

## Estudio eco-epidemiológico de la reintroducción de la malaria en el nororiente de Venezuela mediante Sistemas de Información Geográfica y Sensores Remotos\*.

Roberto Barrera<sup>1</sup>, María Eugenia Grillet<sup>1</sup>, Yadira Rangel<sup>1</sup>, Jesús Berti<sup>2</sup> y Alberto Aché<sup>3</sup>

*El principal objetivo de este estudio es el análisis espacio-temporal del proceso de la reintroducción de malaria en la población humana en la zona de Santa Fe, estado Sucre, mediante un enfoque eco-epidemiológico y el empleo de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y Sensores Remotos (imagen Landsat TM). El SIG integra datos epidemiológicos (casos de malaria), meteorológicos (precipitación), geográficos (relieve, hidrografía, vialidad, población humana, uso de la tierra, etc.) y entomológicos (criaderos de anofelinos vectores). Los resultados del presente estudio señalan los siguientes factores de riesgo malárico para la zona de Santa Fe: Altitudes menores a 50 m sobre el nivel del mar, pendiente del terreno inferior al 10%, viviendas ubicadas a menos de 1 Km de criaderos de *Anopheles aquasalis*, especialmente aquellas cercanas a ríos y próximas a canales, presencia de vegetación boscosa o de manglar, concentraciones urbanas y presencia de herbazales altos (caña amarga). Mediante el SIG podemos delimitar las áreas de mayor riesgo malárico, por lo cual se recomienda la aplicación de esta tecnología para reducir los costos operacionales de control en zonas que están actualmente infectadas. Se hacen recomendaciones para el control de *An. aquasalis* mediante técnicas de manejo ambiental de los criaderos para proteger a la población. Se recomienda una adecuada vigilancia epidemiológica dado que existen las condiciones necesarias para una eventual reinfección de la zona.*

**Palabras clave:** Malaria, *Anopheles aquasalis*, ecología, Sistema de Información Geográfica, Sensores Remotos, Landsat TM, control, Venezuela.

### INTRODUCCIÓN

La malaria continúa siendo el mayor problema de salud pública en el ámbito mundial y su control se complica cada día debido al incremento en la resistencia del parásito a los antimaláricos y de los vectores a los insecticidas, así como al progresivo aumento en el

número de focos maláricos debido al crecimiento poblacional y a las transformaciones ambientales (Organización Mundial de la Salud -WHO-, 1995). Aún no se ha encontrado una metodología universal para el control de la malaria. Por el contrario, cada zona malárica posee peculiaridades ambientales y dificultades de control que le son características. No hay duda que el éxito transitorio alcanzado con el DDT retrasó los estudios necesarios para comprender la dinámica de la malaria. Collins & Paskewitz, (1995) creen que el éxito de las nuevas tecnologías de control depende de nuestra comprensión de los patrones de transmisión de malaria en el campo. Desde hace tiempo se reconoce la existencia de importantes variaciones en la epidemiología de la malaria entre las principales áreas maláricas del país, así como diferencias entre los focos de cada una de las zonas

\*CONICIT RP-IV-130032, cofinanciada por CDCH-UCV y PAHO.

<sup>1</sup>Laboratorio de Biología de Vectores, Instituto de Zoología Tropical, Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela, Apdo. 47058, Caracas 1041-A, Venezuela. e-mail: rbarrera@strix.ciens.ucv.ve.

<sup>2</sup>División de Control de Vectores y Reservorios, Dirección de Endemias Rurales, DGSSSSA, MSAS, Malariología, Maracay, Venezuela.

<sup>3</sup>División de Epidemiología, Dirección de Endemias Rurales, DGSSSSA, MSAS, Malariología, Maracay, Venezuela.

maláricas (Gabaldón & Berti, 1954). Trabajos recientes sobre la ecología de anofelinos demuestran la importancia de la investigación operacional local para lograr el control de la malaria (Berti *et al*, 1993a; Zimmerman & Berti, 1994).

Una tecnología relativamente reciente para el estudio de problemas de salud pública lo constituyen los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y el empleo de Sensores Remotos (Briggs & Elliott, 1995; Croner *et al*, 1996; Hay *et al*, 1996; Liebhold *et al*, 1993; Scholten & de Lepper, 1991; Washino & Wood, 1994). Los nuevos desarrollos en computación y SIG permiten la integración de la información ecológica, epidemiológica y la adquirida mediante sensores remotos para desarrollar modelos predictivos basados en la naturaleza focal de las enfermedades y la epidemiología del paisaje (Beck *et al*, 1995). Básicamente un SIG es una tecnología de representación y análisis espacial de datos. Los Sistemas de Información Geográficos difieren de las bases tradicionales de datos en que: 1- Poseen elementos geográficos (Ej.: aspectos del paisaje como ríos, carreteras, etc.) incluidos en la base de datos, que usualmente se incorporan al digitalizar mapas de la zona de interés, mediante el uso de unidades GPS (posicionadores satelitales), etc. 2- Los atributos o variables relevantes del problema (Ej.: casos de malaria) deben estar georeferenciados, y 3- El SIG maneja y controla la topología de los elementos geográficos (Ej.: relaciones matemáticas entre los elementos geográficos), lo cual permite una gran diversidad de operaciones espaciales y su representación en la forma de mapas. Una ventaja del uso de SIG es la detallada atención que permite dedicar a las variaciones espacio-temporales en las unidades de estudio, que en análisis convencional de datos son absorbidos por estadísticos como la desviación estándar.

Los sensores remotos están siendo utilizados para estudiar aspectos de la dinámica de la transmisión malárica en varias partes del mundo. Thomson *et al*, 1996, emplean satélites meteorológicos para derivar estimados de variables ambientales (precipitación, temperatura, humedad y vegetación) a pequeña escala (grandes áreas) y estudiar su relación con los patrones de malaria en África. Las imágenes Landsat Thematic Mapper (TM) y SPOT proporcionan una resolución a nivel del suelo entre 10 y 30 metros, lo cual permite distinguir grandes cuerpos acuáticos e indirectamente, los tipos de uso de la tierra y vegetación asociados a variables de la malaria. Por ejemplo, mediante sensores remotos se ha podido identificar las áreas de alta producción de anofelinos en campos de arroz en California (Wood *et al*, 1992; 1991; Wekesa *et al*, 1996) y predecir hasta con dos meses de anticipación los

criaderos más productivos. Otros estudios han generado modelos predictivos de áreas de riesgo malárico en América Central, en función de análisis del paisaje y criaderos de anofelinos con una combinación de SIG e imágenes Landsat TM (Pope *et al*, 1994; Beck *et al*, 1994; 1997) y SPOT (Roberts *et al*, 1996; Rejmankova *et al*, 1995).

El principal objetivo de este estudio es el análisis espacio-temporal del proceso de reinfección con malaria de la población humana en la zona de Santa Fe, estado Sucre, mediante un enfoque eco-epidemiológico y el empleo de un Sistema de Información Geográfica (SIG) y sensores remotos (imagen de satélite Landsat TM). El SIG integra los datos epidemiológicos (casos de malaria), meteorológicos (precipitación), geográficos (relieve, hidrografía, vialidad, población humana, uso de la tierra, etc.) y entomológicos (criaderos de anofelinos vectores). Todos los datos que conforman el SIG son georeferenciados a un mismo sistema de coordenadas, de modo que cada dato es almacenado en la computadora con su correspondiente ubicación espacial. El software de SIG permite luego el análisis espacial de las capas de información geográfica, así como su representación en la forma de mapas que sintetizan los resultados. Igualmente nos proponemos contribuir con recomendaciones de control y monitoreo de la zona para impedir eventuales reinfección por malaria.

## MATERIALES Y MÉTODOS

**Área de estudio.** El área de estudio (60 Km<sup>2</sup>) está ubicada en el occidente del estado Sucre (Gráfico 1; 10° 14' - 10° 18' N / 64° 21' - 64° 30' W). Esta es una zona costera montañosa (0 - 700 m.s.n.m.) cuyos poblados principales son Santa Fe, Playa Colorada, Arapo y Arapito con una población estimada de 8.836 habitantes. La precipitación promedio anual en la estación meteorológica más cercana (17 Km; Barcelona, estado Anzoátegui; Fuerza Aérea Venezolana) es de 654 mm (1985 - 1994) con una época lluviosa desde mayo hasta diciembre cuando se registra la mayor parte de la precipitación anual (97,7%). La vegetación de la zona varía desde el nivel del mar con predominio de herbazales bajos sobre dunas de arena, cocotales, manglares y relictos de bosques altos siempre verdes en las planicies más húmedas, hasta bosques secos y semi-siempreverdes en las zonas montañosas. Parte de las laderas han sido quemadas y presentan vegetación de herbazal de montaña, arbustales de transición y chaparros. El sistema de cultivo predominante es el conuco (maíz, yuca, cambur, mango) y existen algunos parches de frutales como coco y ciruela de huesito. La principal actividad económica de los habitantes es la pesca y cierta actividad

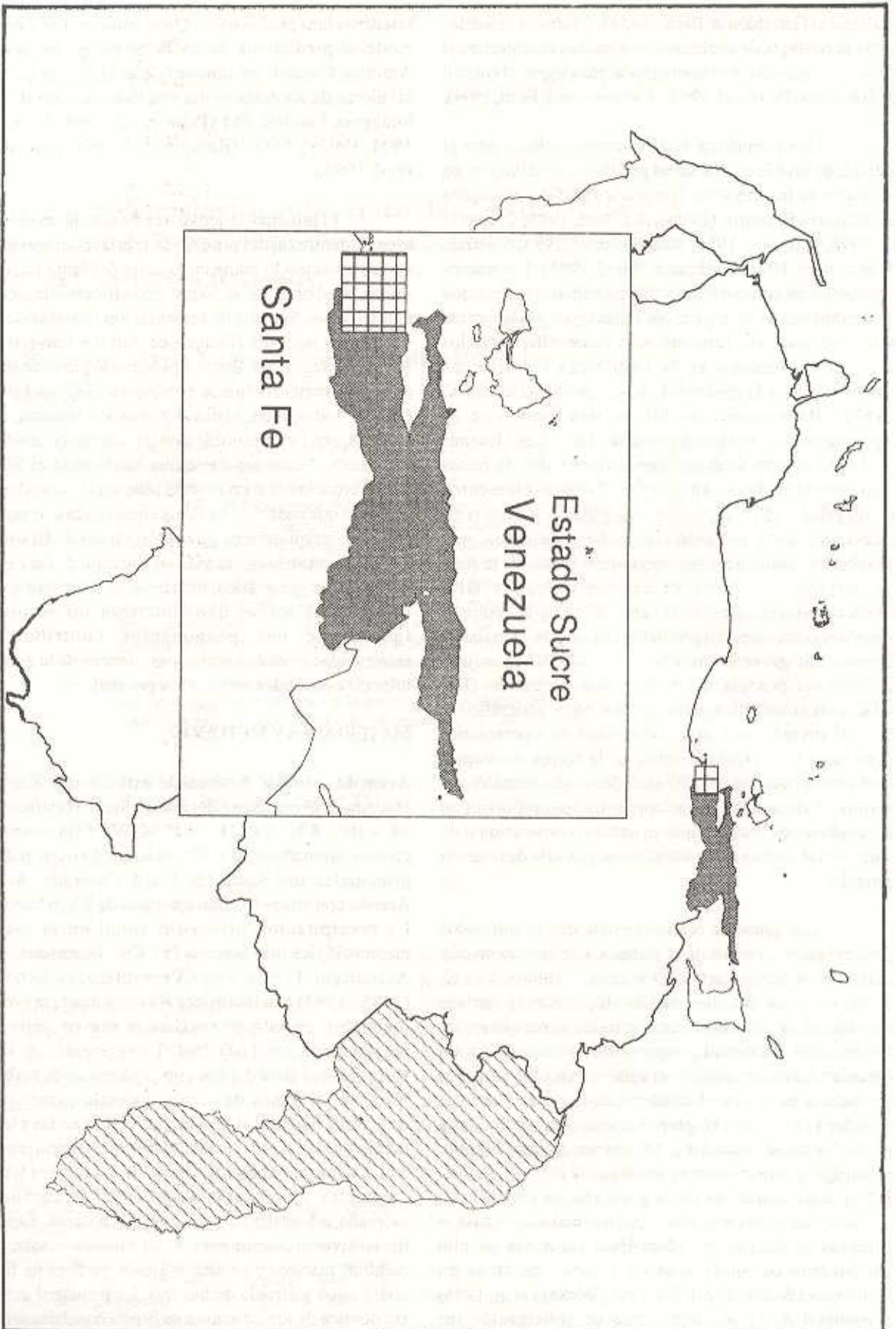


Gráfico 1. Localización del área de estudio, Santa Fe, estado Sucre, Venezuela.

de turismo debido a la belleza escénica de sus playas y montañas. En toda la zona existen ingentes carencias de servicios básicos de disposición de desechos líquidos y sólidos y muchas de las viviendas carecen de sistemas sanitarios adecuados.

**Desarrollo del Sistema de Información Geográfica.** El SIG (Gráfico 2) se elaboró a partir de los datos siguientes:

1- Mapas topográficos 1:5.000 (Ministerio de Transporte y Comunicaciones; 1991) que fueron pasados a material estable y digitalizados en una mesa digitalizadora (Calcomp) con el software Arc/Info (Environmental Studies Research Institute, versión 5). De estos mapas se derivaron capas vectoriales de: ríos, otros cuerpos de agua (lagunas, manglares), vialidad, edificaciones, curvas de nivel (cada 5 m) y la toponimia.

2- Casos de malaria reportados oficialmente por el Ministerio de Sanidad y Asistencia Social, Dirección de Malariología (MSAS) desde la aparición del primer caso reportado en 1985 hasta 1997. Esta información se georeferenció al nivel de poblado de acuerdo con la nomenclatura utilizada en el reporte de casos. Inicialmente se deseaba adjudicar cada caso de malaria a las direcciones de las viviendas suministradas en las planillas de datos, pero fue imposible localizar las viviendas en el mapa debido a la falta de un sistema de direcciones y por la ausencia de adecuada identificación de las viviendas.

3- Estimación de la población humana basado en el número de edificaciones existentes de acuerdo con los planos 1:5.000, que a su vez provienen de la restitución de fotos aéreas realizado por el Ministerio de Transporte y Comunicaciones (marzo, 1991). Se calculó una regresión lineal ( $\text{Habitantes} = -22 + 4,92 \text{ Edificaciones}$ ;  $R^2 = 0,98$ ;  $F = 3,46$ ,  $P < 0,01$ ) entre el número de habitantes y el número de viviendas por poblado, basándose en los censos realizados por Malariología en los años 80 para las poblaciones de la zona de estudio. El coeficiente de regresión fue significativo ( $t = 58,8$ ,  $P < 0,01$ ) e indica una densidad de 4,92 habitantes por edificación. Mediante el SIG se detectaron unas 2.157 edificaciones en el área de estudio, de las cuales la mayoría eran viviendas unifamiliares (observación personal), por lo tanto se estimó la población en unos 10.785 habitantes.

4- Vegetación y uso de la tierra provenientes de una clasificación híbrida de la imagen de satélite Landsat TM (002/053, 28/10/1993, sub-imagen 734b1-7) adquirida del Servicio de Información Cartográfica del Ambiente (Sica - Marnr). La clasificación de la imagen se realizó mediante procedimientos de clasificación no supervisada y supervisada utilizando el software Erdas Imagine 8,2.

La clasificación no supervisada consistió en el cálculo inicial de 60 clusters de pixels de la imagen de satélite (bandas 1 a 5 y 7) con la rutina Isodata, que utiliza la fórmula de la distancia espectral mínima. Para la clasificación supervisada se utilizaron puntos de reconocimiento sobre el terreno, los cuales se referenciaron mediante el uso de un posicionador satelital diferencial (GPS; Trimble Geo-Explorer) y mapas detallados (1:5.000) del terreno. La corrección diferencial se llevó a cabo con el software Geo-PC (versión 2) utilizando los datos adquiridos por la antena de Servi-teodolitos C.A. ubicada en Caracas (estación de referencia) y los datos obtenidos con el posicionador (unidad móvil). Cada punto de observación consistió en la descripción detallada del tipo de vegetación y uso de la tierra, que luego sirvieron para identificar las clases obtenidas mediante la clasificación no supervisada. La clasificación supervisada se llevó a cabo con el algoritmo Maximun Likelihood y se terminó definiendo 10 clases de usos de la tierra.

5- Criaderos de anofelinos, en especial de *Anopheles aquasalis*. Se localizaron los criaderos existentes en la zona de estudio, ampliando así la cobertura previa realizada por Berti *et al*, (1993a). Para la localización de los criaderos se inspeccionaron todos los cuerpos de agua contando para ello con la ayuda de los habitantes, quienes nos indicaron la presencia de cuerpos de agua en sus localidades. De cada cuerpo de agua se colectaron al menos 30 muestras con "dippers" de medio litro de capacidad. Las larvas avanzadas y las pupas se conservaron hasta la emergencia de los adultos para su identificación. En este trabajo se reporta la presencia o ausencia de las distintas especies de anofelinos encontrados. Adicionalmente se registraron las siguientes variables cualitativas de los cuerpos de agua: tipo de criadero, tipo de hábitat terrestre, exposición al sol, translucencia del agua, vegetación asociada y la extensión del criadero. Cada criadero fue georeferenciado con la ayuda de los mapas 1:5.000 y con unidades satelitales de determinación de la posición (GPS; Trimble Geo-explorer).

6- Modelo de elevación de terreno para evaluar la influencia de la topografía en la distribución de criaderos, habitantes y casos de malaria. Utilizando las curvas de nivel cada 5 metros provenientes de los mapas digitalizados (1:5.000) se extrapola una imagen raster de elevación sobre el nivel del mar (metros) y una imagen de pendiente (%) del terreno (ERDAS Imagine 8,2). Los análisis espaciales con el SIG se realizaron con el software Atlas GIS (versión 3,0).

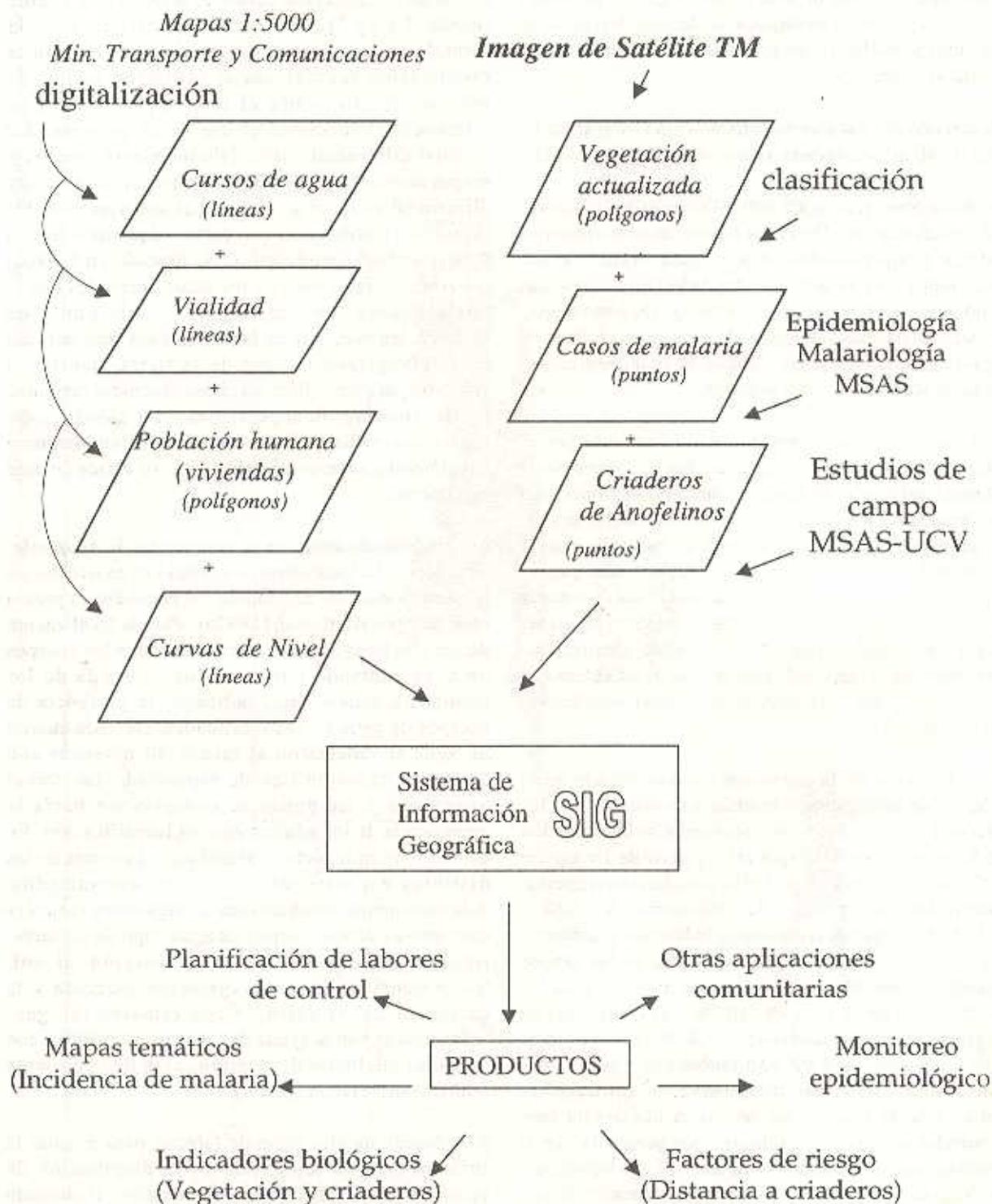


Gráfico 2. Esquema del Sistema de Información Geográfica utilizado en el presente estudio.

## RESULTADOS

**Distribución temporal y espacial de la reinfección.** Los primeros (dos) casos oficialmente registrados en el área de estudio que marcan el inicio de la reinfección fueron reportados en mayo de 1985 en las localidades de El Potrero y La Bodega (Gráfico 3). El progreso de la reinfección con malaria muestra una rápida diseminación de casos, de modo que en Diciembre de 1985 todos los poblados con el mayor número de habitantes (Santa Fe, Nurucual, Playa Colorada, Arapito) ya tenían casos reportados (Gráfico 3). La malaria se esparció localmente en sus inicios (Mayo a Octubre de 1985) y en poco tiempo llegó a las poblaciones más lejanas (Octubre a Diciembre de 1985; Gráfico 3). Una descripción detallada del proceso de reinfección en el tiempo y su relación con la precipitación se reporta en otra publicación (Barrera, en preparación). Durante este primer año de reinfección se registraron 349 casos, cifra que se mantuvo relativamente estable en 1986 (325 casos) y 1987 (218 casos); tiempo durante el cual se llevaron a cabo labores de control que no impidieron que en los años siguientes aumentara la incidencia malárica. En efecto, entre 1988 y 1991 el número de casos anuales fluctuó entre 1040 y 1767, para luego declinar a menos de 60 casos a partir de 1992 cuando se implementaron nuevos enfoques de control de la malaria (Zimmerman & Berti, 1994). Las zonas consistentemente afectadas durante esta epidemia fueron Arapito, Playa Colorada, Santa Fe y alrededores y la zona de Nurucual (Gráfico 4). Desde

1995 a 1997 sólo se registraron 3 casos importados de malaria en la zona de estudio.

**Criaderos de anofelinos.** En el presente estudio se localizaron 44 criaderos de anofelinos, de los cuales 25 (57%) contenían larvas avanzadas o pupas de *An. aquasalis* (Tabla 1). Esta especie se encontró más frecuentemente en los márgenes de los ríos cerca de su desembocadura y en los alrededores de las principales poblaciones: Arapito, Playa Colorada, Santa Fe, Botalón y Nurucual. Durante la época seca, cuando se realizaron los muestreos, estos ríos tenían muy poca o ninguna corriente tanto por el disminuido caudal como debido a que la boca del río en su desembocadura se cierra. A las orillas de estos ríos represados crecen gramíneas y cyperáceas donde se localizan las larvas de anofelinos. También es frecuente observar material vegetal en descomposición en los recodos de estos ríos donde se encuentran formas inmaduras de anofelinos. El segundo criadero en importancia para *An. aquasalis* durante la época seca lo constituyen los canales artificiales con aguas estancadas, que también están estrechamente asociados a las zonas urbanas. Llama la atención que no encontramos *An. aquasalis* en los manglares con la frecuencia que esperábamos. En estos ambientes solo la encontramos asociada al mangle negro, especialmente en pequeños charquitos cuya superficie estaba ocupada por los neumatóforos emergentes del mangle. Las áreas ocupadas por el mangle rojo eran más profundas y contenían peces.

TABLA 1

Tipos de criaderos, frecuencia y número de criaderos de cada clase con preadultos de varias especies de anofelinos en la zona de estudio en Santa Fe, estado Sucre.

| Tipo de criadero                    | Frecuencia | <i>An. aquasalis</i> | <i>An. pseudo-punctipennis</i> | <i>An. argiratarsis</i> | <i>An. oswaldoi</i> | <i>An. marajoara</i> | no identificado <sup>1</sup> |
|-------------------------------------|------------|----------------------|--------------------------------|-------------------------|---------------------|----------------------|------------------------------|
| Manantial                           | 6          | 1                    | 3                              | 5                       | 0                   | 0                    | 1                            |
| Margen de río                       | 20         | 12                   | 8                              | 5                       | 0                   | 1                    | 5                            |
| Acequia de río                      | 1          | 1                    | 0                              | 0                       | 0                   | 0                    | 0                            |
| Canal                               | 5          | 5                    | 1                              | 3                       | 0                   | 0                    | 0                            |
| Tanque                              | 1          | 0                    | 0                              | 0                       | 0                   | 0                    | 1                            |
| Pocitos                             | 3          | 1                    | 0                              | 0                       | 0                   | 0                    | 2                            |
| Charcos temporales                  | 2          | 2                    | 2                              | 2                       | 2                   | 0                    | 0                            |
| Pocitos en manglar con neumatóforos | 2          | 2                    | 0                              | 0                       | 0                   | 0                    | 0                            |
| Lagunita en manglar                 | 4          | 2                    | 0                              | 0                       | 0                   | 0                    | 0                            |

<sup>1</sup>Solo larvas de primer o segundo estadio que no pudieron ser identificadas.

*Anopheles pseudopunctipennis* fue comúnmente encontrada en los márgenes de los ríos y canales asociada a algas. Otros anofelinos identificados fueron: *An. argiritarsis*, *An. oswaldoi* y *An. marajoara* (Tabla 1).

**VARIABLES ESPACIALES ASOCIADAS A LA TRANSMISIÓN MALÁRICA.** El área de Santa Fe y poblados cercanos están conectados entre sí por la Carretera de Oriente y el poblado de Santa Fe constituye el principal centro de intercambio entre sus habitantes. En ese centro poblado se encuentran concentrados varios servicios básicos como el hospital, liceo, mercado local donde se intercambian productos autóctonos y traídos de otras ciudades, transporte, etc. La imagen de satélite Landsat TM en sus bandas del visible (escala 1:75.000; Gráfico 5) nos permite observar el área de estudio como si se tratase de una foto a color. A esta imagen se le superpusieron las capas vectoriales digitalizadas de la vialidad (líneas en rojo), hidrografía (líneas azules), edificaciones (cuadros en negro), las localidades (símbolo en amarillo) y la ubicación de los criaderos de anofelinos (puntos en rojo). Puede apreciarse que una gran porción de la zona de estudio está cubierta por vegetación densa, representada por bosques secos y semi-siempreverdes que muestran un color verde de diferentes tonalidades (Gráfico 5). También pueden distinguirse las áreas que han sido intervenidas (quema, tala, conucos) por su tono más claro y de varias intensidades, así como algunas nubes y sus sombras (hacia el centro, sur de la imagen). Las áreas urbanas están representadas por la concentración de símbolos negros en forma de cuadros que son edificaciones y las vías internas en forma de líneas rojas. Uno de los patrones más evidentes lo constituye la concentración de criaderos de anofelinos alrededor de la población de Santa Fe (ver Gráfico 4 para la ubicación de los pueblos en el mapa). Los criaderos de anofelinos también son abundantes en la vecindad de La Bodega y El Potrero, lugares donde se registraron los primeros casos de malaria (Gráficos 3 y 5). Otras poblaciones importantes como Playa Colorada y Arapito también presentan criaderos en la zona urbana.

La imagen de satélite clasificada en 10 categorías nos permite observar la variabilidad en usos de la tierra y la vegetación (Gráfico 6). El tipo de vegetación predominante de la zona es el bosque, que en la actualidad ha sido intervenido y convertido en áreas de pastizales de montaña, arbustales y áreas de pequeños cultivos o conucos. Se puede apreciar una gran intervención de la vegetación original entre las poblaciones de Playa Colorada y Santa Fe. Otras zonas, como Nurucual se encuentran menos intervenidas y pobladas (Gráfico 6). También existe una zona de manglares al este de la población de Santa Fe y remanentes de manglares en el

mismo pueblo. Esta imagen también muestra la distribución de criaderos de anofelinos y en particular, aquellos que tenían inmaduros de *An. aquasalis*. Más adelante se utiliza esta información derivada de la clasificación de la imagen de satélite para estudiar la relación entre el uso de la tierra y la transmisión malárica.

El Gráfico 7 muestra la distribución de los centros poblados y criaderos del área de estudio en función de la pendiente del terreno. Puede apreciarse que la mayoría de las viviendas se encuentran situadas en los valles con pendientes moderadas, inferiores al 10% (100% equivale a 45°). 80% de los habitantes de la zona residen en áreas con pendientes menores al 10%, los que a su vez presentaron 84% de todos los casos de malaria durante el periodo de estudio. Igualmente, puede observarse que la mayoría de los criaderos se encuentran en zonas de moderada a baja pendiente (Gráfico 7), como es de esperarse para que exista acumulación de agua y criaderos de anofelinos. Sólo en el caso de los manantiales se observaron cuerpos de agua relativamente estáticos en zonas de elevada pendiente. En términos de elevación sobre el nivel del mar, todas las poblaciones del área de estudio están por debajo de los 335 metros de altitud, aunque 95% de los habitantes y 97% de todos los casos de malaria fueron registrados por debajo de los 50 msnm. Al igual que con la pendiente, la mayoría de los criaderos se encuentran a baja altitud.

El Gráfico 8 muestra el área de estudio representada por una imagen de la pendiente del terreno para facilitar la interpretación de la topografía de la zona y los buffers o áreas circulares alrededor de criaderos de *An. aquasalis*, con diámetros de 100 m, 500 m y 1 Km alrededor de cada uno. Estos buffers representan lo que serían las áreas de dispersión de *An. aquasalis* a partir de sus sitios de emergencia si los adultos pudieran volar las distancias representadas. En esta figura se incluyen las edificaciones para observar el grado de superposición entre la posible área de dispersión de los mosquitos y las viviendas (Gráfico 8). Mediante el SIG podemos calcular el número de viviendas y habitantes que se encuentran ubicados dentro de los buffers. Por ejemplo, si consideramos que en promedio las hembras de *An. aquasalis* pueden dispersarse unos 500 m del lugar de cría, el área equivalente contendría el 70 % de todos los habitantes de la zona, mientras que un buffer de 1 Km contendría al 84 %. Igualmente, se puede calcular el porcentaje de casos de malaria que ocurrieron durante todo el periodo dentro de los buffers de 500 m y 1 Km, los cuales fueron respectivamente 89 % y 96 %. Es decir, la mayoría de los casos de malaria están incluidos dentro de lo que pudiera ser un intervalo de dispersión del vector de 1 Km.

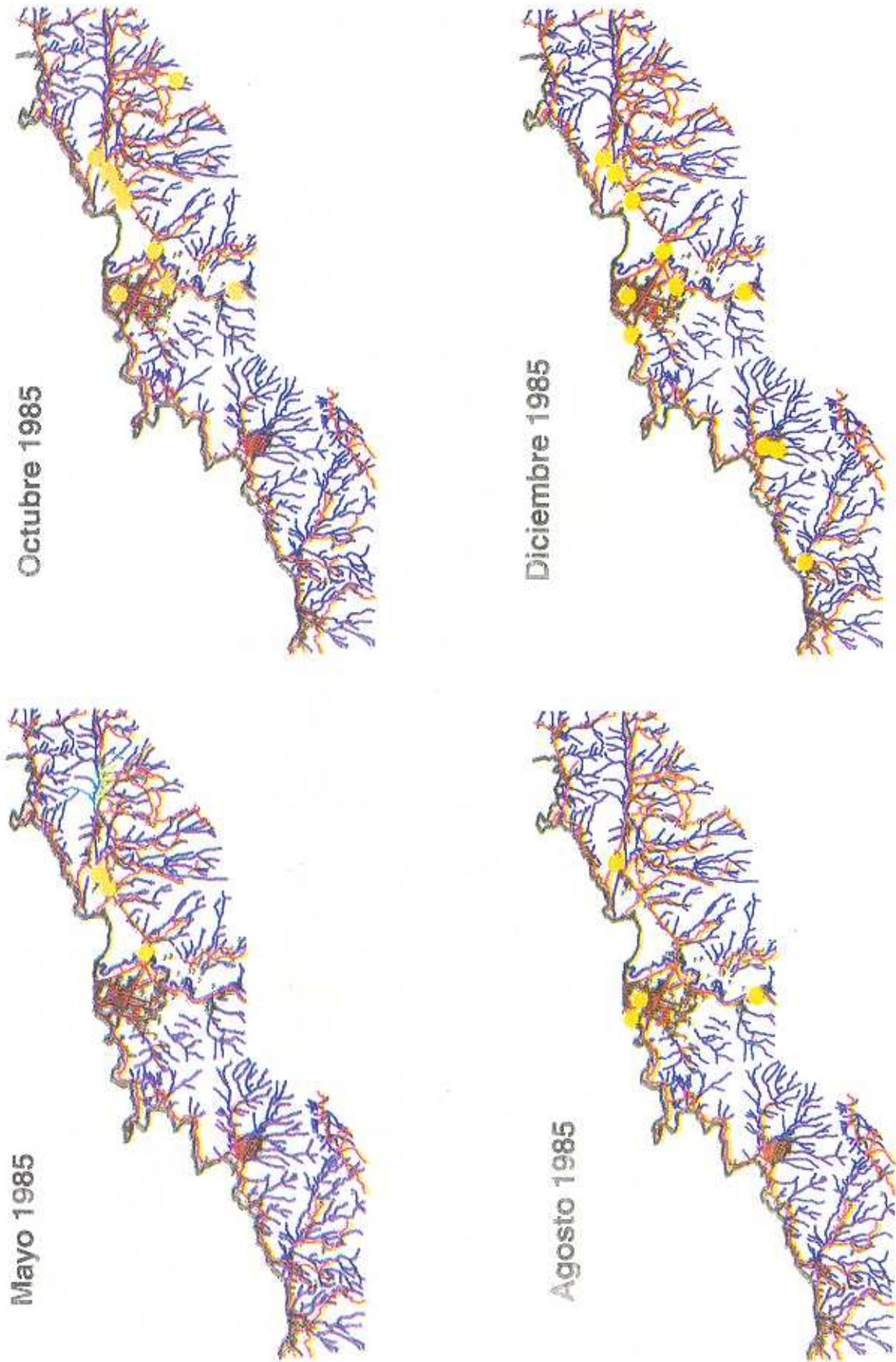


Gráfico 3. Historia de la reintroducción malaría del área de Santa Fe, estado Sucre, durante 1985. Las líneas en rojo representan la vialidad y en azul la hidrografía de la zona. Los puntos negros son edificaciones, mientras que las zonas en amarillo representan las localidades infectadas.

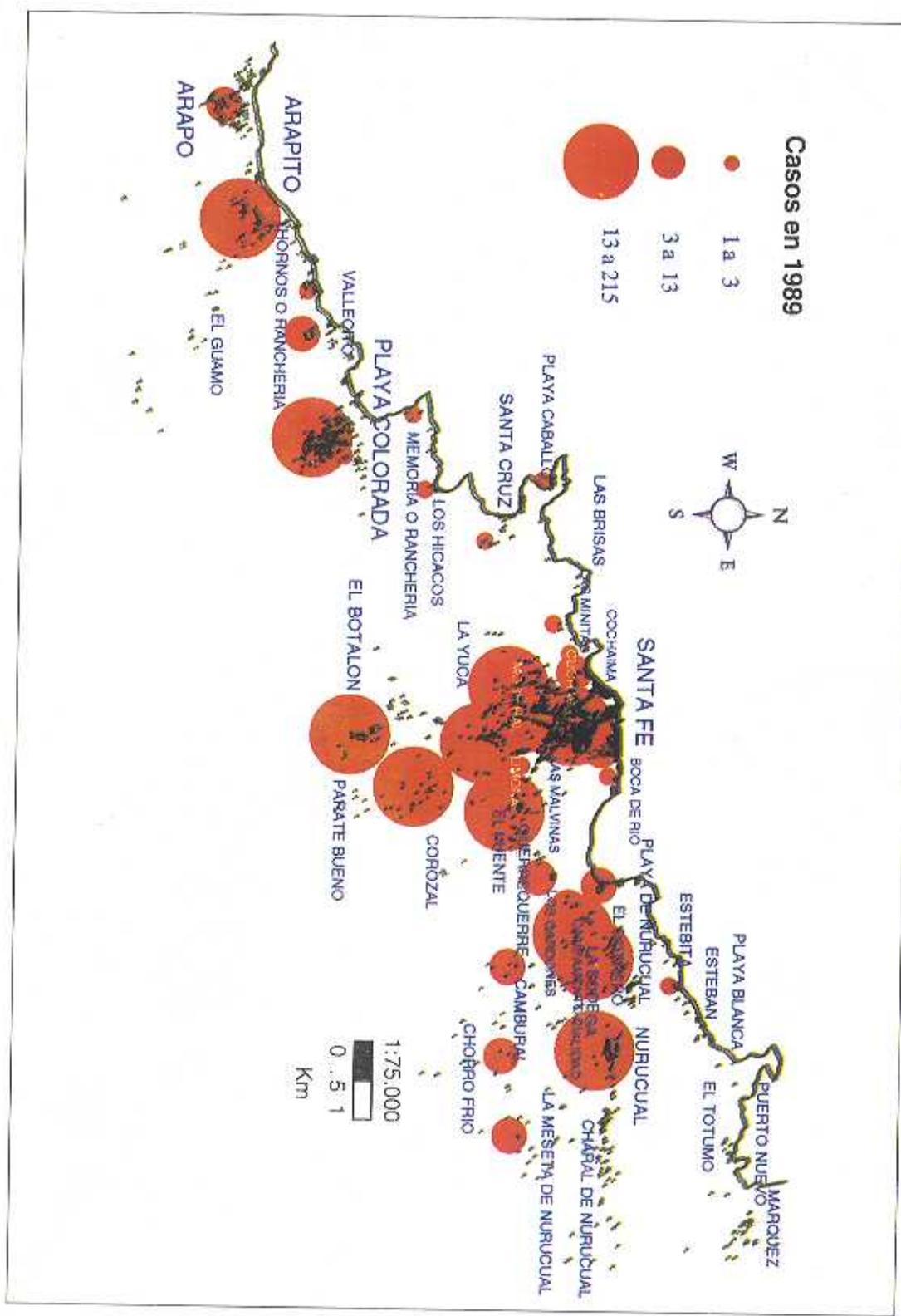


Gráfico 4. Mapa temático que muestra la prevalencia de la malaria en la zona de estudio en 1989.

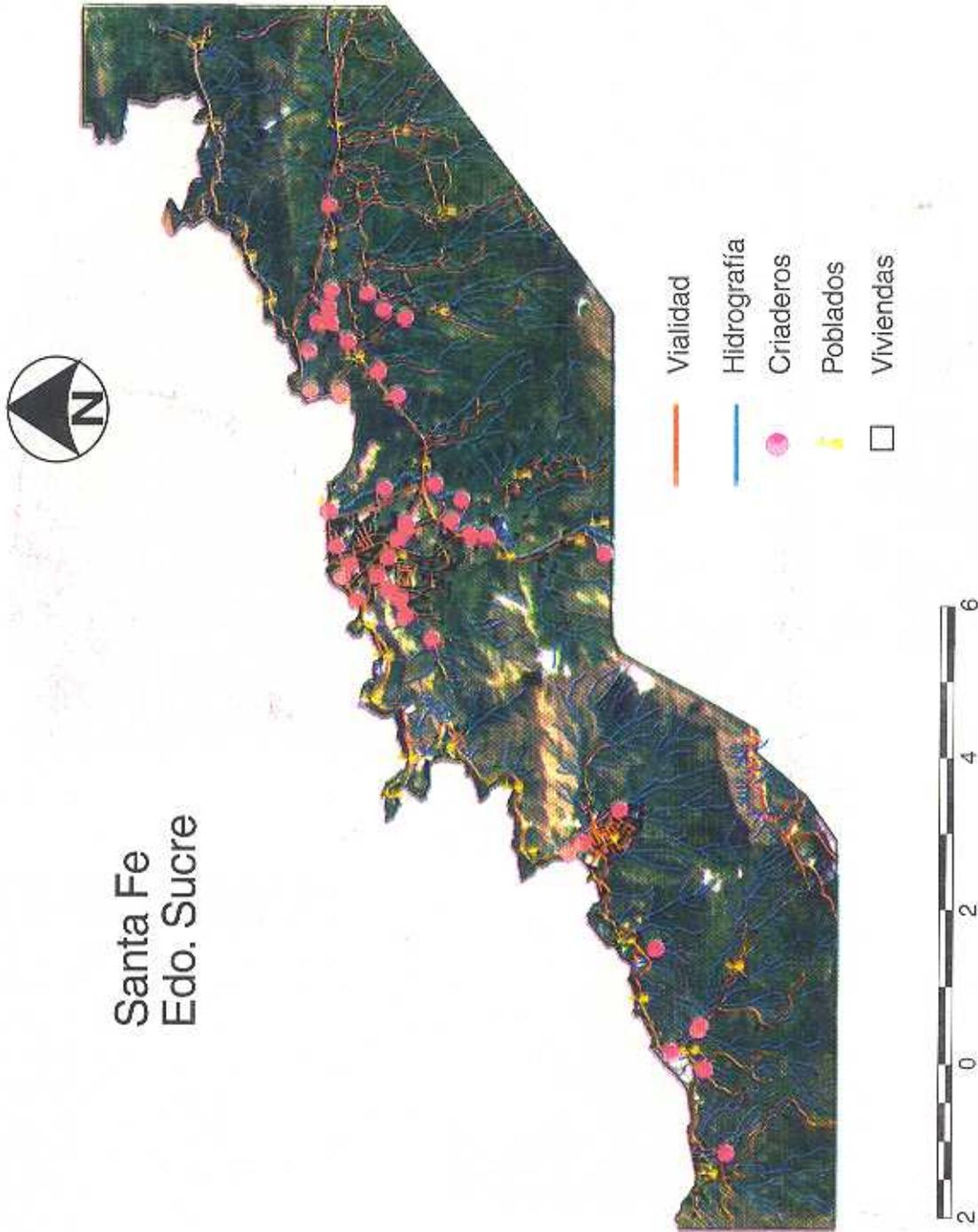


Gráfico 5. Sub-imagen de satélite Landsat TM representada como una imagen compuesta de las bandas del visible (azul, verde, rojo) que muestra el área de estudio y las capas vectoriales de: vialidad, hidrografía, localidades y criaderos de anofelinos.

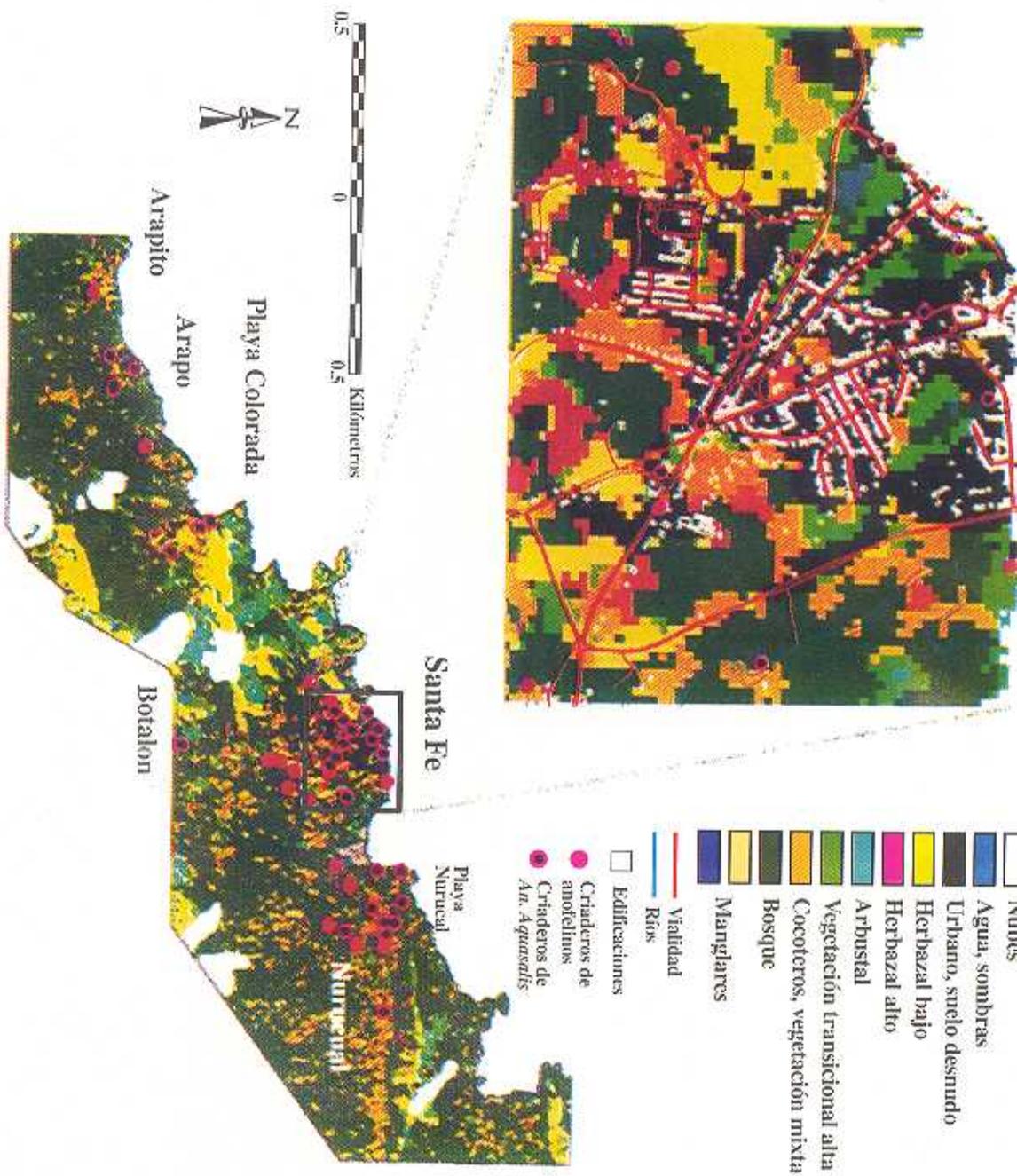


Gráfico 6. Clasificación de la sub-imagen de satélite basado en 6 bandas espectrales (3 en el visible y 3 en el infrarrojo). Se representan 10 clases de uso de la tierra y vegetación. En detalle se muestra el área urbana de Santa Fe y los criaderos de *Anopheles aquasalis*.

Gráfico 7. Mapa de la zona de estudio en Santa Fe, estado Sucre, que representa la pendiente del terreno en cada punto, junto con las edificaciones, viabilidad y los criaderos de anofelinos.

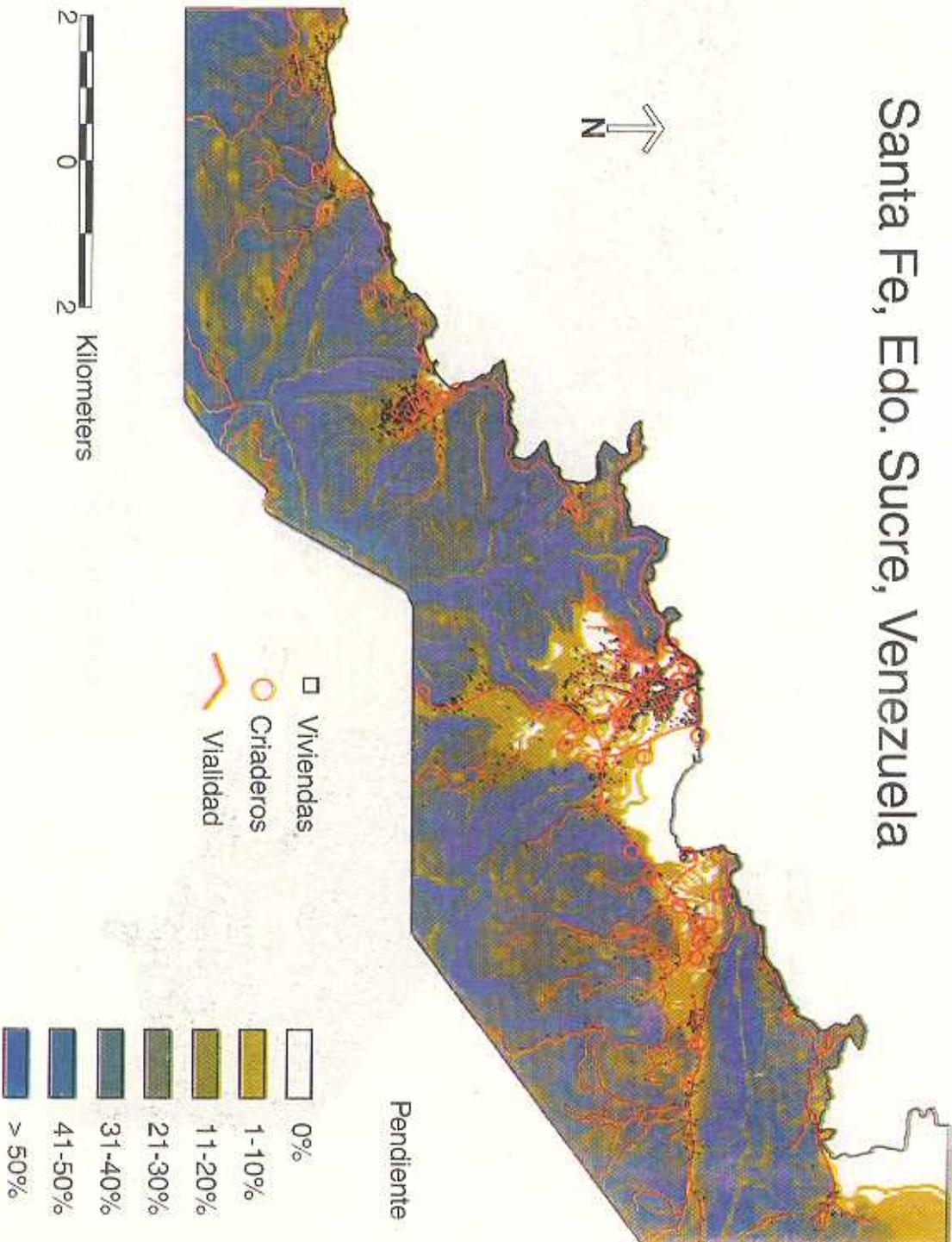
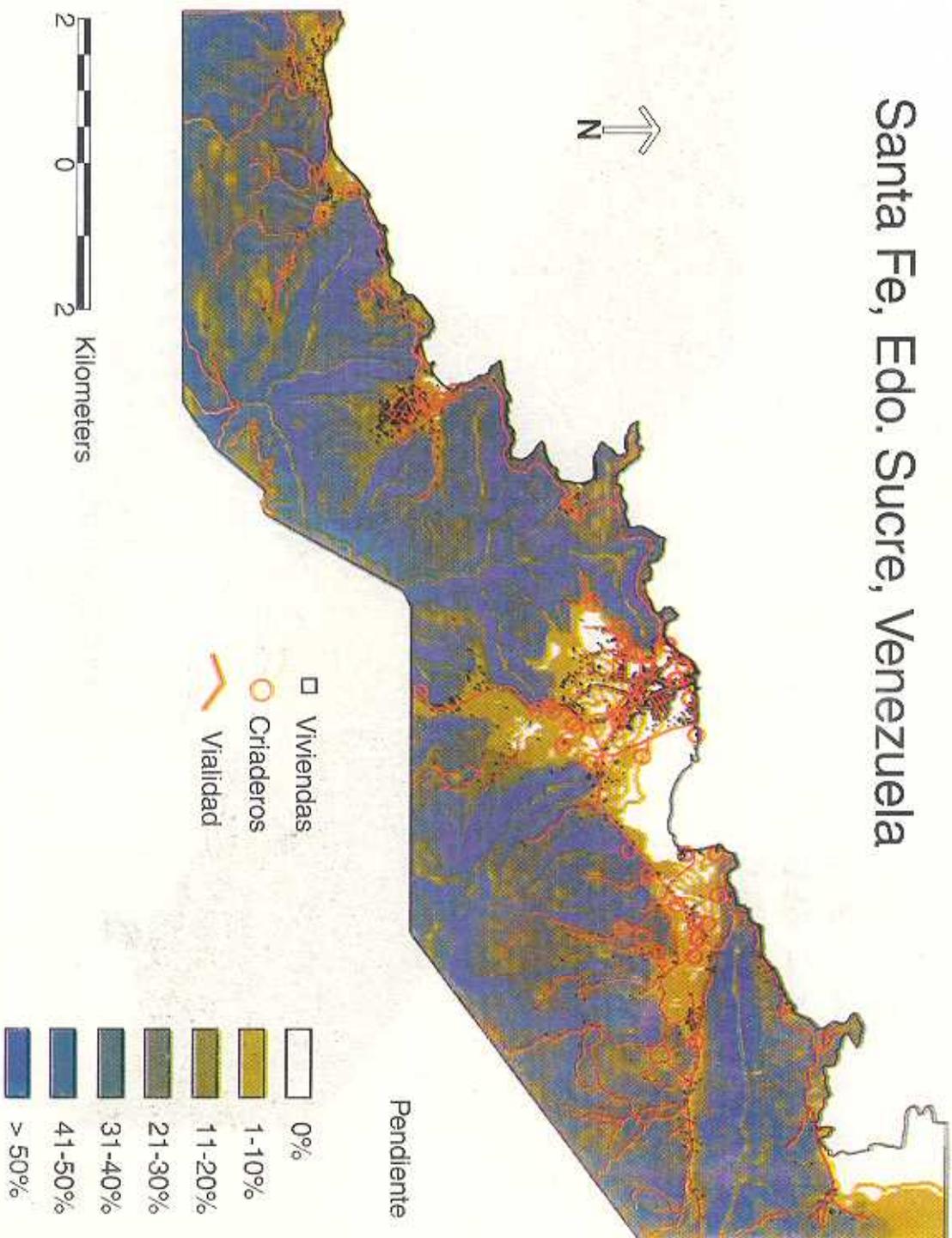


Gráfico 7. Mapa de la zona de estudio en Santa Fe, estado Sucre, que representa la pendiente del terreno en cada punto, junto con las edificaciones, viabilidad y los criaderos de anofelinos.

## Santa Fe, Edo. Sucre, Venezuela



Buffers alrededor de criaderos de *An. aquasalis*  
(en blanco, a 100 m, 500 m y 1 Km)

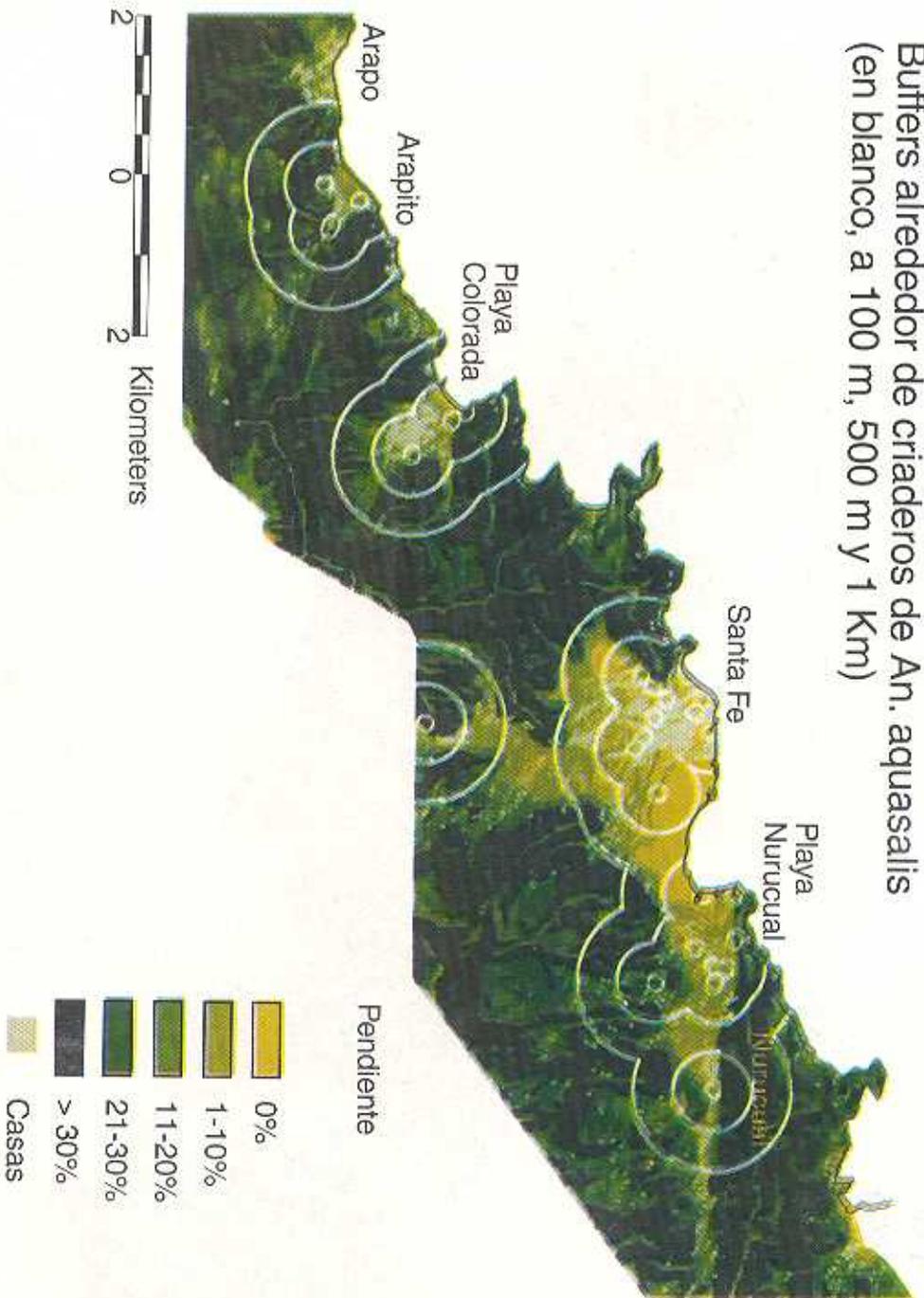


Gráfico 8. Mapa de la zona de estudio mostrando los buffers circulares generados a 100 m, 500 m y 1 Km. alrededor de los criaderos de *Anopheles aquasalis* junto con la representación de las viviendas y la pendiente del terreno.

Para determinar la posible relación entre las variables ambientales (vegetación/uso de la tierra y distancia a criaderos de *An. aquasalis*), el Índice Parasitario (IP; casos x 1.000 / habitantes) y el número de casos por localidad (para todo el período), se realizó un Análisis de Componentes Principales (ACP). Esta técnica estadística multivariada tiene como propósito ordenar las localidades en función de combinaciones lineales de las variables anteriores, de modo que cada combinación lineal intenta explicar la mayor variación en los datos. Cada combinación lineal es independiente o no correlacionada y se espera que cada combinación lineal u eje represente un proceso independiente con significado biológico. En principio existen tantos componentes o ejes como variables se usen en el análisis, pero usualmente los primeros componentes explican la mayoría de la variación. El resultado del ACP muestra que los 3 primeros componentes principales explican 70,2 % de la varianza (Tabla 2). El primer componente refleja que el Índice Parasitario estuvo asociado a zonas boscosas y de manglares y, negativamente relacionado con zonas de herbazales bajos, arbustales y de vegetación transicional o perturbada. Igualmente, el IP resultó negativamente asociado con la variable distancia al criadero más cercano, es decir, a menor distancia del criadero mayor valor del índice. El segundo componente

principal mostró altos pesos para la variable casos totales de malaria asociados a zonas urbanas y a vegetación de gramíneas altas (principalmente caña amarga que se encuentra en zonas pantanosas y a orilla de ríos). El número total de casos de malaria también resultó negativamente correlacionado con la distancia al criadero más cercano.

## DISCUSIÓN

Los resultados del presente estudio señalan los siguientes factores de riesgo malárico para la zona de Santa Fe:

- Altitudes menores a 50 msnm.
- Pendientes del terreno inferior al 10%.
- Viviendas ubicadas a menos de 1 Km de criaderos de *Anopheles aquasalis*, especialmente aquellas cercanas a ríos y próximas a canales.
- Presencia de vegetación boscosa o de manglar.
- Concentraciones urbanas y presencia de herbazales altos (caña amarga).

Adicionalmente, en un análisis de la persistencia de malaria en la zona de Santa Fe (Barrera, en preparación) se infiere que el umbral de densidad humana requerido

TABLA 2

Análisis de Componentes Principales mostrando las combinaciones lineales de las variables investigadas: Casos de malaria, Índice Parasitario, distancia a criaderos del vector y proporciones de cada tipo de uso del suelo o vegetación.

| Variables                                     | Primer componente | Segundo componente |
|---|-------------------|--------------------|
| Casos totales                                 | -0,032            | 0,836              |
| Índice Parasitario                            | -0,566            | 0,174              |
| Distancia a criaderos de <i>An. aquasalis</i> | 0,435             | -0,467             |
| Urbano  | 0,453             | 0,676              |
| Herbazal bajo                                 | 0,769             | 0,155              |
| Herbazal alto                                 | -0,191            | 0,860              |
| Arbustal                                      | 0,688             | -0,236             |
| Vegetación transicional                       | 0,848             | -0,212             |
| Vegetación mixta, agricultura                 | -0,360            | 0,374              |
| Bosque  | -0,832            | -0,303             |
| Manglares                                     | -0,442            | -0,340             |

para que exista transmisión malárica es de 60 a 70 habitantes. Es decir, en poblaciones de menor densidad la malaria no podría persistir sin la importación de casos. De las 35 localidades analizadas en el trabajo, sólo 9 de ellas se encuentran sobre el umbral de densidad y además presentaron alta prevalencia y persistencia de malaria (Santa Fe, Nurucual, Arapito, Playa Colorada, El Potrero, Corozal, Querrequerre, Botolón y la Bodega). Estas poblaciones pudieran ser los focos maláricos más importantes en la zona de estudio, que además por el intercambio obligado entre los habitantes de la zona, pudieron servir como centros de exportación de casos a las poblaciones vecinas. Otras 5 poblaciones se encuentran cerca del valor umbral pero no presentaron una adecuada correspondencia entre prevalencia malárica y tamaño poblacional (Cambural, Campamento Vialidad, Vallecito, Arapo y la Meseta de Nurucual). Estas zonas probablemente no podrían sostener transmisión malárica sin la consistente importación del parásito. El resto de las localidades (21) probablemente no fueron focos maláricos (Barrera, en preparación).

Como pudo apreciarse en los Gráficos 7 y 8, existe una gran superposición de viviendas y criaderos de *An. aquasalis* en la zona de estudio, ya que la población humana está establecida en los valles de esta zona costero montañosa. Este solapamiento necesariamente conlleva a un alto y frecuente contacto vector-hospedador, uno de los parámetros más importantes de la ecuación malárica (Macdonald, 1957). El mayor contacto entre anofelinos y humanos debe darse alrededor de los criaderos y disminuir con la distancia. El que la mayoría de los casos de malaria (96%) se encontraran en el área de los buffers de 1 Km generados con el SIG, o 89% con buffers de 500 m reflejan una adecuada delimitación del área malárica donde deben concentrarse los esfuerzos por reducir las fuentes de cría de anofelinos. Varios trabajos demuestran que la disposición espacial de la malaria está altamente relacionada con la distancia a los criaderos y, por lo general, estas distancias son de apenas unos cientos de metros en zonas urbanas o con topografía irregular, donde la concentración de viviendas y la pendiente del terreno parecen limitar la dispersión de los anofelinos (Manga *et al.*, 1993; Sabatinelli, Rossi & Belli, 1986, Thompson *et al.*, 1997). Sin embargo, en algunas localidades (Ej.: Guayana, estado Sucre; Berti *et al.*, 1993a) los criaderos de *An. aquasalis* no parecen estar en tan estrecho contacto con las viviendas, por lo que sería apropiado realizar estudios de dispersión en esta especie.

Es interesante notar que si bien el número de casos de malaria estuvo asociado a las zonas urbanas, donde

se encuentra la mayor parte de la población humana (por encima del nivel umbral de densidad del hospedador), las mayores tasas de infección se localizaron en zonas boscosas o cercanas a manglares. Estas poblaciones están ubicadas principalmente en Nurucual, El Potrero y la Bodega. Planteamos la posibilidad de que este tipo de vegetación, aparte de contener algunos criaderos, pudiera promover la sobrevivencia o la longevidad del vector; otra variable importante usualmente estimada indirectamente a través de las tasas de paridad. En un estudio sobre la distribución de anofelinos criados en arrozales en California se encontró que las zonas con vegetación riparina y mixta, contenían mayor número de adultos que los campos de arroz o pastizales (Wekesa *et al.*, 1996). Dado que *An. aquasalis* reposa fuera de las casas en la vegetación adyacente (Berti *et al.*, 1993b), es posible que las áreas con vegetación más densa propicien la concentración de anofelinos y su longevidad, en comparación con zonas urbanas o con vegetación rala.

## RECOMENDACIONES

El carácter focal de la malaria ha sido evidenciado suficientemente (Ej.: Cuéllar, 1971). Sin embargo, el acelerado crecimiento de las poblaciones humanas, que es característico de las zonas donde la malaria es un problema, plantea el reto de mantenernos informados sobre las transformaciones ambientales que puedan cambiar la dinámica de la transmisión. Igualmente, la mayor conectividad que existe gracias a las facilidades del transporte determina que las distancias entre áreas maláricas y potencialmente maláricas se acorten, con la lógica amenaza de la re-infestación. En este sentido, el desarrollo de Sistemas de Información Geográfica y la investigación operacional son recomendadas como instrumentos para prevenir y para controlar la malaria en Venezuela.

Específicamente, en el caso del área de Santa Fe creemos que las variables necesarias para la transmisión malárica se encuentran activas, incluyendo la importación del parásito, ya que con frecuencia llegan personas infectadas de otras zonas del país. Una adecuada vigilancia epidemiológica que actúe interceptando estos casos importados es vital para evitar re-infecciones. Sin embargo, como lo plantean Collins & Paskewitz, (1995), la erradicación de la malaria de grandes partes del planeta ha sido más frecuentemente el resultado del mejoramiento de los estándares de vida de la población humana que de la aplicación de medidas activas de control. En este sentido, la eliminación permanente de los criaderos de anofelinos sería aconsejable. Basándonos en los criaderos más comunes de *An. aquasalis* en la zona de estudio recomendamos el manejo ambiental y obras de Ingeniería

Sanitaria como vías para eliminar permanentemente el riesgo de re-infestación con malaria. Algunos criaderos como charcos, huecos y depresiones que acumulen agua pueden ser rellenados, nivelados o drenados sin ocasionar perturbaciones ambientales al resto del ecosistema o a las comunidades humanas. Algunas colecciones de agua como tanques y manantiales pueden ser tratados con peces larvivoros autóctonos. Los criaderos ubicados en las márgenes de los ríos que cruzan los pueblos más importantes en la zona pueden ser tratados para eliminar la vegetación en contacto con el agua, ya que al eliminar todo objeto emergente se facilita la depredación natural (Ej.: otros insectos y peces) de los inmaduros de los anofelinos y otros mosquitos. Hall, (1972) discute diversas técnicas para el control de la vegetación acuática relacionada con la cría de anofelinos. Durante la época seca cuando los ríos se represan, sus bocas podrían mantenerse abiertas mediante el dragado (Paik, 1986). Con relación a los criaderos en manglares, nuestro estudio y otro en la zona de Paria sugieren que sólo el mangle negro proporciona las condiciones ambientales para la cría de anofelinos. Mediante estudios de campo o combinados con sensores remotos se podría delinear en mapas la exacta distribución de esta especie de manglar y los lugares donde se producen anofelinos. Estos ambientes acuáticos se pueden tratar con agentes biodegradables como el *Bacillus thuringiensis israelensis* (Zimmerman & Berti, 1994).

## SUMMARY

The objective of the study is the spatial and temporal analysis of malaria re-infestation of the Santa Fe area, Sucre State, through an eco-epidemiological approach and the use of a Geographical Information Systems (GIS) and remote sensing (Landsat TM). The GIS integrates epidemiological (malaria cases), meteorological (precipitation), geographical (relief, rivers, roads, buildings, land use, etc.), and entomological (preadult habitats) data. The results point out the following risk factors for malaria transmission: low altitude (<50 m), gentle slopes (<10%), houses less than 500 m from preadult habitats of *Anopheles aquasalis*, particularly next to rivers and canals, presence of forested or mangrove vegetation, urbanized areas and presence of tall grasses. The SIG was helpful at delimiting the areas of high risk for malaria transmission, thus application of this approach to other, current areas of malaria transmission, is recommended as a way to reduce operational costs. We suggest controlling *An. aquasalis* in the area as a way to prevent eventual re-infestations. Recommended control measures are based on environmental management of preadult vector habitats. An adequate surveillance of malaria cases is highly

advised since all the conditions for malaria re-infestation remain in the area.

**Key words:** Malaria, *Anopheles aquasalis*, ecology, Geographical Information, Systems, Landsat TM, control, Venezuela.

## AGRADECIMIENTOS

A los Dr. Robert Zimmerman (PAHO) y Dora Feliciangeli de Piñero (UC - MSAS) por su estímulo y apoyo durante la realización de este trabajo. Se agradece a las siguientes instituciones por colaborar con información vital para el estudio: MARNR-SICA, MTC, MSAS, MD - FAV y OCEI. A los Drs. S. Ramos y L. Delgado (IZT-UCV) por su valiosa participación en los inicios del proyecto, especialmente por supervisar y adecuar la digitalización de los mapas. Se agradece el entrenamiento recibido por MERTUG-CDC y CHAART - NASA - TWF.

## REFERENCIAS

- Beck L.R., Wood B.L. & Dister S.W. (1995). Remote sensing and GIS: New tools for mapping human health. *Geo Info Systems* Sept. 32-37.
- Beck L.R., Rodríguez M.H., Dister S.W., Rodríguez A.D., Rejmankova E., Ulloa A., Meza R.A., Roberts D.R., Paris J.F., Spanner M.A., Washino R.K., Hacker C. & Legters L.J. (1994). Remote sensing as a landscape epidemiologic tool to identify villages at high risk for malaria transmission. *Am. J. Trop. Med. Hyg.* 51:271-280.
- Beck L.R., Rodríguez M.H., Dister S.W., Rodríguez A.D., Washino R.K., Roberts D.R. & Spanner M.A. (1997). Assessment of a remote sensing-based model for predicting malaria transmission risk in villages of Chiapas, Mexico. *Am. J. Trop. Med. Hyg.* 56:99-106.
- Berti J., Zimmerman R. & Amarista J. (1993a). Spatial and temporal distribution of *anopheline larvae* in two malarious areas in Sucre State, Venezuela. *Mem. Inst. Oswaldo Cruz* 88:353-362.
- Berti J., Zimmerman R. & Amarista J. (1996b). Adult abundance, biting behavior and parity of *Anopheles aquasalis* Curry 1932 in two malarious areas of Sucre State, Venezuela. *Mem. Inst. Oswaldo Cruz* 88:363-369.
- Briggs D.J. & Elliott P. (1995). The use of Geographical Information Systems in studies on environment and health. *Wid. Hlth. Statist. Quart.* 48:85-94.
- Collins F.H. & Paskewitz S.M. Malaria: (1995). Current and future prospects for control. *Annu. Rev. Entomol.* 40:195-219.
- Croner C.M., Sperling J. & Broome F.R. (1996). Geographic Information Systems (GIS): New perspectives in understanding human health and environmental relationships. *Stat. Med.* 15: 1961-1977.
- Cuéllar C.B. (1971). Focality and spatial units of transmission in human malaria. *J. Trop. Med. Hyg.* 74:120-122.

- Gabaldón A. & Berti A.L. (1954). The first large area in the tropical zone to report malaria eradication: North-central Venezuela. *Am. J. Trop. Med. & Hyg.* 3:793-807.
- Hay S.I., Tucker C.J., Rogers D.J. & Packer M.J. (1996). Remotely sensed surrogates of meteorological data for the study of the distribution and abundance of arthropod vectors of disease. *Ann. Trop. Med. Parasitol.* 90:1-19.
- Hall T.F. (1972). The influence of plants on anopheline breeding. *Am. J. Trop. Med. Hyg.* 21:787-793.
- Liebold A.M., Rossi R.E. & Kemp W.P. (1993). Geostatistics and Geographical Information Systems in applied insect ecology. *Annu. Rev. Entomol.* 38:303-327.
- Macdonald G. (1957). The epidemiology and control of malaria. London. Oxford University Press., 210 p.
- Manga L., Fondjo E., Carnevale P. & Robert V. (1993). Importance of low dispersion of *Anopheles gambiae* (Diptera: Culicidae) on malaria transmission in hilly towns in south Cameroon. *J. Med. Entomol.* 30:936-938.
- Paik Y.H. (1986). Influence of stagnation of water pathways on mosquito population density in connection with malaria transmission in the Solomon Islands. *Japan. J. Exp. Med.* 57:47-52.
- Pope K.O., Rejmankova E., Savage H.M., Arredondo-Jiménez J.I., Rodríguez M.H. & Roberts, D.R. (1994). Remote sensing of tropical wetlands for malaria control in Chiapas, Mexico. *Ecol. Appl.* 4:81-90.
- Rejmankova E., Roberts D.R., Pawley A., Manguin S. & Polanco J. (1995). Predictions of adult *Anopheles albimanus* densities in villages based on distances to remotely sensed larval habitats. *Am. J. Trop. Med. Hyg.* 53: 482-488.
- Roberts D.R., Paris J.F., Manguin S., Harbach R.E., Woodruff R., Rejmankova E., Polanco J., Wulschlegel B. & Legters, L.J. (1996). Predictions of malaria vector distribution in Belize based on multispectral satellite data. *Am. J. Trop. Med. Hyg.* 54:304-308.
- Sabatini G., Bosman A., Lamizana L. & Rossi P. (1986). Prévalence du paludisme à Ouagadougou et dans le milieu rural limitrophe en période de transmission maximale. *Parassitologia* 28:17-31.
- Sabatini G., Rossi P. & Belli A. (1986). Etude sur la dispersion d'*Anopheles gambiae* s.l. dans une zone urbaine à Ouagadougou (Burkina Faso). *Parassitologia* 28:33-39.
- Scholten H.J. & de Lepper, M.J.C. (1991). The benefits of the application of Geographical Information Systems in public and environmental health. *Wld. Hlth. Statist. Quart.* 44:160-170.
- Thomson M.C., Connor S.J., Milligan P.J.M. & Flasse, S.P. (1996). The ecology of malaria as seen from earth-observation satellites. *Am. Trop. Med. Parasitol.* 90:243-264.
- Thompson R., Begtrup K., Cuamba N., Dgedge M., Mendis C., Gamage-Mendis A., Enosse S.M., Barreto J., Sinden R.E. & Hogh B. (1997). The Matola malaria project: A temporal and spatial study of malaria transmission and disease in a suburban area of Maputo, Mozambique. *Am. J. Trop. Med. Hyg.* 57:550-559.
- Washino R.K. & Wood B.L. (1994). Application of remote sensing to arthropod vector surveillance and control. *Am. J. Trop. Med. Hyg.* 50:134-144.
- Wekesa J.W., Yuval B.Y. & Washino R.K. (1996). Spatial distribution of adult mosquitoes (Diptera: Culicidae) in habitats associated with the rice agroecosystem of Northern California. *J. Med. Entomol.* 33:344-350.
- Wood B.L., Beck L.R., Washino R.K., Hibbard K.A. & Salute, J.S. (1992). Estimating high mosquito-producing rice fields using spectral and spatial data. *Int. J. Remote Sens.* 13:2813-2826.
- Wood B.L., Beck L.R., Washino R.K., Palchick S.M. & Sebesta P.D. (1991). Spectral and spatial characterization of rice field mosquito habitat. *Int. J. Remote Sens.* 12:621-626.
- World Health Organization. (1995) Vector control for malaria and other mosquito-borne diseases: Report of a WHO study group. WHO Technical Report Series 857.
- Zimmerman R. & Berti J. (1994). The importance of integrated control of malaria for the preservation of wetlands in Latin America. Mitsch WJ, ed. *Global wetlands: Old world and new*. Amsterdam: Elsevier Science B.V., 797-803.