Rugosidad	No homogéneo / ver Tabla2

Tabla. 2. Parámetros utilizados en el modelo. Adaptados de Raffy y Tran (2005) y Tran (2004). Los Parámetros No homogéneos, son creados a priori según el formato requerido (viento = vector, densidad y Campo de Atracción = Raster)

Todos los tensores son considerados como escalares, en este modelo preliminar. Los tensores D_R y D_W dependen del paisaje, considerándose dependientes de las clases de uso del suelo y sus valores correspondientes adaptados de Raffy y Tran, 2005. Las ecuaciones de difusión del modelo trabajan en un escenario no-homogéneo y con tensores de difusión no uniformes. El campo de atracción (un valor por pixel de un raster de 200x200), es calculado con un Filtro del tipo Pasa Bajo, en el que su valor depende de la cantidad de pixeles con viviendas que haya a su alrededor. El valor del pixel de una vivienda (dónde se encuentra la hematofuente), a su vez rodeado (ventana de 100 x 100 metros) en un 100% de viviendas, es máximo con un valor de atracción = 1. Un pixel sin viviendas y rodeado de otras clases que no incorporan hematofuentes, adquiere un valor de atracción = 0.

Al despejar el término correspondiente a la densidad de mosquitos, tenemos:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}(P, t) = \text{Rozamiento}(P, t) - \text{Transporte}(P, t) - \text{Atraccion}(P, t) + \alpha(P, t) - \beta(P, t)$$

En la cual:

$$Rozamiento(P, t) = \text{div}[D_R(P, t) \cdot \nabla \rho(P, t)]$$

$$Transporte(P, t) = [D_W(P, t) \cdot \vec{W}(P, t) \cdot \nabla \rho(P, t)]$$

$$Atraccion(P, t) = \text{div}[K_H \cdot \rho(P, t) \cdot \nabla H(P, t)]$$

Dónde:

$\rho(P, t)$ = densidad de mosquitos

$D_R(P, t)$ = tensor de rozamiento

$D_W(P, t)$ = tensor de viento

$W(P, t)$ = velocidad del viento

K_H = constante de atracción

$H(P, t)$ = campo de atracción

$\alpha(P, t)$ = razón de nacimientos

$\beta(P, t)$ = razón de muertes

Para la generación de estos valores, cinco (5) clases de rugosidad del paisaje diferentes (Ogunjemio et al., 2005) fueron generadas en base a una escena Landsat 5TM, adquirida el 25 de enero de 2004 (Path 230 - Row 76) y sus índices derivados, NDVI (Jensen, 1986) y transformaciones Tasseled Cap (Crist y Cicone, 1984; Crist y Kauth, 1986). A su vez, se aplicó un filtro de textura de medidas de co-ocurrencia (Envi 4.1, 2004) a la banda NDVI, con el fin de resaltar diferencias a nivel de patrones espaciales de la vegetación. La clase **Agua** (Ríos y Fuentes de agua superficial como lagos, lagunas, charcos) fue obtenida a través de una clasificación de Máxima Verosimilitud (Maximum likelihood classification) utilizando como entrada las 3 bandas Tasseled cap y las bandas 1-2-3-4-5-7 de la imagen Landsat 5TM, y un umbral de 0.9 desvíos estándar. La clase “**Suelo expuesto**” fue derivada a partir de valores umbral del NDVI entre 0 y 0.25. Tres Clases de vegetación 1) **vegetación baja**, 2) **forestaciones comerciales o bosques abiertos** y 3) **selva de yunga**, fueron creadas a partir de Regiones de Interés (ROI tool) derivadas de umbrales del NDVI y de los Filtros de Textura aplicados al NDVI. El desarrollo vertical de la vegetación y la cobertura vegetal de las áreas verdes fueron

supervisadas a través de imágenes de alta resolución espacial del sitio Google Earth. Todos los procedimientos de tratamiento de las imágenes se realizaron utilizando el programa ENVI 4.1, incluyendo el de incorporación de cada clase creada a una única “Imagen de Textura del Paisaje” en la que se utilizó la herramienta “Band Math” o álgebra de bandas, para asignarle a cada una de las clases un valor numérico ascendente, en relación directa a la rugosidad del paisaje (complejidad vertical y horizontal de la vegetación). Para validar las clases obtenidas y obtener el nivel de precisión del clasificador, se utilizaron matrices de confusión y el índice de Kappa, comúnmente empleadas para evaluar categorías en mapas de clasificación y su respectiva correspondencia en el terreno (Hernández-Stefanoni & Ponce-Hernández, 2004). En la matriz de confusión se muestran no solo la cantidad de píxeles incorrectamente clasificados (error de omisión), sino también a que clase han sido incorrectamente asignados (error de comisión) (Chuvieco, 2010).

Por otro lado, el estadístico Kappa (k), es una medida de la diferencia entre la exactitud lograda en la clasificación con un clasificador automático y la chance de lograr una clasificación correcta con un clasificador aleatorio. El valor del coeficiente puede variar entre 0 y 1, y cuanto más cercano a 1 esté, mayor será la concordancia del método, mientras que un valor cercano a 0 sugiere que el acuerdo observado es debido al azar (Chuvieco, 2010). Las clases obtenidas, fueron aceptadas al alcanzar valores entre 0.81 y 1, según el criterio de Cerda & Villarroel (2008), y con valores de precisión global (porcentaje de píxeles clasificados correctamente por el operador) mayores al 85%.

Por otra parte, los valores del Tensor de Difusión (viento) fueron creados en forma proporcional a los Tensores de Rugosidad (paisaje). Ver tabla 2.

Clases de Rugosidad del Paisaje	D_w	D_R
Agua	1	0
Suelo Expuesto	1	0.2
Vegetación baja	0.7	0.3
Bosques abiertos	0.5	0.5
Selva de Yungas	0.3	0.7

Tabla. 2. Coeficientes de tensores de rugosidad y de viento utilizados en las corridas del modelo numérico, donde DW es el Tensor de Rugosidad y DR el de Difusión. Adaptado de Raffy y Tran, 2005.

En lo referente al viento de superficie (V), experimentos en túneles de viento, tanto en laboratorio como en campo, muestran que bajo condiciones ventosas, los mosquitos viajan contra la dirección del viento, dentro de la pluma de olor, con el fin de localizar la hematófuerce (Dekker et al. 2001, 2005; Cooperband y Carde, 2006). Los mosquitos culícidos infieren la dirección del viento, al parecer, a partir del flujo óptico de elementos del suelo, relativos a su posición (Carde, 1996), evitando lugares con vientos que se acercan a sus propias velocidades de vuelo (0,4 a 1,6 m/s; 0,9 a 3,6 millas/hora), como fuera demostrado por Hoffmann y Miller (2002). En base a estas evidencias, el desplazamiento de los mosquitos se ejecuta contra la dirección del viento, en dirección a los atractores o hematófuerces, permaneciendo en reposo cuando la velocidad del viento supera la velocidad media de vuelo de la especie establecida en el modelo.

Para ejecución del programa, deben construirse previamente un conjunto de archivos que llamaremos “condiciones iniciales”, y en los cuales se definen todos los valores necesarios para realizar la simulación. Se debe tener en cuenta que de acuerdo a la cantidad de horas que se desee realizar la simulación, será la cantidad de archivos por variable necesarios, ya que estos datos varían con el tiempo. Por ejemplo, para una simulación de 48 horas, los archivos en formato Raster de nacimientos y muertes son 48 bloques de 200 x 200 valores cada uno, mientras que el viento es un Vector con 48 valores. Dichos archivos son:

Tensor de viento: en este archivo, se encuentran los datos correspondientes al tensor de viento para una imagen sobre la cual se desee correr la simulación.

Tensor de rozamiento: en este archivo, se encuentran los datos correspondientes al tensor de rozamiento para una imagen sobre la cual se desee correr la simulación. Dicho archivo es generado a partir del archivo de clasificación de la imagen y la asignación de rugosidad.

Viento: este archivo contiene los valores de dirección, sentido y velocidad del viento correspondiente a la cantidad de horas que se desee hacer la simulación. Por ejemplo, si se desea correr una simulación durante 48 hs, entonces en este archivo deben estar todos los valores del viento para cada una de las horas de la simulación.

Nacimientos: en este archivo se encuentran los datos correspondientes a los nacimientos de insectos para la imagen dada. Al igual que para el archivo del viento, en este caso, deben estar presentes todos los valores para toda la cantidad de horas que se desee realizar la simulación. Esto también se debe a que la tasa de nacimientos puede variar de acuerdo al tiempo, o a algún parámetro a incorporar como la temperatura.

Muertes: este archivo contiene los valores correspondientes a las muertes de los insectos para la imagen dada. Este archivo tiene el mismo formato que el archivo de nacimientos.

Atractores: en este archivo se encuentran los datos correspondientes a los atractores. Para este caso, representan zonas con hemato-fuentes, tanto Rurales como de áreas Urbanas, y se representaron a través de la ubicación de estancias, granjas y unidades habitacionales, localizadas a partir de las imágenes satelitales.

Densidad inicial: en este archivo se encuentran los datos correspondientes a la densidad de insectos inicial, en referencia a las áreas de cría de los mosquitos *Aedes albopictus*, simuladas y representadas por cementerios, depósitos de neumáticos o chatarra, ubicados en las inmediaciones de las ciudades o viviendas rurales.

2.4 Resultados y discusión

En las Figuras 8 y 9, se muestra, para los sitios de entrenamiento, la distribución de densidad de mosquitos cada 12 días, como así también la velocidad y sentido del viento. Los resultados muestran los efectos sobre la difusión de las poblaciones debidas al efecto del viento y la rugosidad del paisaje. Las plumas de difusión de mosquitos, bajo la misma baja intensidad y dirección del viento, poseen una forma circular regular en la selva, y una forma longilínea concordante con el sentido, pero opuesta a la dirección del viento, sobre clases de rugosidad con menor fricción, como suelo expuesto o vegetación baja. Por otra parte, no hay ni difusión de mosquitos, ni transporte debido al viento, cuando la velocidad efectiva del viento es mayor a la velocidad propia de desplazamiento de la especie, y la atracción no solo depende del rango de atracción de la hemato-fuente, sino que también del tamaño efectivo de los grupos de atractores.

La simulación dentro de la ciudad de Hipólito Irigoyen, con 5 sitios diferentes de cría de *Aedes*, muestra que los mosquitos permanecen solo en las áreas con alta densidad de atractores. En la difusión en áreas rurales, el rango de atracción de los hogares no es lo suficientemente fuerte para mantener altas densidades de mosquitos cuando la rugosidad del paisaje permite velocidades efectivas altas del viento.

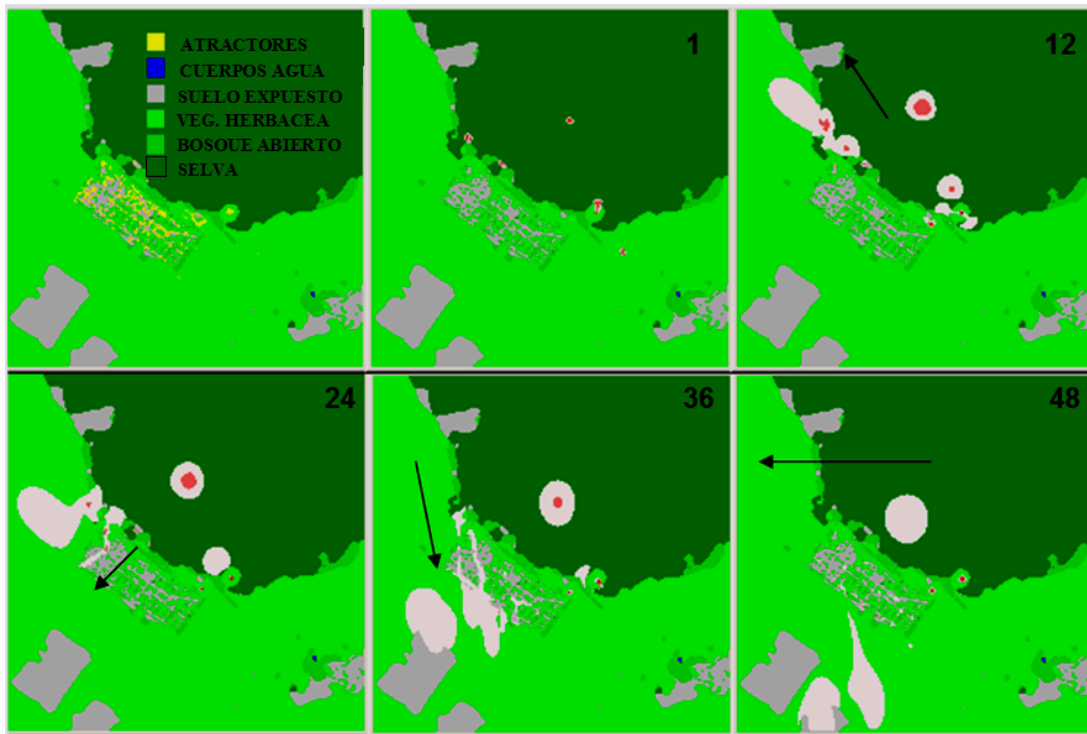


Figura 8. Progresión de la difusión de poblaciones de *Aedes albopictus*, simulada en la ciudad de Hipólito Irigoyen y sus alrededores. Los números indican la cantidad de días transcurridos desde la inicialización del modelo (1 a 48). Pueden apreciarse los atractores, cuerpos de agua y las distintas clases de textura del paisaje. Las flechas simbolizan la velocidad del viento (longitud del segmento), el sentido (inclinación), y la dirección (puntas).

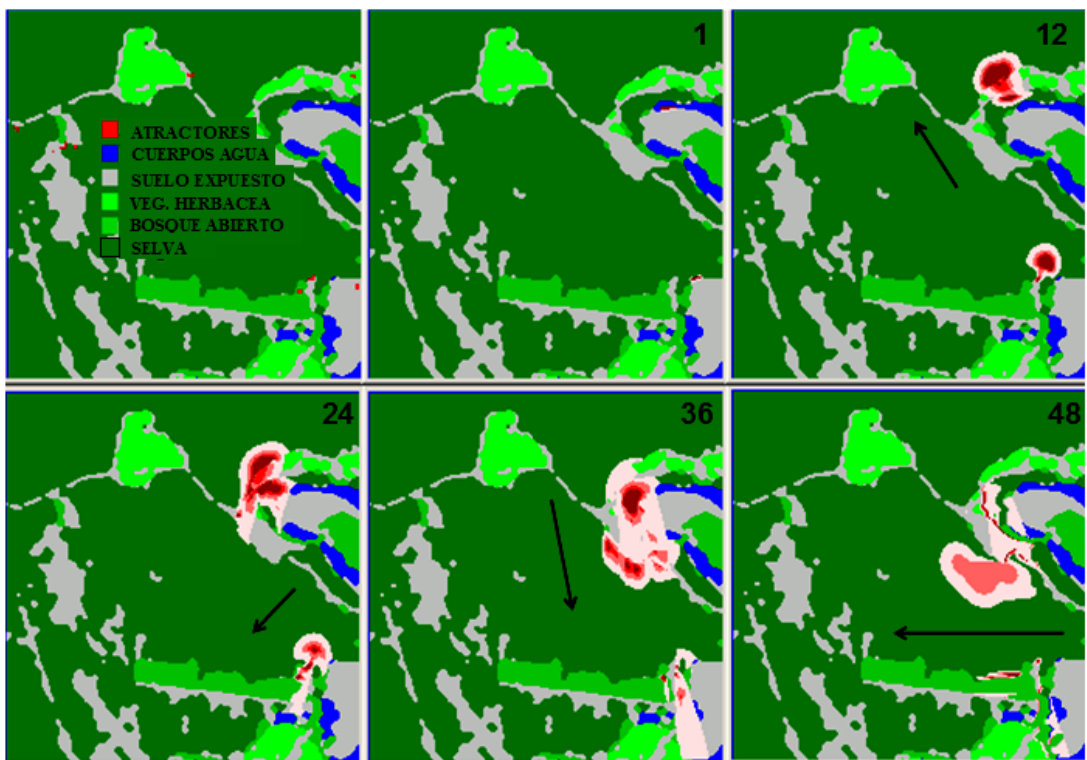


Figura 9. Progresión de la difusión de poblaciones de *Aedes albopictus*, simulada sobre un paisaje Rural, situado al este de la ciudad de San Ramón de la Nueva Orán.

Ciudad de Hipólito Irigoyen y áreas circundantes: Día 1: Muestra los criaderos de mosquitos. Día 12: Difusión de los mosquitos bajo el efecto del viento y los atractores. Día 24: Cambio en la forma de las plumas de difusión debidas a cambios en la dirección del viento y nuevos efectos de los atractores debidos a la rugosidad del paisaje. Es fácil de percibir como parte de la pluma de mosquitos penetra en la ciudad siguiendo las líneas de atractores. Día 36: Las plumas de mosquitos atraviesan la zona de atractores, en respuesta a variaciones en el viento. Se aprecia una desaceleración de la pluma de mosquitos debido a las diferencias en la rugosidad del paisaje. El cambio en la dirección del viento, cambia la forma de la pluma de mosquitos a los 24 días, e introduce una nueva pluma en las áreas urbanas. Al mismo tiempo, como resultado de las muertes, una nube de mosquitos permanece en la selva, con densidad y coberturas más bajas, en comparación a las primeras horas de difusión. Día 48. Agrupamientos de alta densidad de mosquitos permanecen en grandes atractores y bordes de las clases de rugosidad. A pesar del fuerte efecto del viento dentro de la ciudad, algunos agrupamientos pequeños permanecen en áreas de atracción más fuertes.

Paisaje Rural: Día 12: La difusión de los mosquitos comienza en las regiones del Norte, con tasas de difusión menores dentro de la selva. Día 24: Los agrupamientos de las áreas superiores, cambian de dirección siguiendo la dirección del viento, y la línea de vegetación baja, alcanzando un atractor. Día 36: En respuesta a la intensidad del viento, plumas extensas se generan en clases de baja rugosidad, con desaceleración de plumas debidas a la alta rugosidad de la selva. Los agrupamientos del área inferior, muestran una compensación debido al barrido del viento con los atractores. Día 48: El viento horizontal del este barre la pluma de mosquitos. Los agrupamientos del sur, permanecen entre el bosque abierto y el límite de la selva, mientras que un agrupamiento más denso permanece debido a los atractores.

La información derivada de sensores remotos a bordo de satélites, nos permite recrear diferentes escenarios para simular la dinámica de los insectos. Las ecuaciones de difusión utilizadas en este modelo nos brindan la posibilidad de identificar los efectos de parámetros como el viento y la textura del paisaje, sobre los movimientos espacio-temporales de potenciales vectores de enfermedades. Los parámetros para estas simulaciones son característicos de la familia de mosquitos culícidos, centrados en el género *Aedes* en una escala espacio-temporal en la que puede considerar a la densidad de estos insectos como una distribución no-discreta. Teniendo en cuenta la falta de calidad en series de tiempo de datos meteorológicos, la ausencia de estudios poblacionales del vector,

para esta región, y que los parámetros de desplazamiento de los mosquitos fueron extraídos de estudios realizados en otros países (Raffy y Tran, 2005), en consecuencia, hasta su validación pertinente, los resultados son mostrados de forma cualitativa.

En este trabajo, la atracción funcional del modelo de difusión de Raffy y Tran (2005), ha sido mejorado, comportándose como lineal dentro de un conjunto de atractores y decayendo fuera del mismo, a una escala de longitud de 30 m (Bidlingmayer, 1980). Además, en lo referente al transporte por el viento, y en base al trabajo de Van Dyk (2003), se incluyó un filtro que inhibe el desplazamiento de los mosquitos cuando la velocidad efectiva del viento de la clase es mayor que la de la velocidad de desplazamiento de los mosquitos, contra viento, en busca de la fuente de alimento.

Las simulaciones en paisajes verdaderos de gran extensión y variabilidad interna, donde los datos de campo de calidad son difíciles de obtener, demuestran la ventaja de usar los datos de sensores remotos complementarios para modelar la difusión geográfica de vectores de enfermedades tal como mosquitos del género *Aedes*. El modelo responde correctamente al rango de atracción en las áreas rurales como así también de las viviendas en la ciudad, teniendo en cuenta que sólo se considera la atracción por el ser humano (hogares), y no por otro tipo de mamíferos. En este sentido, se considera que son necesarias mejoras para garantizar el realismo de la dispersión en el paisaje, que podrían ser incorporadas al utilizar parámetros poblacionales propios de las especies de *Aedes* para la región, o de al menos otras regiones similares del país (como la actual distribución), validaciones con datos de distribución en terreno y la incorporación de otras fuentes de ingesta sanguínea para los mosquitos.

La importancia de estos desarrollos, radica en que esta clase de modelos, es la base para simular la difusión de las epidemias y sus parámetros determinantes, útiles para crear sistemas de alerta/control tempranos en epidemias de origen vectorial. A su vez, estas rutinas de programación, permiten generar herramientas de personalización de los parámetros del modelo, haciéndolo aplicables a otras especies de vectores, con preferencias de hábitat marcadas, como flebótomos, anofelinos o reduvidos. En este sentido, la flexibilidad a nivel de programación de este modelo, permite la incorporación de datos de entrada generados por otros modelos, como el desarrollado en el próximo capítulo, como parametrización de las variables de inicialización.