

VEREDICTO

Quienes suscriben, integrantes del jurado designado por el Consejo de Estudios de Postgrado de la Universidad de los Andes para conocer y emitir veredicto sobre el **Trabajo de Grado de Maestría** presentado por **Sulbarán Romero José Enrique**, realizado bajo la tutoría del **Dr. Eulogio Chacón Moreno** y **cotutor Dr. Elis Aldana** presentado como requisito parcial para optar al título de **Magíster Scientiae en Ecología Tropical**, que se titula:

“Modelo de distribución Espacial Hábitat de Triatominos y Zonas de Riesgo de la enfermedad de Chagas en los municipios Andres Bello y Mórán del Estado Lara, Venezuela”

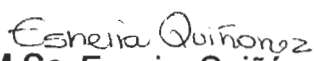
Hacen constar lo siguiente:

PRIMERO: que hoy 11 de noviembre de 2009 a las 10:00 a.m., nos constituimos como jurado en el salón de reuniones del Postgrado en Ecología Tropical, siendo el Presidente del Jurado el Dr. Eulogio Chacón Moreno. **SEGUNDO:** a continuación procedimos a discutir si se lleva a cabo su defensa pública. Luego de considerar las observaciones críticas de cada miembro del jurado, acordamos por unanimidad autorizar su presentación. **TERCERO:** A las 10:30 a.m. de éste mismo día, se dio curso al Acto Público de sustentación del Trabajo de Grado de Maestría presentado a requerimiento del jurado en el Salón A-10 de la Facultad de Ciencias. **CUARTO:** Una vez concluida la sustentación correspondiente, el jurado interrogó a la aspirante sobre los diversos aspectos a que el Trabajo se refiere. **QUINTO:** Seguidamente el Presidente del Jurado invitó al público asistente a formular preguntas y observaciones sobre el Trabajo presentado. **SEXTO:** Una vez concluido el acto de presentación y discusión, el jurado procedió a su deliberación final y decidió aprobar el Trabajo de Grado de Maestría a nuestra consideración.


Dr. Eulogio Chacón Moreno
Tutor


Dra. Magdiel Ablan
Jurado




M.Sc. Esneira Quiñonez
Jurado


Dr. Samuel Segnini
Jurado



CIENCIAS

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES

MÉRIDA VENEZUELA

Modelo de distribución espacial del hábitat de Triatomíneos y zonas de riesgo de la enfermedad de Chagas en los municipios Andrés Bello y Morán del estado Lara, Venezuela.



Trabajo de grado presentado por:
Lic. José Enrique Sulbarán Romero
Para optar al grado de
Magister Scientiae en Ecología Tropical.
Tutor: Dr. Eulogio Chacón Moreno
Co-Tutor: Dr. Elis Aldana
Mérida, Noviembre de 2009.



Modelo de distribución espacial del hábitat de Triatominos y zonas de riesgo de la enfermedad de Chagas en los municipios Andrés Eloy Blanco y Morán del estado Lara, Venezuela.

Lic. José Enrique Sulbarán Romero  * 

Resumen: La dinámica de transmisión de la enfermedad de Chagas depende en un alto grado de la distribución del hábitat del vector (Triatominae), de los cambios ambientales de origen antropogénico y de los cambios globales, entre otras variables. Los Triatominae son insectos hematófagos, bien conocidos por su capacidad de transmitir al protozooario *Trypanosoma cruzi* agente etiológico de la enfermedad. En el presente trabajo se plantea un enfoque predictivo para la localización del hábitat de los Triatominos, a través de la integración de información bibliográfica acerca de las variables ecológicas del hábitat en un modelo espacialmente explícito, a través del uso de análisis y reconocimiento ecológico, información de sensores remotos, sistemas de información geográfica, geoestadística y técnicas de la ecología del paisaje. Este enfoque metodológico se basa en la caracterización ecológica detallada del área de estudio, principalmente a través de mapas de distribución de las variables: uso del suelo, ecosistemas, precipitación, temperatura, bioclima, altitud, centros poblados, vialidad, hidrografía, etc. El área de estudio esta conformada por los municipios Andrés Eloy Blanco y Morán al sur del estado Lara, Venezuela. El enfoque metodológico propuesto permitió combinar algunos rasgos de la ecología y el comportamiento de los Triatominos para describir como las áreas, en donde las condiciones biofísicas y ecológicas para la existencia de los insectos están dadas, se distribuyen a través del área de estudio y como la interacción de estas con los asentamientos humanos y sus actividades inherentes, se traducen en diferentes condiciones de transmisión. El uso de sistemas de información geográfica permitió la integración de las variables y el diseño de dos modelos potenciales de distribución: Biofísico y modelo de intervención, así como el desarrollo del índice ecológico de riesgo potencial de transmisión vectorial de la enfermedad de Chagas (IER) en 117 centros poblados en el área de estudio.

Palabras Clave: Análisis Espacial, Hábitat, Triatominae, Epidemiología del Paisaje, Enfermedad de Chagas, Ecología de Enfermedades Infecciosas, Índice Ecológico de Riesgo.

Trabajo financiado por:

Fundayacucho: Beca de postgrado nacional 2006-2008.

Fundacite Lara: Contrato de Investigación

CDCHT-ULA: Proyecto C-1567-08-01-EM


Bajo la supervisión de:

Dr. Eulogio Chacón Moreno* y

Dr. Elis Aldana 

 sulbarán@ula.ve; enriquesulbarán@gmail.com; kikesulb@yahoo.com; kike90@hotmail.com

* Postgrado en Ecología Tropical, Programa de Maestría, Instituto de Ciencias Ambientales y Ecológicas (ICAE), Facultad de Ciencias, Universidad de Los Andes. Mérida 5101, Venezuela.

 Laboratorio de Entomología "Herman Lent", Departamento de Biología, Facultad de Ciencias, Universidad de Los Andes. Mérida 5101, Venezuela.

Republica Bolivariana de Venezuela
Universidad de Los Andes
Facultad de Ciencias
Instituto de Ciencias Ambientales y Ecológicas
Postgrado en Ecología Tropical

Modelo de distribución espacial del hábitat de Triatominos y zonas de riesgo de la enfermedad de Chagas en los municipios Andrés Eloy Blanco y Morán del estado Lara, Venezuela.

Trabajo de grado presentado por el licenciado en biología:

José Enrique Sulbarán Romero

Para optar al grado de

Magister Scientiae en Ecología Tropical.

Tutor: Dr. Eulogio Chacón Moreno

Co-Tutor: Dr. Elis Aldana

Mérida, Venezuela, Noviembre de 2009.

Dedicado a Venezuela

“La independencia de los pueblos hoy en día, solo puede ser alcanzada a través de la independencia científica y tecnológica”

Anónimo

Agradecimientos

Personales:

- Tesistas en ecología del paisaje: Alma Ulloa y Patricia Suárez.
- Asistentes de campo: Luis Monsalve y Alma Ulloa.
- Familia Sulbarán Romero (Mamá, Papá y María).
- Yarúa Jaimes ;)
- Tutores: Eulogio Chacón y Elis Aldana.
- Cohorte 2006-2008 PET: Wilmer, Carmen, Alma, Roxi, Harold, Caribay, Miguel, Hamleth, Maya.
- Familia Jaimes Becerra.
- Prof. Néstor Añez, Dr. Luis Chaves, M.Sc. Julia K. Smith y M.Sc. Edwin Barrios.

Institucionales:

- Ilustre Universidad de Los Andes, Facultad de Ciencias.
- Instituto de Ciencias Ambientales y Ecológicas (ICAE), Postgrado en Ecología Tropical (PET): Planta Profesoral, Personal administrativo y técnico.
- Laboratorio de Entomología "Herman Lent", Departamento de Biología de la Universidad de Los Andes.
- Consejo de Estudios de Postgrado de la Universidad de Los Andes (CEP-ULA).
- Fundación Gran Mariscal de Ayacucho (Fundayacucho).
- Fundación para el desarrollo de la Ciencia y la Tecnología del Estado Lara (Fundacite-Lara).
- Consejo de Desarrollo Científico, Humanístico y Tecnológico de la Universidad de Los Andes (CDCHT-ULA).
- Prof. Luis Mora, Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial de la Universidad de Los Andes (CIDIAT-ULA).
- Dr. Rafael Bonfante Cabarcas, Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado.
- Medizinische Hochschule Hannover Bibliothek (MHH).

Resumen: La dinámica de transmisión de la enfermedad de Chagas depende en un alto grado de la distribución del hábitat del vector (*Triatominae*), de los cambios ambientales de origen antropogénico y de los cambios globales, entre otras variables. Los *Triatominae* son insectos hematófagos, bien conocidos por su capacidad de transmitir al protozooario *Trypanosoma cruzi* agente etiológico de la enfermedad. En el presente trabajo se plantea un enfoque predictivo para la localización del hábitat de los Triatominos, a través de la integración de información bibliográfica acerca de las variables ecológicas del hábitat en un modelo espacialmente explícito, a través del uso de análisis y reconocimiento ecológico, información de sensores remotos, sistemas de información geográfica, geoestadística y técnicas de la ecología del paisaje. Este enfoque metodológico se basa en la caracterización ecológica detallada del área de estudio, principalmente a través de mapas de distribución de las variables: uso del suelo, ecosistemas, precipitación, temperatura, bioclima, altitud, centros poblados, vialidad, hidrografía, etc. El área de estudio esta conformada por los municipios Andrés Eloy Blanco y Morán al sur del estado Lara, Venezuela. El enfoque metodológico propuesto permitió combinar algunos rasgos de la ecología y el comportamiento de los Triatominos para describir como las áreas, en donde las condiciones biofísicas y ecológicas para la existencia de los insectos están dadas, se distribuyen a través del área de estudio y como la interacción de estas con los asentamientos humanos y sus actividades inherentes, se traducen en diferentes condiciones de transmisión. El uso de sistemas de información geográfica permitió la integración de las variables y el diseño de dos modelos potenciales de distribución: Biofísico y modelo de intervención, así como el desarrollo del índice ecológico de riesgo potencial de transmisión vectorial de la enfermedad de Chagas (IER) en 117 centros poblados en el área de estudio.

Palabras Clave: Análisis Espacial, Hábitat, *Triatominae*, Epidemiología del Paisaje, Enfermedad de Chagas, Ecología de Enfermedades Infecciosas, Índice Ecológico de Riesgo.

Abstract: *The transmission of vector-borne diseases is highly dependent on the habitat distribution of the vector, the anthropogenic environmental changes and the global changes. Triatominae is a subfamily of haematophagous insects, well known for its capacity to act as a transmission vector of the zooflagellate protozoan Trypanosoma cruzi, the etiological agent of Chagas Disease or American Trypanosomiasis. There are 100 million people under risk of infection with T. cruzi in Latin America. We purpose a new predictive approach for Triatominae habitat location, integrating the existing bibliographical information about the ecological variables from Triatominae habitat, together with tools as a spatial explicit model via ecological analysis, remote sensed data, geographic information systems, geostatistics and landscape ecology techniques. This methodological approach is based on the detailed ecological description of study area, mostly through variable distribution maps including: land cover, ecosystems, land use, temperature, rainfall, bioclimatic classification, altitude, hydrology, urban areas and roads, among other parameters. The study area comprises two counties of Lara State, in the Middle East from Venezuela. This approach permit us to integrate some of the most important factors described for Triatominae ecology and behavior in order to depict how areas, in which the ecological and bio-physic condition required for the insects to exists, are distributed all over the study area, how its interaction with human settlements and inherent activities and under global climate change scenarios, represent different transmission circumstances. Applying Geographic Information System operations we were able of integrating the information and designing four potential distribution models: Bio-physic model, intervention (or land use) model, risk zones / risk urban areas model (Ecological index of potential risk for the vector transmission of Chagas disease –IER-).*

Keywords: *Spatial analysis, habitat, disease ecology, landscape epidemiology, Triatominae, Chagas disease, Ecologic risk index.*

Índice General

Resumen	i
Abstract	ii
Índice general	iii
Índice de tablas	vi
Índice de figuras	vii
Capítulo I. Introducción	1
1.1 Introducción	2
1.1.1 Justificación	2
1.1.2 Planteamiento del Problema	4
1.1.3 Objetivo general	5
1.1.4 Objetivos específicos	5
1.1.5 Estructura de la tesis	5
1.2 Antecedentes	6
1.2.1 La enfermedad de Chagas y su transmisión	6
1.2.2 Modelos	9
Capítulo II. Caracterización ecológica y climática espacial del área de estudio	11
2.1 Introducción	12
2.1.1 Problemática	12
2.1.2 Sensores remotos y sistemas de información geográfica	13
2.1.3 Clima	14
2.1.4 Bioclimatología	16
2.2 Metodología	18
2.2.1 Área de estudio	18
2.2.1.a Estado Lara	18
2.2.1.b Municipio Andrés Eloy Blanco	19
2.2.1.c Municipio Morán	20
2.2.1.d Determinación del área de estudio	21
2.2.2 Caracterización de las variables	22
2.2.2.a Precipitación	22
Preparación de los datos	23
Correlación especial	24

Interpolación de puntos (Kriging)	25
2.2.2.b Temperatura	26
Preparación de los datos	27
Regresiones altotérmicas	27
2.2.2.c Bioclima	29
Preparación de los datos	29
2.2.2.d Cobertura y Ecosistemas	30
Clasificación	31
Edición	32
2.2.2.e Vialidad, Hidrografía y Urbanismo	34
2.3 Resultados	34
2.3.1 Distribución de la precipitación	35
2.3.2 Distribución de la temperatura	37
2.3.3 Distribución del bioclima	39
.....	
2.3.4 Distribución de cobertura y ecosistemas	41
2.3.5 Distribución de la vialidad, hidrografía y centros poblados	46
2.4 Discusión	51
Capítulo III. Modelo de distribución espacial del hábitat de	
Triatomino	55
3.1 Introducción	56
3.1.1 Problemática	56
3.1.2 Ecología y hábitat de los Triatomino	56
3.1.3 Hábitat y Modelos	63
3.2 Metodología	65
3.2.1 Formulación del modelo teórico	65
3.2.2 Modelo Biofísico	66
3.2.3 Modelo de intervención o de uso de la tierra	66
3.2.4 Modelo de dispersión	67
3.3 Resultados	68
3.3.1 Modelo teórico o bibliográfico	68
3.3.2 Distribución del modelo biofísico	71
3.3.3 Distribución del modelo con intervención o uso de la tierra	73
3.3.4 Distribución del modelo de dispersión de los insectos	75
3.4 Discusión	76

Capítulo IV. Índice ecológico de riesgo potencial de transmisión vectorial de la enfermedad de Chagas	82
4.1 Introducción	83
4.1.1 Problemática	83
4.1.2 Ecología de enfermedades infecciosas	83
4.1.3 Índices y factores de riesgo	86
4.2 Metodología	87
4.2.1 Subíndice bioclima (sB)	88
4.2.2 Coeficiente de fragmentación del paisaje (cF)	89
4.2.3 Promedio ponderado de la intervención humana (pl)	90
4.2.4 Subíndice de cobertura en el centro poblado (sP)	92
4.2.5 Subíndice de dispersión de insectos (sD)	93
4.2.6 Índice ecológico de riesgo potencial de transmisión vectorial	94
.....	
4.2.7 Caracterización de los centros poblados de acuerdo al IER	96
4.3 Resultados	96
4.3.1 Mapa de clasificación del IER de los centros poblados	97
4.4 Discusión	100
Capítulo V. Discusión, conclusiones generales y Referencias bibliográficas	104
5.1 Discusión y conclusiones generales	105
5.2 Referencias Bibliográficas	110
.....	
5.2.1 Referencias WEB	120

Índice de tablas

Tabla 1. Ecuación de la recta ajustada para las regresiones allotérmicas de temperatura media, máxima media y mínima media	28
Tabla 2. Datos de las imágenes Landsat utilizadas para la caracterización espacial de la vegetación	30
Tabla 3. Grandes unidades fisiográficas a las que se encuentran asociadas tres especies de Triatomino naturalmente	63
Tabla 4: Parámetros biofísicos en base a los cuales se desarrollo el modelo biofísico	66
Tabla 5: Distancias consideradas para cada tipo de vegetación o cobertura en el modelo de dispersión	67
Tabla 6. MODELO BIBLIOGRÁFICO O TEORICO: Síntesis de los factores bióticos y abióticos (tipos y rangos) reportados en la bibliografía como de gran importancia para el hábitat de los Triatomino	68
Tabla 7: Valores del subíndice bioclima asignado a cada tipo de bioclima	88
Tabla 8: Valores asignados a cada unidad de cobertura natural (uNi) y de intervención (uIi), para el cálculo del promedio ponderado e la intervención humana o uso de la tierra (pI)	91
Tabla 9. Valores del subíndice cobertura en el punto (sP) asignado a cada tipo de cobertura	92
Tabla 10. Valores del subíndice de dispersión de insectos (sD) asignados a cada tipo de cobertura	93
Tabla 11. Valores del coeficiente de correlación lineal, coeficiente de correlación R^2 y covarianza entre los factores empleados para el calculo del IER	94
Tabla 12. Intervalos de clasificación de riesgo potencial de acuerdo a los valores del IER	95

Índice de figuras

Figura 1. Ubicación geográfica del área de estudio en el contexto Nacional, Estatal y Municipal	18
Figura 2. División político-territorial del municipio Andrés Eloy Blanco y las parroquias que lo conforman	20
Figura 3. División político-territorial del municipio Morán y las parroquias que lo conforman	21
Figura 4. Área de estudio determinada a partir de la cota actitudinal de 1800m y los límites políticos de los municipios Andrés Eloy Blanco y Morán	22
Figura 5. Distribución de las estaciones meteorológicas dentro del radio de 80Km alrededor del área de estudio	23
Figura 6. Semivariograma de la precipitación media anual para distancias crecientes de separación de las estaciones meteorológicas seleccionadas	24
Figura 7. Semivariograma con los parámetros Nugget = 0; Sill = 600000 y Range = 65000	26
Figura 8. Regresiones de Altitud Vs. Temperatura con rectas ajustadas	28
Figura 9. Imágenes de satélite recortadas definitivas	31
Figura 10. Imágenes clasificadas a través de la clasificación supervisada y filtradas estadísticamente (7x7)	32
Figura 11. Imágenes clasificadas preliminares asociadas a un dominio de clases con su respectiva representación	33
Figura 12. Mapas de atributos con la nueva clasificación realizados a partir de la tabla de atributos creada y del mapa de zonificación	33
Figura 13. Distribución de la precipitación del área de estudio producto de la interpolación de puntos (kriging)	35
Figura 14. Distribución de la temperatura media en el área de estudio a partir de la regresión altotérmica	37
Figura 15. Clasificación bioclimática del área de estudio a partir del cálculo de los índices Io e Iod2	39
Figura 16. Distribución de coberturas del área de estudio a partir de la clasificación supervisada de imágenes Landsat	41
Figura 17. Distribución de ecosistemas en el área de estudio	43

Figura 18. Vialidad (carreteras principales, secundarias y troncales) en el área de estudio	46
Figura 19. Hidrografía (principales cursos de agua) en el área de estudio	48
Figura 20. Urbanismo, se observan los 117 centros poblados (Caseríos, aldeas y pueblos) estudiados en el área de estudio	50
Figura 21. Superficie del área de estudio ocupada por cada tipo de cobertura ...	52
Figura 22. Superficie del área de estudio ocupada por cada tipo de cobertura ...	53
Figura 23. Distribución espacial potencial del hábitat de los Triatomíneos de acuerdo al modelo biofísico	71
Figura 24. Distribución espacial potencial del hábitat de los triatomíneos de acuerdo al modelo con intervención o uso de la tierra	73
Figura 25. Distribución del modelo de dispersión para cada tipo de cobertura ...	75
Figura 26. Superficie del área de estudio, cubierta por el modelo biofísico y el modelo con intervención o uso de la tierra	78
Figura 27. Distribución de los centros poblados clasificados de acuerdo a su valor particular del IER por las categorías de riesgo ecológico potencia	97
Figura 28. Número y porcentaje de centros poblados por categoría de riesgo del IER en el municipio Andrés Eloy Blanco	98
Figura 29. Número y porcentaje de centros poblados por categoría de riesgo del IER en el municipio Morán	99
Figura 30. Número y porcentaje de centros poblados por categoría de riesgo del IER en toda el área de estudio	100

Capítulo I

Introducción

1.1 Introducción

El estudio de las enfermedades transmitidas por vectores requiere del trabajo concertado de diferentes disciplinas científicas. Tal es el caso de la enfermedad de Chagas, dolencia causada por el parásito *Trypanosoma cruzi* y transmitida por una subfamilia de insectos hematófagos (Triatominae) que afecta a gran parte de los habitantes del continente americano. Se ha demostrado que el punto de control más efectivo para la prevención del contagio con esta enfermedad, es aquel realizado sobre los insectos vectores ya que no existen, a pesar de los grandes avances en el área, tratamientos farmacológicos efectivos en su fase aguda. Así el conocimiento y la caracterización tanto del hábitat como de la distribución de los triatominos son necesarios para emprender cualquier estudio o medida de control.

En Venezuela existen varias zonas endémicas para esta enfermedad, en las que aparentemente ha ocurrido un resurgimiento de la misma. En el presente trabajo se propone a partir del análisis espacial y la relación entre las variables ecológicas y la distribución de los vectores tanto en el medio silvestre como en los asentamientos humanos, la construcción de un modelo espacial del hábitat de los triatominos como factor de riesgo para la transmisión de la enfermedad.

Dicho modelo puede contribuir en la planificación de medidas de control; fumigación, mejora de la vivienda rural, jornadas de concientización y educación entre otras, así como en la toma de decisiones por parte de los servicios de atención sanitaria en la determinación de zonas clave donde concentrar los esfuerzos.

1.1.1 Justificación

En América Latina existen cerca de treinta millones de personas en riesgo de ser infectadas con *T. cruzi*, se ha estimado que hay aproximadamente quince millones de personas infectadas (Guhl y Lazdins-Helds, 2007), y de éstos, del 20% al 30% presentan manifestaciones clínicas

de la enfermedad (Traviezo y Bonfante-Garrido, 2004). En Venezuela existen aproximadamente 6 millones de personas en riesgo de infección. En el año 2000 el índice de seroprevalencia fue de 8.3 % y el índice entomológico incrementó de 0.7 % en 1990 a 5.2 % en el 2000 (PAHO, 2007).

R. prolixus, considerado el vector principal en Venezuela ha sido encontrado en el 79,1% de los municipios de Venezuela, ocupando un área de 650.789,1Km², es decir el 71,1% del territorio nacional, con una población en riesgo de 14.203.395 habitantes o el 72% de la población (Rodríguez-Bonfante, *et al.*, 2007).

Los esfuerzos orientados al desarrollo de fármacos para la cura de esta enfermedad han presentado, según Urbina (1999), grandes avances sobre todo para el tratamiento de la fase crónica, sin embargo se ha demostrado que la forma de control más efectiva para la disminución de la incidencia de este mal, es aquella que se realiza sobre los insectos vectores (Schofield y Dujardin, 1997), tales son los casos de Chile y Uruguay, donde la transmisión vectorial ha sido interrumpida (WHO, 2002).

Se ha propuesto la erradicación total de la transmisión de ésta enfermedad para el año 2010 (Visschedijk y Siméant, 1998), Sin embargo, al observar la re-emergencia de la enfermedad de Chagas, así como de otras endemias y sus causas, se hace evidente en primer lugar, la necesidad de un cambio en las políticas de salud pública de los países que, al dar por sentada la erradicación de las mismas, han disminuido los recursos destinados para medidas preventivas, monitoreo, vigilancia epidemiológica, infraestructura y personal (Gubler, 1998; Añez, 2003; Scorza, 2004). Y en segundo lugar, los cambios en el uso de la tierra y la expansión de las fronteras urbanas y agrícolas hacia zonas silvestres, traen como consecuencia una mayor frecuencia en los reportes de invasiones domiciliarias por nuevas especies de triatomos (Almeida *et al.*, 2000; Soto Vivas *et al.*, 2001; Feliciangeli, *et al.*, 2004; Añez *et al.*, 2005; Vásquez *et al.*, 2005). Así pues el panorama de erradicación e incluso de control, se dificulta haciendo que el objetivo se sitúe actualmente más lejos de lo pensado.

Los cambios temporales y espaciales de temperatura, precipitación y humedad que de acuerdo a los diferentes escenarios del cambio climático global, afectarán la biología y ecología de los vectores podrían incrementar el riesgo de transmisión (Githeko *et al.*, 2001).

Es requerido con urgencia un enfoque capaz de integrar las variables involucradas en la dinámica de las enfermedades transmitidas por vectores, las cuales son parte de la amplia actividad global. Sin embargo, la falta de herramientas que puedan integrar los sistemas físicos y sociales, se hacen evidentes, generando cierta frustración e incapacidad en los investigadores involucrados en dicha temática, tal y como evidenció la "Declaración de Ámsterdam para el cambio climático" (Sutherst, 2004).

Existe la necesidad de desarrollar metodologías y herramientas que contribuyan a monitorear y prever la dinámica de estas endemias en tales escenarios. En tal sentido, la Red Global de la Organización Mundial de la Salud (OMS) para la eliminación de la enfermedad de Chagas, enfatiza – entre otras cosas- la importancia del fortalecimiento de la vigilancia epidemiológica y de los sistemas de información (WHO, 2007).

En el taller del cono sur sobre la enfermedad de Chagas (OMS, 2003) se recomienda la incorporación de los sistemas de información geográfica y la información proveniente de sensores remotos, introduciendo variables espacio-temporales para la caracterización de la situación a escala regional. En tal sentido existe un marco para el desarrollo del presente trabajo.

1.1.2 Planteamiento del Problema

En Venezuela el estado Lara es considerado como una zona endémica para la enfermedad de Chagas. En zonas rurales de esta entidad, tanto la incidencia como la prevalencia de la infección con *T. cruzi* sobrepasan a la media nacional (Travieso & Bonfante-Garrido, 2004). Las características socio-económicas de la región son complejas y se intensifican con la prevalencia de esta enfermedad, la cual podría ser monitoreada de forma mas eficiente a través de modelos espaciales como el que se plantea en este

trabajo y así generar una plataforma lógica para la toma de decisiones en las instancias pertinentes, bajo diferentes escenarios, ecológicos, sociales, epidemiológicos y climáticos.

1.1.3 Objetivo general

Determinar, a partir de la integración de información bibliográfica con el análisis espacial, la distribución espacial del hábitat de triatominos (Heteroptera: Reduviidae: Triatominae), como factor de riesgo para la transmisión de la enfermedad de Chagas, en los municipios Morán y Andrés Eloy Blanco del estado Lara.

1.1.4 Objetivos específicos

- Caracterizar espacialmente en el área de estudio las variables ecológicas: Temperatura, Precipitación, Ecosistemas, Bioclima, Cobertura, etc. mediante el uso de un sistema de información geográfica.
- Formulación de un modelo teórico a través de la determinación de las características climáticas, ambientales y biofísicas más importantes del hábitat natural de los triatominos a través del estudio de su ecología, mediante revisión bibliográfica.
- Formular modelos espacialmente explícitos de la distribución del hábitat de los Triatominos a través de la disposición espacial de la información del modelo teórico con el uso de un sistema de información geográfica.
- Formular un índice ecológico de riesgo de transmisión vectorial de la enfermedad de Chagas en los centros poblados del área de estudio, a través del análisis climático y ecológico del paisaje.

1.1.5 Estructura de la tesis

El presente trabajo esta estructurado en cinco capítulos. En el capítulo actual (capítulo I) se realiza una introducción general al trabajo, se presentan

en él los objetivos, la justificación y el planteamiento del problema, así como un marco teórico. En el capítulo II se presenta un marco teórico específico del tema tratado y los métodos empleados para la caracterización ecológica del área de estudio que es uno de los principales insumos para la construcción del modelo de distribución de hábitat de los Triatominos.

En el capítulo III se desarrolla un marco teórico específico que contiene elementos teóricos en los cuales se basa la construcción de los modelos, además se desarrolla el modelo bibliográfico o teórico, el cual al ser integrado con la caracterización ecológica del área de estudio permite la construcción de los modelos de distribución de hábitat de los Triatominos. En el IV Capítulo se desarrolla el Índice ecológico de riesgo potencial de transmisión vectorial de la enfermedad de Chagas, también se muestra el marco teórico y la metodología empleada para su construcción. En el Capítulo V, se hace una breve discusión general del trabajo y se muestran las referencias bibliográficas utilizadas a lo largo del mismo.

1.2 Antecedentes

1.2.1 La enfermedad de Chagas y su transmisión

La enfermedad de Chagas (o Tripanosomiasis Americana), descrita por el médico brasileño Carlos Chagas en 1909, es una patología autóctona del continente americano cuyo agente etiológico es el parásito zooflagelado *Trypanosoma cruzi*, existen varias formas de transmisión del parásito: congénita, transfusional, oral, accidental y *vectorial*, esta última es la más importante en Venezuela y es llevada a cabo por insectos hematófagos de la subfamilia Triatominae (Service, 1996; Moncayo, 2003). La enfermedad de Chagas es una zoonosis muy compleja. En su cadena de transmisión interviene un gran número de reservorios vertebrados y de insectos triatominos vectores que han impedido su erradicación (Guhl y Lazdins-Helds, 2007). Los triatominos son conocidos en Venezuela como "chipos",

“barbeiros” en Brasil, “vinchucas” en Uruguay y Argentina; “chipa” en Colombia y “chinche” en Costa Rica (Zeledón y Rabinovich, 1981).

Los antiguos paradigmas acerca de la transmisión del parásito indican que ésta se da principalmente, entre las personas que viven en condiciones de pobreza en asentamientos rurales, debido al alto riesgo de exposición a los insectos infectados (Vásquez *et al.*, 2004). Sin embargo, estos paradigmas han cambiado en la medida que se profundizan las investigaciones en el área. Existe evidencia de incrementos de la prevalencia de infección por *T. cruzi* y de la presencia de Triatominos en zonas urbanas en diferentes lugares de America Latina tales como: Corrientes-Argentina (Damborsky *et al.*, 2001); El Guamito-Venezuela (Felicangeli *et al.* 2004); Caracas, Miranda y Vargas en Venezuela (Reyes-Lugo y Rodríguez-Acosta, 2000; Carrasco *et al.* 2005); Mérida (Yucatán)-México (Guzmán-Tapia *et al.* 2007) y en Cochabamba-Bolivia (Medrano-Mercado *et al.*, 2008).

Los Triatominos (Heteroptera: Reduviidae) son una subfamilia de insectos hematófagos, su ciclo de vida es hemimetábola o incompleto por no presentar larvas ni pupas. Luego de la eclosión del huevo, del mismo emergen las ninfas, que pudieran ser definidas como adultos en miniatura. Las características biológicas y ecológicas de los Triatominos en todas las etapas del ciclo de vida son similares, éste consta de cinco estadios juveniles no alados e inmaduros sexualmente (ninfas) cuya alimentación al igual que los adultos es con sangre. Los Triatominos se alimentan sobre sus huéspedes, generalmente por la noche, en un proceso lento que puede durar varios minutos (Borrór, 1992; Service, 1996), es entonces cuando la transmisión del parásito tiene lugar. El triatomo infectado contamina con sus heces al hospedador durante y/o inmediatamente después de la ingesta de alimento (Gómez Núñez y Fernández, 1963; Aldana *et al.*, 2001).

Desde tiempos remotos es bien conocida la relación entre el clima y las enfermedades infecciosas, por ello este factor es determinante en su dinámica de transmisión (Sutherst, 2004). Burgos (1994), Curto de Casas (1994) y colaboradores, desarrollaron una metodología para el estudio de la influencia climática en la distribución espacial de las especies de triatominos,

correlacionando dos factores climáticos; el índice térmico o número total de días con temperaturas por encima de 20°C; y el índice de sequía o cantidad anual de la tensión de vapor que es pérdida para que la saturación de humedad sea alcanzada (déficit de saturación). Para ello utilizaron la información proveniente de diferentes estaciones climáticas y generaron una clasificación de las diferentes especies en relación, tanto al clima como a los biomas (Carcavallo, 1999).

Es bien conocido en todo el hemisferio que la forma más efectiva de control de esta enfermedad es el control vectorial. En Venezuela han existido diferentes programas liderados por entes gubernamentales, avocados al estudio y erradicación de la enfermedad de Chagas, algunos con mejores resultados que otros, sin embargo, la reaparición de zonas endémicas para esta enfermedad con la consecuente confirmación de nuevos casos de infección pone en alerta a todo el sistema de salud pública (Añez, 2003; Scorza, 2004).

Existen en nuestro país tres especies catalogadas como las más importantes, dada su capacidad vectorial, y que en orden de importancia son: *Rhodnius prolixus*, *Triatoma maculata* y *Panstrongylus geniculatus*. Los datos de seroprevalencia de la enfermedad de Chagas de los que se dispone en la actualidad son sub-reales dado que los mismos son obtenidos de algunas zonas endémicas y no de la totalidad, o por lo menos, la mayoría de los lugares. Los estados con mayor incidencia y considerados endémicos son: Barinas, Trujillo, Portuguesa, Guarico, Yaracuy, Carabobo, Sucre y Lara (Ramírez *et al.*, 2004).

El Ministerio del Poder Popular para la Salud de Venezuela reporta en la actualidad una incidencia del 4% y una prevalencia del 13% de esta infección en la población. En el Estado Lara la situación no es para nada diferente, de acuerdo a Rodríguez-Bonfante y colaboradores (2007) los despistajes serológicos realizados durante los últimos 5 años en la entidad, informan de frecuencias entre el 8% y el 14,1% en las áreas rurales.

Es necesario en medio de tal complejidad y diversidad de factores, enfrentar el problema con herramientas que permitan la integración, si bien

no de todos los factores, de la mayor cantidad posible de éstos, así pues, los sistemas de información geográfica se consideran como potentes herramientas de apoyo en el análisis de la situación de salud, en la vigilancia, planeamiento y evaluación de intervenciones en el sector salud (Vásquez, et al 2004).

En Venezuela existen iniciativas que parten del uso de sistemas de información geográfica para el estudio de enfermedades tales como: Malaria y Dengue así como de otras zoonosis (Barrera, 2000; Delgado *et al.* 2003; Osborn *et al.* 2004; Delgado *et al.* 2004).

1.2.2 Modelos

La definición de lo que es un modelo no es una cuestión trivial y se halla dentro de un debate que va, desde lo más teórico y filosófico, a lo más práctico y técnico. La real academia de la lengua española lo define como un “esquema teórico, generalmente en forma matemática, de un sistema o de una realidad compleja, que se elabora para facilitar su comprensión y el estudio de su comportamiento” (DRAE, 2009). De acuerdo con Levins (1966) los procesos naturales son demasiado complejos y heterogéneos para poder ser descritos con exactitud en todos los aspectos en el espacio y el tiempo, a través de modelos simples a pesar de la complejidad con la que estos se pudieran desarrollar. Sin embargo, Silvert (2000), asegura que el modelado es una de las actividades más universales y que los modelos pueden ser de vital importancia en muchos contextos científicos. Así pues, estas herramientas son desarrolladas y aplicadas con objetivos muy variados en todo el mundo.

En ciencia un modelo es una representación matemática, física o lógica de un sistema de fenómenos, entidades o procesos. Es una vista abstracta simplificada de la realidad. Por otra parte un modelo empírico se refiere a cualquier tipo de modelado basado en observaciones empíricas mas que en relaciones matemáticamente descritas del sistema modelado (SEP, 2009).

Dentro de la ecología el uso de modelos basados en sistemas de información geográfica, es el análogo del modelado visual en otras ciencias. Los modelos basados en SIG constituyen representaciones visuales multidimensionales de los sistemas ecológicos. Es probable que dichas representaciones incorporen el entendimiento espacial necesario para que el modelado ecológico tome nuevas direcciones (Turner, 2005).

El presente capítulo es una antesala general que contribuye a la contextualización del problema abordado en el presente trabajo, se presentan aquí: la justificación, objetivos y antecedentes. La siguiente fase es entonces; la caracterización ecológica del área de estudio. La cual se llevara a cabo en el siguiente capítulo, a través de la implementación de diferentes técnicas de análisis espacial, uso de sistemas de información geográfica, geoestadística, etc., con la finalidad de espacializar una serie de variables ecológicas que posteriormente serán incorporadas al modelo de distribución del hábitat de los Triatominos.

Capítulo II

Caracterización ecológica y climática del área
de estudio

2.1 Introducción

2.1.1 Problemática

En vista de que el modelo de distribución espacial del hábitat de los Triatomíneos requiere que las variables biofísicas, ecológicas y antropogénicas en el área de estudio estén caracterizadas espacialmente, el principal objetivo de este capítulo es la caracterización de dichas variables. Debido a la importancia del componente espacial de los procesos ecológicos que determinan el hábitat de los insectos, es necesaria la utilización del enfoque de la ecología del paisaje a través de la aplicación de diversas herramientas entre las que destacan la geoestadística, los sistemas de información geográfica para la caracterización espacial de la precipitación, temperatura, altitud, bioclima, cobertura, vialidad, urbanismo, hidrología y ecosistemas. Respecto a esta última variable, además del enfoque metodológico antes mencionado, es necesario integrar el reconocimiento ecológico, el análisis espacial y la clasificación de imágenes satelitales Landsat para la obtención de un mapa de ecosistemas que contiene información tanto de estructura como de procesos ecológicos, lo cual hace que este sea más que un simple mapa de distribución de cobertura vegetal. En el presente capítulo se construirán los mapas de distribución de las variables, que posteriormente serán integrados en los modelos de distribución espacial de hábitat en el capítulo IV. Los mapas aquí desarrollados también podrán ser empleados en estudios posteriores como una base prospectiva.

2.1.2 Sensores remotos y sistemas de información geográfica

Los sensores remotos son dispositivos que permiten la adquisición de información de un fenómeno u objeto distante sin que sea necesario el contacto entre estos. Comúnmente estos son colocados en aviones, naves espaciales y/o satélites. Básicamente existen dos tipos de sensores remotos, aquellos que detectan la radiación emitida o reflejada por el objeto (luz, calor) en forma pasiva como las cámaras fotográficas, radiómetros o infrarrojos, y por otra parte están los sensores activos, los cuales emiten energía que les permite escanear los objetos y sus áreas circundantes y así detectar y medir la radiación reflejada o contra irradiada por el blanco, un ejemplo de un sensor remoto activo es el RADAR (Campbell, 2002; Richards & Jia, 2006).

Un sistema de información geográfica SIG (o GIS por sus siglas en ingles) es un sistema compuesto por un hardware y un software que facilita el desarrollo, mejoramiento y modelado de información espacialmente referenciada. Puede ejecutar algunas funciones analíticas, y permite al usuario analizar e interpretar datos debido a sus capacidades graficas en pantalla y de recuperación selectiva de información. Con la configuración adecuada los SIG pueden recrear sintéticamente o modelar un rasgo o fenómeno en función de otro relacionado (Hobbs, 1989; Aranoff, 1993; Meijerink *et al.* 1994). El alcance de está tecnología va mas allá de objetivos meramente cartográficos y su uso ha sido ampliamente usado en ecología, en temas como: Cambios en la vegetación a lo largo de gradientes, análisis de claros (Gap Analysis), optimización de la selección de lugares de siembra de especies maderables, creación de modelos predictivos matriciales jerárquicos, predicción de la distribución de especies animales y vegetales, cartografía de vegetación y cobertura vegetal, evaluación de riesgo ecológico para la adaptación de diferentes sitios de bosques en escenarios de cambio climático, elaboración de mapas de ecosistemas con base en el análisis de patrones temporales, creación de índices para la identificación de la ubicación mas probable de plantas medicinales en la amazonía, elaboración de mapas

de ecosistemas con fines divulgativos y de conservación, etc. (Bakker *et al.*, 1994; White *et al.* 1994; Cherril *et al.* 1995; Blackburn & Milton, 1996; Cadwell *et al.* 1996; Kienast *et al.* 1996; Mustalish *et al.* 1996; Sperduto & Congalton, 1996; Gooding *et al.* 1997; Johnston, 1998, Chacón-Moreno, 2004; Ulloa Quintero, 2005; Chacón-Moreno, 2007; Chacón-Moreno *et al.* 2008).

Una de las características prácticas más importantes de los sistemas de información geográfica es que permiten el procesamiento, interpretación y edición de las imágenes obtenidas de sensores remotos tales como LANDSAT, NOAA o SPOT.

El programa Landsat consta de una serie de misiones de satélite para la observación de la tierra es manejado en conjunto por la NASA y la agencia estadounidense para el reconocimiento geológico (USGS). Desde 1972 los satélites Landsat han colectado información de la superficie terrestre desde el espacio y tomando fotografías digitales especializadas de los continentes y las regiones costeras, permitiendo a profesionales especialistas en variadas disciplinas científicas, el estudio de muchos aspectos de nuestro planeta así como la dinámica de los cambios causados por procesos naturales y por la intervención humana, la utilización de este tipo de imágenes es muy común en la elaboración de mapas de cobertura, uso de la tierra actual y cambios en el mismo (Pax-Lenney *et al.*, 2001; Ruiz Díaz, 2005; Rodríguez, 2005; Suárez Peña, 2005; NASA, 2009)

2.1.3 Clima

El clima definido como el conjunto de valores promedio de los elementos o parámetros meteorológicos como la temperatura y la precipitación características de una región, es consecuencia de la relación (flujo de materia y energía) entre la atmósfera, la hidrosfera, la biosfera, la litosfera, etc. (Houghton *et al.*, 1996). Dichos valores promedio son obtenidos al recopilar la información meteorológica medida con el uso de

diferentes sensores en estaciones meteorológicas durante un periodo de tiempo prolongado. Es difícil predecir el comportamiento climático debido a que el mismo es un sistema complejo, dado que existen tendencias a largo plazo relacionadas con variaciones cíclicas naturales como las variaciones orbitales o el aumento de la radiación solar, por otra parte existen fluctuaciones caóticas ocasionadas por la interacción entre fuerzas potenciadoras y moderadas del clima y las retroalimentaciones entre estas (Linés Escardó, 1998).

Venezuela presenta un clima térmicamente uniforme a lo largo del año, dada su ubicación tropical las variaciones considerables en la temperatura únicamente están relacionadas con la altitud. Las fluctuaciones más importantes en cuanto al clima están determinadas por las precipitaciones que en las regiones más secas varía entre 200 y 700mm y en las regiones más húmedas entre 2000 y 3500mm. La gran mayoría del país presenta un clima tropical lluvioso. La temporada de lluvias se encuentra influenciada principalmente por el avance de la zona de convergencia intertropical, sin embargo, otros fenómenos como las depresiones y tormentas tropicales, ondas, vaguadas en pisos altos y restos de frentes húmedos provocan precipitaciones en otras épocas del año. La época seca está altamente influenciada por la alta presión del océano atlántico (MARN, 2005).

Los métodos para la representación cartográfica de variables climáticas, particularmente la temperatura y precipitación han ido cambiando a lo largo del tiempo con el desarrollo de los sistemas de información geográfica. En Venezuela, en la mayoría de los casos, la calidad de los datos compilados de las estaciones meteorológicas y a la distribución de las mismas hace difícil la aplicación de métodos tradicionales es por ello que la aplicación de los métodos basados en los SIG para tal propósito es muy útil, tal y como plantearon López Márquez y colaboradores (2001).

2.1.4 Bioclimatología

La fitoclimatología o Bioclimatología es una ciencia que estudia la relación entre el clima y la distribución de los seres vivos, en particular las relaciones entre los valores promedio de la precipitación y temperatura con las formaciones vegetales en la Tierra (WBCS, 2009). A lo largo de la historia han existido iniciativas para crear sistemas de clasificación bioclimática unificados para toda la tierra, tales son los casos de: Köppen (1918 y 1936), Thornthwaite (1931, 1933 y 1984), Gaussen (1955) Troll & Paffen (1964), Holdridge (1967), Walter (1954, 1970 y 1985) y Box (1981). Sin embargo, a pesar de su uso práctico y su amplia aceptación estas clasificaciones no logran explicar una serie de fenómenos que se suceden en algunas regiones de la tierra (WBCS, 2009).

En tiempos más recientes en el centro de investigaciones fitosociológicas de España se ha venido desarrollando una nueva clasificación bioclimática de la Tierra: "World Bioclimatic Classification System", la cual busca establecer una tipología de bioclimas mostrando una ajustada relación entre los modelos vegetacionales y los valores del clima además de dar respuesta a las situaciones particulares que hasta ahora no habían podido ser resueltas por las clasificaciones bioclimáticas propuestas anteriormente. Las diferencias más resaltantes son:

- No se considera a las regiones montañosas como una sola unidad bioclimática de la tierra.
- Se reconocen cuatro tipos de bioclimas desérticos y no uno como hasta ahora se había reconocido.
- Se considera al macrobioclima mediterráneo con una vegetación potencial muy variada y no limitada a bosques y pre-bosques esclerófilos únicamente.

La unidad tipológica suprema de esta clasificación es el Macrobioclima el cual es un modelo biofísico que está delimitado por valores vegetacionales

y climáticos con una amplia jurisdicción territorial relacionada con los grandes tipos de biomas, climas y regiones biogeográficas de la Tierra. Se proponen así cinco macrobioclimas: Tropical, Mediterráneo, Templado, Boreal y Polar. La clasificación utiliza parámetros bioclimáticos expresados en milímetros (mm) en el caso de la precipitación, en grados centígrados (°C) en el caso de la temperatura media o en décimas de grados centígrados (°C/10) en el caso de las temperaturas positivas o índices bioclimáticos. Estos últimos son formulas aritméticas sencillas que integran parámetros.

El macrobioclima tropical esta caracterizado por estar presente en las cinturas latitudinales ecuatorial y eutropical (0 a 23° N y S). A cualquier altitud. También puede hallarse en los territorios subtropicales (23° a 35° N y S) dependiendo del ritmo ómbrico solo si $T > 25^{\circ}\text{C}$. En función de la cantidad de precipitación anual, de la estacionalidad y el ritmo de la misma se distinguen 5 bioclimas tropicales: Pluvial, pluviestacional, xérico, desértico e hiperdesértico.

Los ombrotipos son rangos basados en la precipitación y en la evaporación creciente con el incremento de la temperatura que presentan una alta correlación con las estructuras de la vegetación potencial climatófila en toda la Tierra. Los horizontes ómbricos se expresan y definen mediante índices, dentro de los cuales se destacan por su utilización en este trabajo, el índice ombrotérmico anual (I_o) que describe el monto de las precipitaciones y el índice ombrotérmico del bimestre más seco del trimestre más seco del año (I_{od2}) que describe la distribución de las Pp:

$$I_o = \frac{Pp}{Tp} * 10 \qquad I_{od2} = \frac{Pi}{Tpi} * 10$$

Donde:

Pp= precipitación positiva anual (de los meses de T_i superior a 0°)

Tp= sumatoria de temperaturas medias (meses $T_i > 0^{\circ}$)

Pi= suma de precipitación de los 2 meses mas secos.

Tpi= suma de la temperatura positiva de los 2 meses mas secos.

(WBCS, 2009).

2.2 Metodología

2.2.1 Área de estudio

El área de estudio está ubicada al sur del estado Lara, al centro-occidente de Venezuela (Figura 1), comprende toda la superficie de los municipios Morán y Andrés Eloy Blanco por debajo de 1800m de altitud.

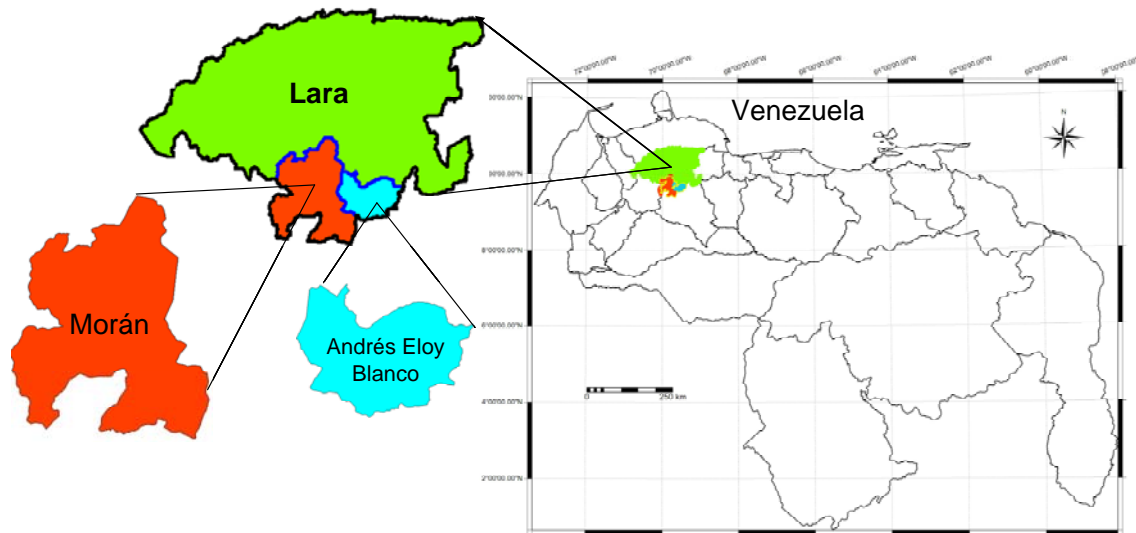


Figura 1. Ubicación geográfica del área de estudio en el contexto Nacional, Estatal y Municipal.

2.2.1.a Estado Lara

El estado Lara se encuentra en la región centro occidental de Venezuela (Figura 1), tiene una superficie de 19.800 Km² que corresponden al 2,16% del territorio nacional, entre los 09°23'00" y 10°45'00" de latitud norte y los 68°52'00" y 70°58'00" de longitud oeste, su capital es la ciudad de Barquisimeto. Esta conformado por nueve municipios, la altitud varia entre cero y tres mil metros (0-3000m), la densidad poblacional del estado es de 78.6 hab./Km² con un total de 1.556.415 habitantes de acuerdo al censo del año 2000. El estado limita al norte con el estado Falcón, al sur con los estados Trujillo y Portuguesa, al oeste con el estado Zulia y al este con los estados Yaracuy y Cojedes.

El potencial agrícola del estado es muy variado y esta determinado principalmente por condiciones edáficas y climáticas, observándose diferencias, principalmente en un gradiente sur (tierras altas, húmedas y montañosas)-norte (tierras bajas, secas y planas) donde el aporte para satisfacer la demanda nacional de algunos rubros como: Pimentón, cebolla y tomate es muy importante. El estado Lara es el segundo productor de café a nivel nacional, rubro que es cultivado al sur del estado. En las tierras bajas destaca la producción de caña de azúcar. Existe también una gran tradición en el manejo y mejora del ganado bovino.

La ubicación del estado Lara es considerada como estratégica debido a que permite el enlace entre el occidente, el centro y el oriente del país, esto aunado a su infraestructura agrícola hace que el estado Lara sea distribuidor y abastecedor de alimentos para el mercado nacional y el externo (FUDECO, 2004a).

2.2.1.b Municipio Andrés Eloy Blanco

Este municipio se ubica al sur del estado Lara (Figura 1) entre los 09° 31' 35" y 09° 49' 12" de latitud norte y los 69° 20' 20" y 69° 43' 46" de longitud oeste, su superficie es de 708 Km². Está constituido por las parroquias: Pío Tamayo, Yacambú y Quebrada Honda de Guache (Figura 2). Según el censo del 2000 el municipio tiene 42.067 habitantes y la densidad poblacional es de 59,42 hab./Km². Limita al norte con los municipios Jiménez e Iribarren del estado Lara, al sur con el estado Portuguesa, al este con el estado Portuguesa y al oeste con el municipio Morán del estado Lara. Su capital es la ciudad de Sanare. La altitud varía entre cien y dos mil metros (100-2000m). Debido a sus características de relieve y geomorfología (con altas pendientes) y las altas precipitaciones que se suscitan, el potencial agrícola de este municipio es mas bien limitado, dada la susceptibilidad de las tierras a la erosión, por ello ha sido ampliamente recomendada la aplicación de practicas conservacionistas para dicha explotación, Sin embargo, existe tradición en el cultivo de café, hortalizas, ganadería intensiva y frutales. Este municipio ha sido considerado como productor de

agua debido a su potencial hidráulico el cual en la actualidad está siendo explotado a través de la construcción de un importante embalse (Yacambú) de impacto regional el cual consiste en el trasvase de agua hacia una región seca para su utilización en riego y el abastecimiento urbano e industrial (FUDECO, 2004b).

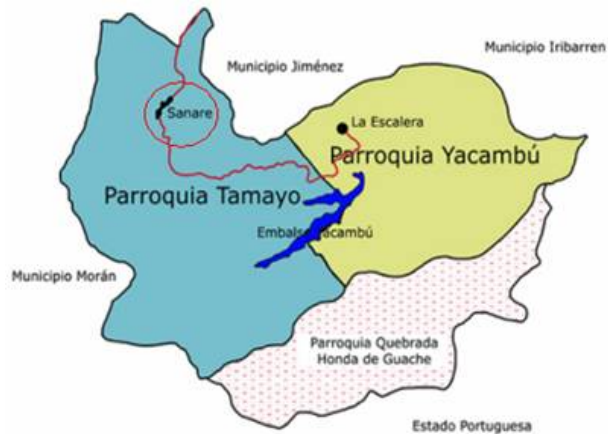


Figura 2. División político-territorial del municipio Andrés Eloy Blanco y las parroquias que lo conforman.

2.2.1.c Municipio Morán

Este municipio se encuentra al sur del estado Lara (Figura 1) entre los 10°01'01" y 9°24'18" latitud norte y los 69°37'04 y 70°07'28" de longitud oeste, su capital es la ciudad de El Tocuyo. Limita al norte con Torres del estado Lara, al sur con los municipios José Vicente Unda , Ospino y Guanare y del estado Portuguesa; al este con los municipios Jiménez y Andrés Eloy Blanco del estado Lara; y al oeste con los municipios Carache y Juan Vicente Campo Elías del Estado Trujillo. Tiene una superficie de 2.231km² y está dividido en ocho parroquias: Bolívar, Anzoátegui, Guarico, Hilario Luna y Luna, Humocar Alto, Humocar Bajo, La Candelaria y Morán (Figura 3). Según el censo del 2000 el municipio tiene 112.484 habitantes y una densidad poblacional de 50,42 hab./Km². La altitud varía entre quinientos y tres mil metros (500-3000m). Las tierras de este municipio tienen un potencial principalmente agrícola, en las zonas altas destacan el cultivo de café, y la explotación de hortalizas y ganadería de altura mientras que en el

valle del río Tocuyo destacan los cultivos de caña de azúcar y hortalizas de piso bajo. El potencial hidráulico de este municipio se basa fundamentalmente en la cuenca alta del río Tocuyo como principal fuente de alimentación del embalse “Dos Cerritos” el cual a su vez garantiza el suministro de agua para abastecimiento urbano e industrial del municipio Morán así como parte del suministro de las ciudades de Quibor y Barquisimeto (FUDECO, 2004c).



Figura 3. División político-territorial del municipio Morán y las parroquias que lo conforman.

2.2.1.d Determinación del área de estudio

Utilizando el sistema de información geográfica (SIG) ILWIS 3.21® (ITC, 2001) y a partir del mapa vectorial de municipios de Venezuela, se crearon sub-mapas de los municipios Andrés Eloy Blanco Y Morán del estado Lara, de los cuales fue removida toda superficie cuya altitud fuera superior a 1800m, debido a que altitudes superiores a este piso no fueron tomadas en cuenta en el presente estudio. Para ello se utilizó un modelo de elevación digital (DEM).

Finalmente se obtuvo el área de estudio (Figura 4) con una superficie total de 2576,5 Km² y cuyas coordenadas se encuentran entre los 9° 23´42,68" y 9° 57´27,83" de latitud norte y los 69° 20´31,54" y 70° 04´36,63" de latitud oeste.

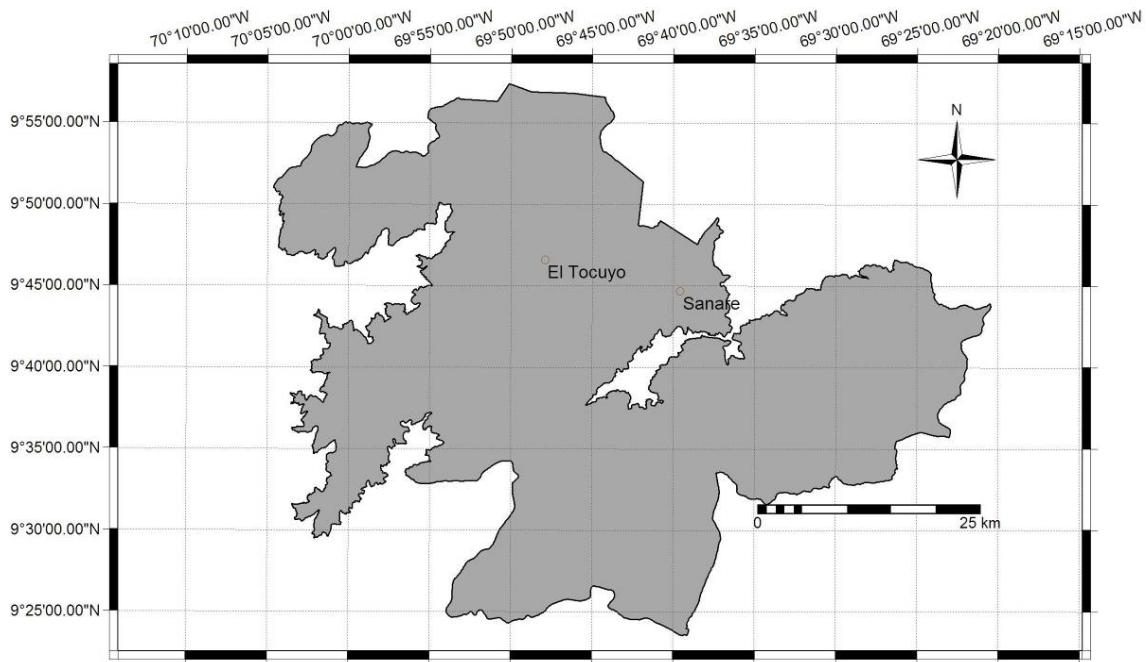


Figura 4. Área de estudio determinada a partir de la cota altitudinal de 1800m y los límites políticos de los municipios Andrés Bello y Morán del estado Lara.

2.2.2 Caracterización de las variables

La caracterización de las variables fue llevada a cabo analizando: Imágenes satelitales, cartografía general en formato digital (mapas vectoriales, raster, de puntos y de segmentos) y datos de estaciones meteorológicas, a partir de las cuales se realizaron mapas individuales de distribución de: Precipitación, temperatura, bioclima, cobertura vegetal, ecosistemas, viabilidad, hidrología y urbanismo (centros poblados), con la utilización de un sistema de información geográfica.

2.2.2.a Precipitación

La caracterización espacial de la precipitación se llevó a cabo utilizando una modificación de la metodología planteada por Suárez del Moral (2009) con el software ILWIS 3.21® (ITC, 2001). Para ello se compilaron los datos de 60 estaciones meteorológicas suministrados por el Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial (CIDIAT).

Preparación de los datos

Utilizando el censo de estaciones hidrometeorológicas en funcionamiento (CONICIT, 1994) se confirmó la ubicación, nombre, serial y tipo de las estaciones meteorológicas cuyos datos serían utilizados. Una vez obtenidas las coordenadas de cada estación y utilizando el software ILWIS 3.21[®] (ITC, 2001) se creó una tabla con los nombres de las estaciones y sus coordenadas. A partir de dicha tabla se creó un mapa de puntos. Paralelamente se creó un mapa de distancias partiendo de un punto central del área de estudio arbitrario con un radio de 100Km, a partir del cual se creó un mapa de categorías de distancia obteniendo un polígono cada 10Km (Figura 5). Ambos mapas fueron superpuestos al área de estudio para identificar las estaciones que estuvieran dentro del radio de 80Km tal y como se muestra en la figura 5. Dado que el área de estudio se encuentra al sur del estado Lara y limita con los estados Portuguesa y Trujillo, también se incluyeron estaciones en estos estados.

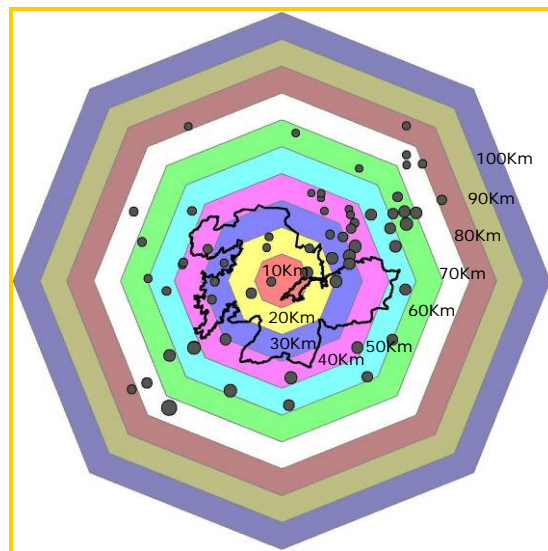


Figura 5. Distribución de las estaciones meteorológicas dentro del radio de 80Km alrededor del área de estudio.

Una vez identificadas las estaciones se procedió a revisar los datos de precipitación de las mismas. Para lo cual se escogieron únicamente años que tuvieran doce meses completos de registros. Los años en los que faltara al

menos un mes de medición fueron eliminados. Así se obtuvieron valores anuales promedio de precipitación para 64 estaciones en total. Estos valores promedio de precipitación fueron utilizados para la creación del mapa de puntos con los valores promedio de precipitación anual de cada estación.

Correlación espacial

Sobre el mapa de puntos de los valores promedio de precipitación para cada estación se hizo una correlación espacial omnidireccional para una distancia (lag spacing) de 5Km esta distancia fue escogida luego de un proceso iterativo partiendo de que, uno de los requerimientos de la correlación espacial, es que haya al menos 30 distancias con pares de puntos. A través de la correlación espacial se calcula: La autocorrelación espacial, varianza espacial y valores de semivariograma para pares de puntos que se encuentran a cierta distancia (lag spacing) unos de otros, el semivariograma describe la relación entre las diferencias cuadráticas de pares de valores de puntos y la distancia (ILWIS, 2001). Una vez obtenido el semivariograma (figura 6), se procedió a ajustar al mismo uno de los modelos permitidos por el programa, en este caso el modelo ajustado fue el esférico (línea amarilla en la figura 6).

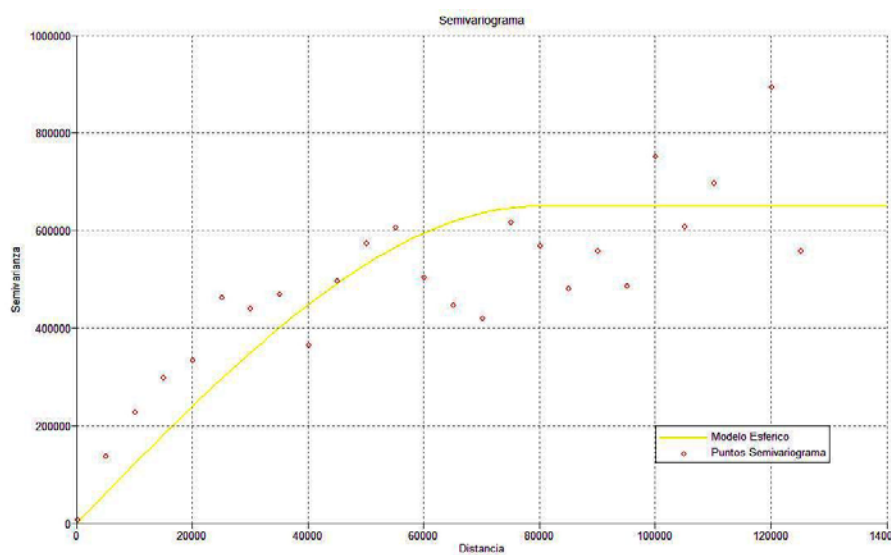


Figura 6. Semivariograma de la precipitación media anual para distancias crecientes de separación de las estaciones meteorológicas seleccionadas.

Interpolación de puntos (Kriging)

La metodología conocida como Kriging es una forma de interpolación geoestadística que estima, a partir de valores conocidos de una variable en el espacio, los valores de dicha variable en regiones donde no se conoce su valor. En comparación con otras técnicas tiene la ventaja de proveer una medida del error probable de los estimados. Existen varios tipos de Kriging, el que se utilizó en este caso fue el Kriging simple (Hengl, 2007). Para llevar a cabo la interpolación es necesario contar con un mapa de puntos y un semivariograma (ambos obtenidos en los pasos anteriores), a partir de este último se obtienen los parámetros de entrada para la realización del kriging cuyo producto es un mapa raster de precipitaciones.

Los parámetros obtenidos a partir del semivariograma son:

- Nugget (efecto pepita): Es el salto vertical a partir del valor cero en el origen hasta el valor de semivarianza más alto a distancias muy pequeñas.
- Sill (meseta): Es la meseta alcanzada por los valores del semivariograma en el rango.
- Range (rango): Es la distancia en la que los valores del semivariograma no aumentan más y alcanzan una meseta.

Los parámetros Nugget, Sill y Range son observados en el semivariograma, como se muestra en la figura 7.

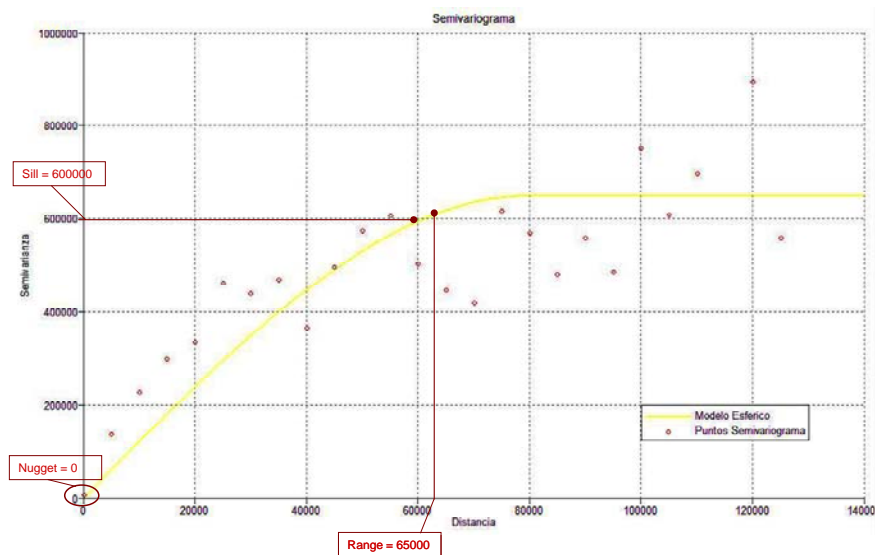


Figura 7. Semivariograma con los parámetros Nugget = 0; Sill = 600000 y Range = 65000.

Al mapa de puntos de precipitación media anual se le aplica la interpolación “kriging simple” y se utilizan los valores: “Lag spacing” o Intervalo (5Km), “Nugget” o efecto pepita (0), “Sill” o meseta (600.000) y “Range” o rango (65.000) previamente obtenidos. A partir de lo cual se construye un mapa raster de la distribución de la precipitación en el área de estudio (Figura 13 de la sección de resultados del presente capítulo).

2.2.2.b Temperatura

La caracterización espacial de la temperatura fue llevada a cabo a partir de datos de estaciones meteorológicas dentro del área de estudio, proporcionadas por el Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial (CIDIAT), siguiendo modificaciones de la metodología descrita por Chacón-Moreno y colaboradores (2008).

Preparación de los datos

El número de estaciones con datos de temperatura, en general es muy bajo, razón por la cual no se empleara la metodología de interpolación de puntos para la caracterización espacial de la variable temperatura. En este caso se realizara tal caracterización a través de regresiones altotérmicas. Así pues utilizando el censo de estaciones hidrometeorológicas en

funcionamiento (CONICIT, 1994) se confirmó la ubicación, altitud, nombre, serial y tipo de las estaciones meteorológicas cuyos datos serían utilizados. Se consideraron las estaciones dentro del área de estudio que tuvieran mediciones de temperatura media, media máxima y media mínima con años completos de medición, los años en los que faltara al menos un mes de medición fueron descartados para el cálculo del promedio. Finalmente se obtuvieron 12 estaciones meteorológicas dentro del área de estudio que satisficieran tales características.

Regresiones altotérmicas

La relación que existe entre la altitud y la temperatura se puede describir a través de regresiones lineales por una ecuación general del siguiente tipo:

$$y = m * X + b$$

Debido a que la temperatura disminuye con el incremento de la altitud, fenómeno conocido como enfriamiento adiabático de los gases, que es causado por la expansión que experimenta el aire con la disminución de la presión atmosférica, tal expansión favorece la disminución de choques entre partículas y por ende de la energía cinética, lo cual se traduce en la disminución de temperatura (Ahrens, 2001).

Con base en lo anterior se procedió en busca de datos para realizar las regresiones lineales. Para ello se tomaron de cada estación los valores de: Altitud, temperatura media, temperatura máxima media y temperatura mínima media, se graficaron individualmente cada una de las temperaturas vs. la altitud y se ajustó una recta (regresión lineal) a cada nube de puntos como se puede observar en la figura 8.

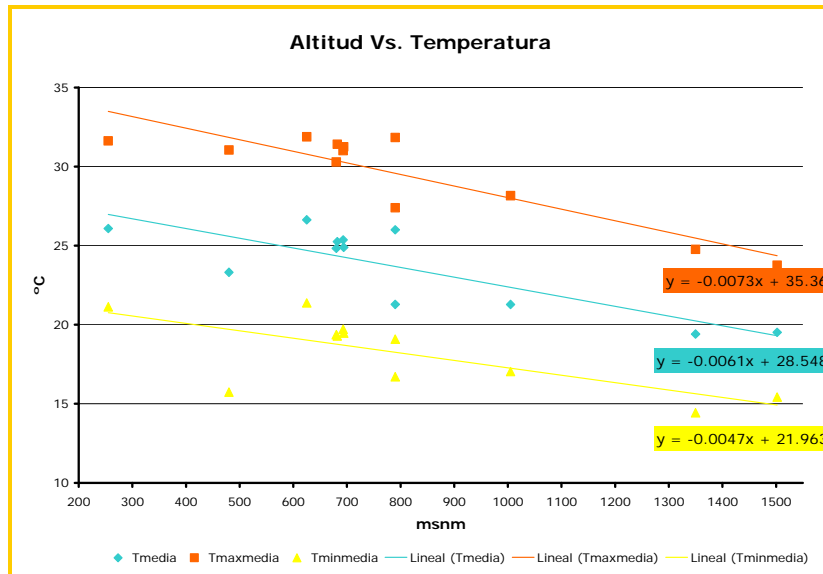


Figura 8. Regresiones de Altitud vs. Temperatura con rectas ajustadas.

Una vez obtenida la ecuación de la recta que se ajusta a cada nube de puntos (Tmedia; Tmáxmedia y Tmínmedia), se tienen los valores “b” y “m” que satisfacen cada regresión, como se describe en la tabla 1.

Tabla 1. Ecuación de la recta ajustada para las regresiones altotérmicas de temperatura media, máxima media y mínima media.

Temperatura	Ecuación de la recta	m	b	r ²
Media	$y = -0.0061X + 28.55$	-0.0061	28.55	0.66
Máxima media	$y = -0.0073x + 35.36$	-0.0073	35.36	0.79
Mínima media	$y = -0.0047X + 21.96$	-0.0047	21.96	0.50

Utilizando un modelo de elevación digital (MED o DEM por sus siglas en ingles) distribuido de forma gratuita en el servidor de la “Misión Topográfica de Radar volada en el Transbordador Espacial” (SRTM, 2006) se procedió, utilizando la opción “map calculation” del software ILWIS 3.21® (ITC, 2001), a realizar mapas individuales de temperatura media, temperatura máxima media y temperatura mínima media. Como resultado de esta operación se obtuvieron los mapas de temperatura media (figura 14), máxima media y mínima media.

2.2.2.c Bioclima

La caracterización bioclimática del área de estudio fue llevada a cabo a partir de los mapas de distribución de: Precipitación y Temperatura hechos previamente. Para llevar a cabo esta caracterización se utilizó una modificación de la metodología planteada por Suárez del Moral (2009), basada a su vez en el sistema de clasificación bioclimática de Rivas-Martínez (WBCS, 2009).

Preparación de los datos

En este caso fue necesario crear mapas de cada uno de los términos de las ecuaciones de I_o (índice ombrotérmico anual) e I_{od2} (índice ombrotérmico del bimestre más seco del trimestre más seco del año) para calcular luego un mapa con la distribución de los índices. Los mapas equivalentes a cada término de los índices ombrotérmicos se definen a continuación:

Pp= Mapa de distribución de la precipitación

Tp= Para obtener el mapa correspondiente a este termino es necesario tener en cuenta que en el trópico la temperatura durante todo el año es superior a los cero grados centígrados, por lo cual el mapa de distribución de "Tp" se obtiene multiplicado por 12 el mapa de temperaturas medias a través de la opción "Map Calculation" en ILWIS 3.21® (ITC, 2001).

Pi= Es necesario ir a la base de datos de las estaciones climáticas con las que se calculó el mapa de distribución de la precipitación y hallar el trimestre mas seco del año, del cual se toma la sumatoria de los dos meses mas secos. Una vez obtenido este valor se realiza la interpolación "kriging" en ILWIS 3.21® (ITC, 2001) para tener un mapa con la distribución de los meses secos.

Tpi= Al igual que en el caso del termino Tp, se debe tomar en cuenta que no hay temperaturas menores a cero grados centígrados. Por lo que el mapa de distribución de "Tpi" se obtiene multiplicando por 2 el mapa de temperaturas medias a través de la opción "Map Calculation" en ILWIS 3.21® (ITC, 2001).

Una vez obtenidos los mapas de distribución de los términos requeridos por la ecuación de cada índice se procedió a calcular los mapas con la ayuda de la opción "Map Calculation" del sistema de información geográfico ILWIS 3.21® (ITC, 2001). Obteniéndose como resultado un mapa con la clasificación bioclimática del área de estudio que se muestra en la figura 15 de la sección de resultados del presente capítulo.

2.2.2.d Cobertura y Ecosistemas

La caracterización espacial de la vegetación se llevo a cabo Utilizando modificaciones de las metodologías planteadas por Ulloa Quintero (2005) y Chacón-Moreno (2007), a partir de imágenes digitales del satélite Landsat-TM ortorectificadas descargadas de forma gratuita del servidor "Global Land Cover Facility" en el portal Web de la universidad de Meryland, cuyos detalles se resumen en la tabla 2.

Tabla 2. Datos de las imágenes Landsat utilizadas para la caracterización espacial de la vegetación.

Código imagen	Fecha de toma	Ubicación (path/row)
p005r053	18 / 03 / 2000	5/53
p006r053	15 / 11 / 2001	6/53

De cada imagen se recortó el área de interés con la utilización de un software especializado para la interpretación digital de imágenes de satélite, sobreponiendo a estas el área de los municipios Morán y Andrés Eloy Blanco del Edo. Lara (Figura 9).

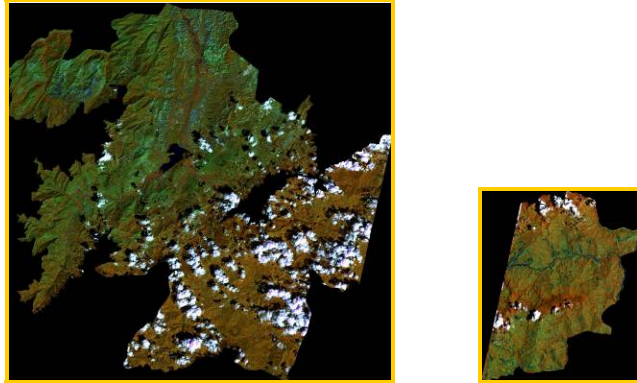


Figura 9. Imágenes de satélite recortadas definitivas, combinación de bandas: RGB 4-5-3

Clasificación

Con la utilización del software especializado para la interpretación digital de imágenes de satélite cada sub imagen fue clasificada de forma individual con una combinación de bandas RGB 4-5-3, utilizando un muestreo de pixeles para las clases preliminares cuya detección se realizó partiendo de la interpretación ecológica. En cada imagen se creo la base de datos estadística que acumula los datos de pixeles seleccionados, a partir de un muestreo exhaustivo sobre toda la superficie de la imagen.

Una vez realizado el muestreo se crearon y evaluaron las firmas espectrales de cada clase, para posteriormente correr la clasificación supervisada utilizando el parámetro estadístico conocido como; "máxima probabilidad". Dicha clasificación supervisada tiene como resultado una imagen raster o clasificación supervisada, la cual fue corroborada en pantalla al sobreponer a ésta la imagen de satélite sin clasificar para determinar posibles errores en la clasificación, con lo que se confirma una alta correspondencia entre las clases obtenidas y la imagen satelital.

Finalmente ambas clasificaciones fueron filtradas estadísticamente utilizando el parámetro "vecindad de mayoría" de 7x7 pixeles, con el fin de eliminar pixeles aislados que generan ruido en la clasificación, el resultado de este proceso se muestra en la figura 10.

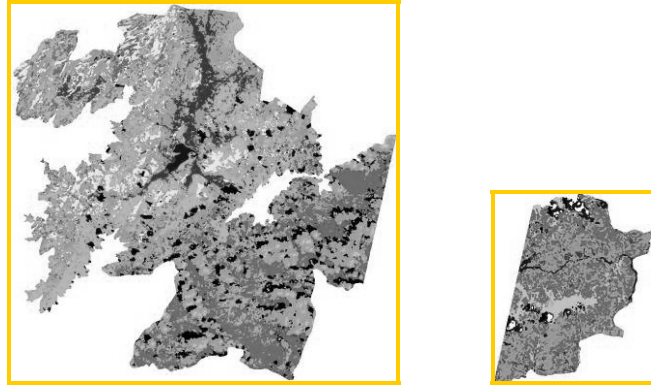


Figura 10. Imágenes obtenidas a través de la clasificación supervisada y filtradas estadísticamente con el parámetro estadístico vecindad de mayoría 7x7.

Edición

Una vez obtenidas las clasificaciones se exportaron al directorio del software ILWIS 3.21[®] (ITC, 2001) y se continuó su edición. Todos los mapas definitivos generados con este software tienen un tamaño de píxel de 28x28m; sistema de coordenadas UTM, datum WGS 1984 y elipsoide WGS84 zona 19. En la etapa de edición se busca crear el mapa de cobertura vegetal del área de estudio para lo cual es necesario unir las dos clasificaciones y crear una leyenda unificada.

Para cada imagen se creó un “dominio de clases” a partir de las clases creadas con la clasificación supervisada en la etapa anterior, asociadas a dichos dominios están las “representaciones” las cuales sirven para asignar colores a cada clase. Una vez realizados los dominios de clase con sus respectivas representaciones se procedió a realizar la operación “Slicing” de las imágenes con lo cual se obtuvieron las imágenes clasificadas preliminares (figura 11) para continuar la edición.

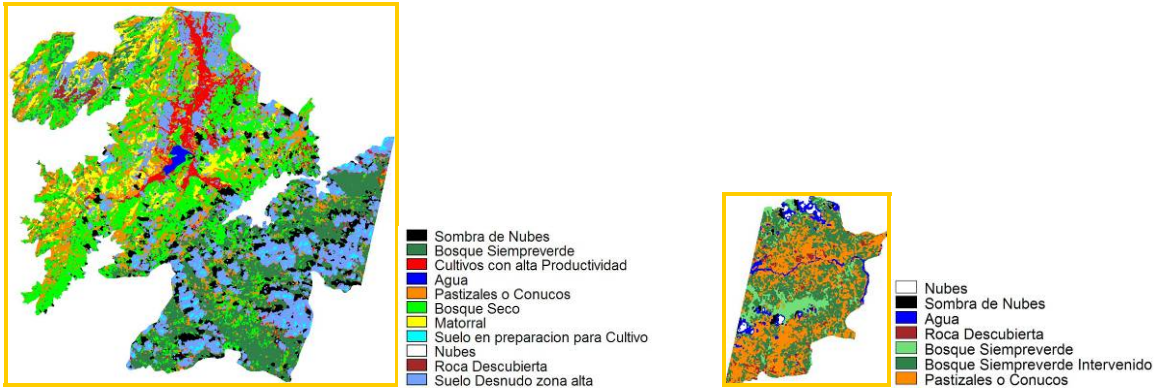


Figura 11. Imágenes clasificadas preliminares asociadas a un dominio de clases con su respectiva representación.

Se realizó una tabla de atributos con las clases correspondientes a cada imagen a partir de la cual se crea un mapa de atributos utilizando la tabla de atributos y el mapa o clasificación de cada imagen (derecha e izquierda). Se obtienen entonces dos mapas de atributos como se muestra en la figura 12.

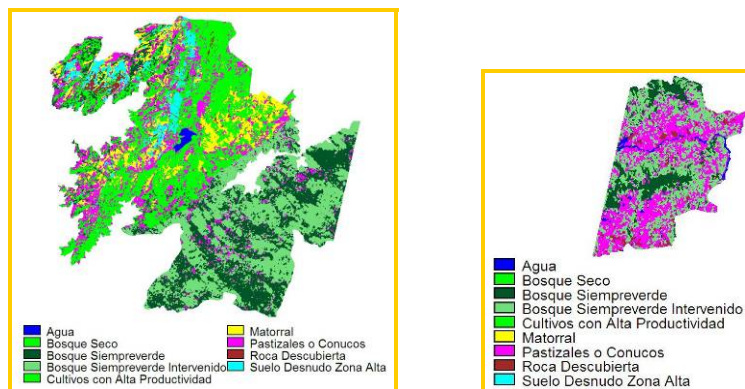


Figura 12. Mapas de atributos con la nueva clasificación realizados a partir de la tabla de atributos creada y del mapa de zonificación.

Finalmente estos dos mapas raster de atributos fueron pegados para obtener un mapa con leyenda unificada figura 16 en la sección de resultados del presente capítulo.

El mapa de coberturas fue sometido a una confirmación de campo, la cual se hizo recorriendo en un vehiculo carreteras principales y secundarias, tomando puntos con un sistema de posicionamiento global (GPS). Cada uno

de estos puntos fue caracterizado utilizando el reconocimiento ecológico, a través de la observación del tipo de cobertura natural y de reemplazo alrededor de cada uno de los puntos de muestreo. Esta información fue anotada en una planilla de campo. En total se tomaron un total de 150 puntos a lo largo y ancho de toda el área. Una vez obtenida esta información se procedió a realizar un mapa de puntos el cual fue posteriormente solapado con el mapa de coberturas para confirmar la coincidencia entre el mapa preliminar y la información recavada en campo, procediendo de esta manera a la corrección de los puntos donde fuera necesario incorporar información de cobertura.

Una vez obtenidos los mapas de cobertura final y de clasificación bioclimática se procedió a realizar la opción "Cross Map" en ILWIS 3.21® (ITC, 2001). Con el fin de obtener el mapa final de Ecosistemas que puede ser apreciado en la figura 17 de la sección de resultados del presente capítulo.

2.2.2.e Vialidad, Hidrografía y Urbanismo

Estas tres variables fueron caracterizadas espacialmente partiendo de mapas en formato "shapefile" de vialidad, hidrografía y centros poblados que abarcan toda Venezuela pertenecientes a la base de datos del Instituto de Ciencias Ambientales y Ecológicas, Facultad de Ciencias, Universidad de Los Andes. Dichos mapas, de puntos para los centros poblados y de segmentos para la hidrografía y la vialidad, fueron cortados utilizando el Software ILWIS 3.21® (ITC, 2001), creando submapas a partir de las coordenadas del área de estudio y una georeferencia creada para dicha área, vale destacar que para el uso de estos mapas en los cálculos con el software ILWIS 3.21® (ITC, 2001), los mismos fueron convertidos a mapas raster para su procesamiento e incorporación a los modelos. Estos mapas pueden ser observados en la sección de resultados del presente capítulo (Figuras 18, 19 y 20).

2.3 Resultados

2.3.1 Distribución de la precipitación

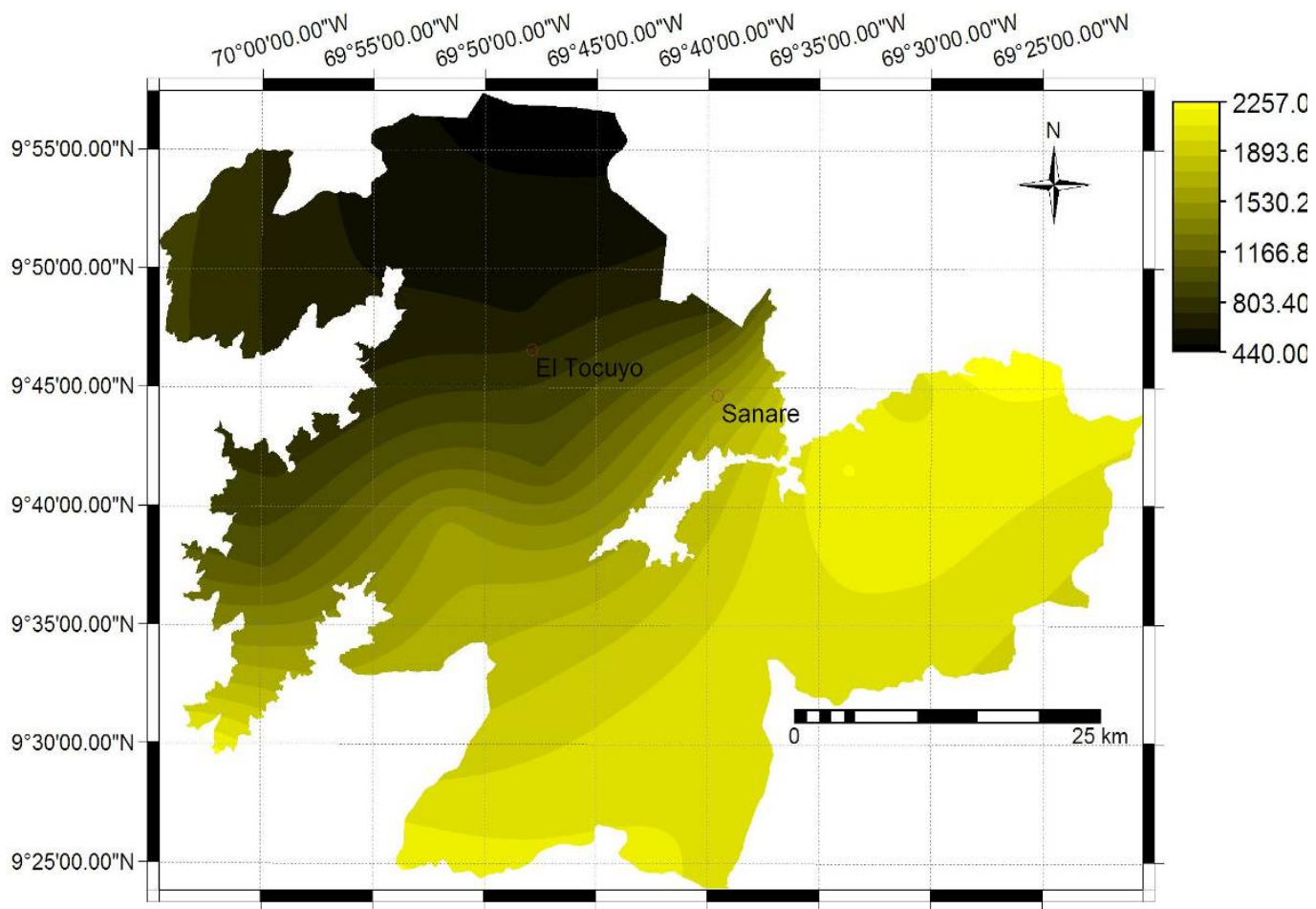


Figura 13. Distribución de la precipitación del área de estudio producto de la interpolación de puntos (kriging).

En la figura 13 se observa el mapa de distribución de las precipitaciones producto del proceso de interpolación de puntos exhibe un gradiente bien marcado, con un rango que abarca aproximadamente 1900mm anuales de precipitación. Al sur la precipitación alcanza hasta 2400mm anuales y al norte alcanza valores cercanos a 460mm anuales. La zona sur, coincidente con los mayores valores de precipitación, presenta mayores alturas ya que esta se encuentra sobre las estribaciones finales de la Cordillera de los Andes cuyos ecosistemas dominantes son boscosos. Por otra parte, la zona norte del mapa muestra valores de precipitación considerablemente menores que la zona sur, esta zona corresponde a la zona árida de la depresión de Quibor cuyos ecosistemas característicos son matorrales.

2.3.2 Distribución de la temperatura

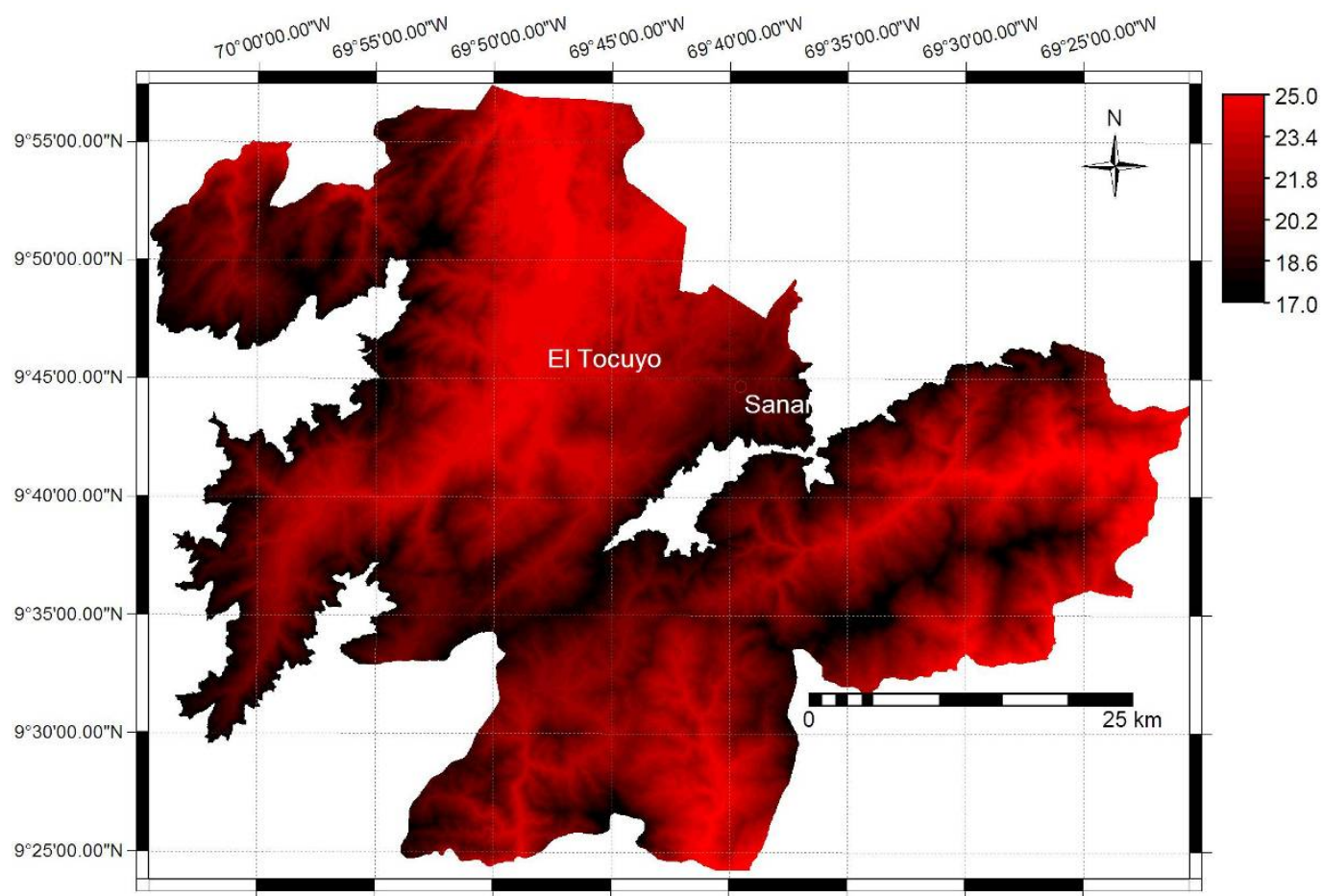


Figura 14. Distribución de la temperatura media en el área de estudio a partir de la regresión altotérmica.

En la figura 14 se puede observar el mapa de temperatura media anual producto de las regresiones altotérmicas muestra una amplitud cercana a 17°C y va desde 10°C en las zonas más altas hasta 27°C en las zonas más bajas.

En este caso el factor relieve es determinante para la distribución de la temperatura en el área de estudio y coincide, al igual que en el caso de las precipitaciones, con el hecho de que el área se encuentra en el límite entre las estribaciones finales de la cordillera de Los Andes y la depresión de Quibor.

2.3.3 Distribución del bioclima

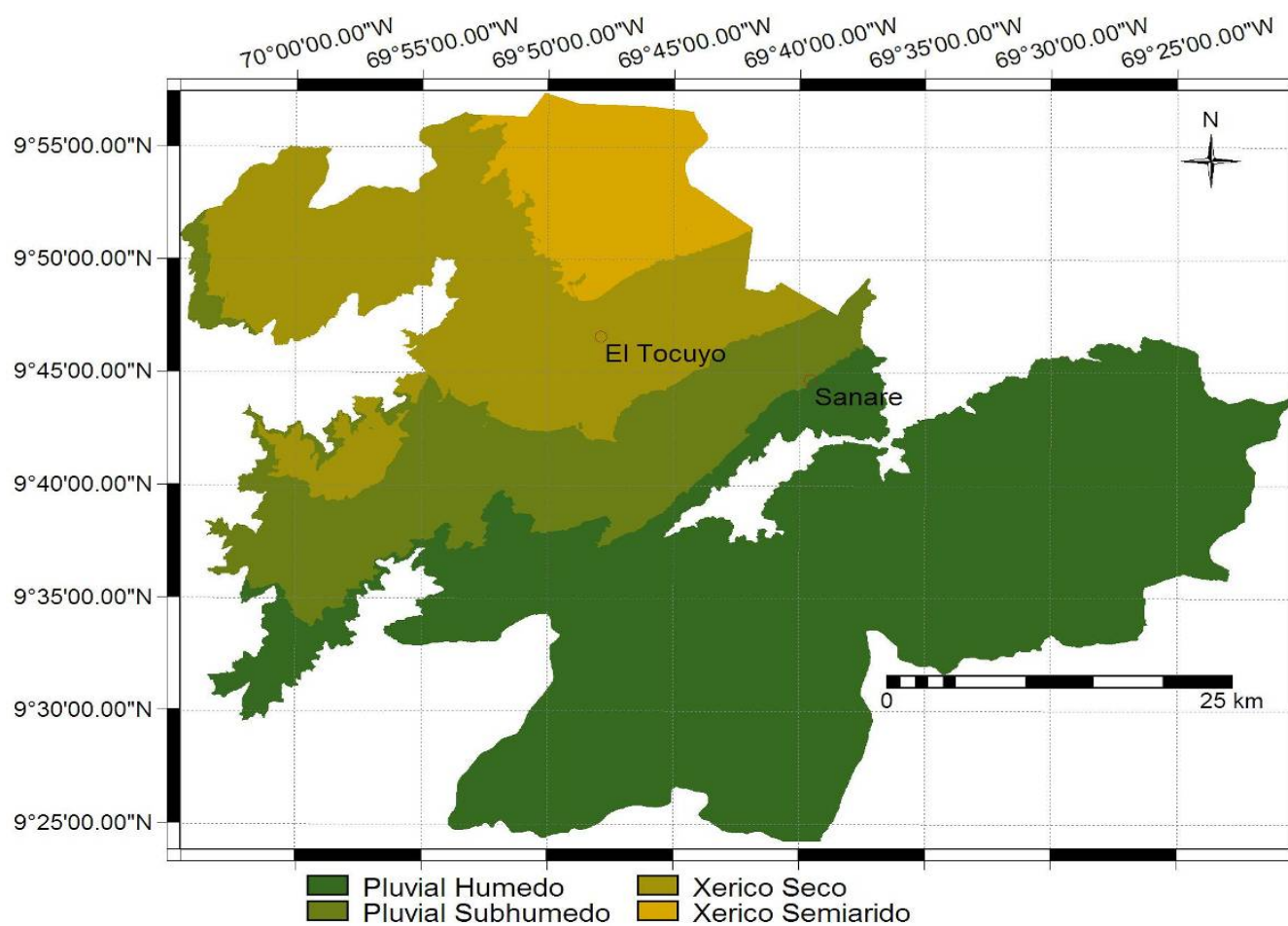


Figura 15. Clasificación bioclimática del área de estudio a partir del cálculo de los índices I_o e I_{od2} de acuerdo a la clasificación bioclimática de la tierra de Rivas-Martínez.

El mapa de la caracterización bioclimática muestra 4 bioclimas, determinados principalmente por un gradiente de humedad que va en el sentido sur-norte, desde un bioclima pluvial húmedo, pasando por uno pluvial sub-húmedo y uno xérico seco hasta el bioclima mas seco del área el xérico semiárido.

2.3.4 Distribución de cobertura y ecosistemas

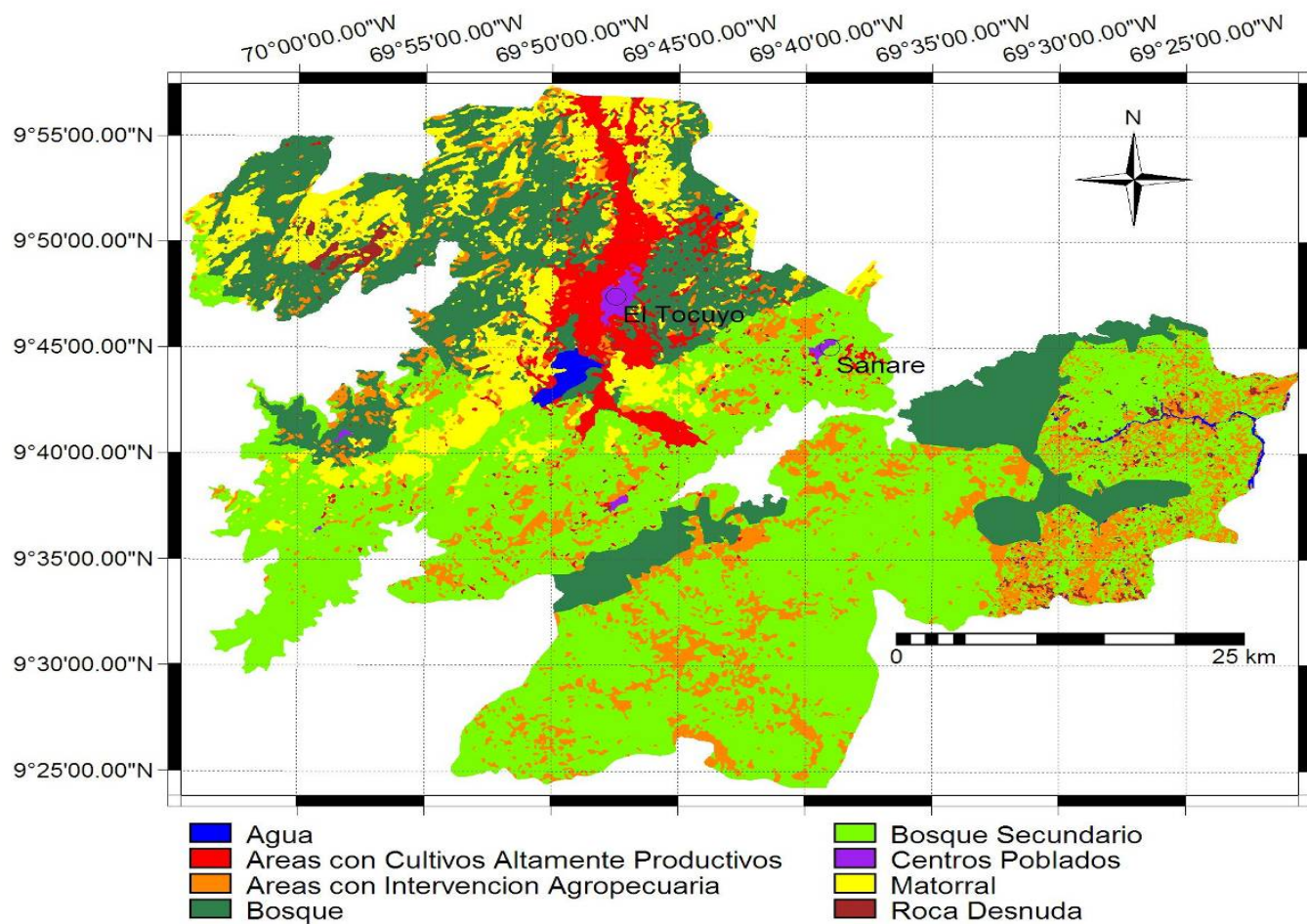


Figura 16. Distribución de coberturas del área de estudio a partir de la clasificación supervisada de imágenes Landsat.

En la figura 16 se aprecia el mapa de distribución de cobertura vegetal, el cual muestra 8 clases, de las cuales 2 corresponden a ecosistemas naturales (bosque y matorral); 3 corresponden a agro ecosistemas o sistemas de reemplazo de los sistemas naturales (bosque secundario, áreas con cultivos altamente productivos y áreas con intervención agropecuaria), y 3 corresponden a rasgos de la geomorfología, hidrología y procesos ambientales (Roca desnuda, Agua y Centros Poblados).

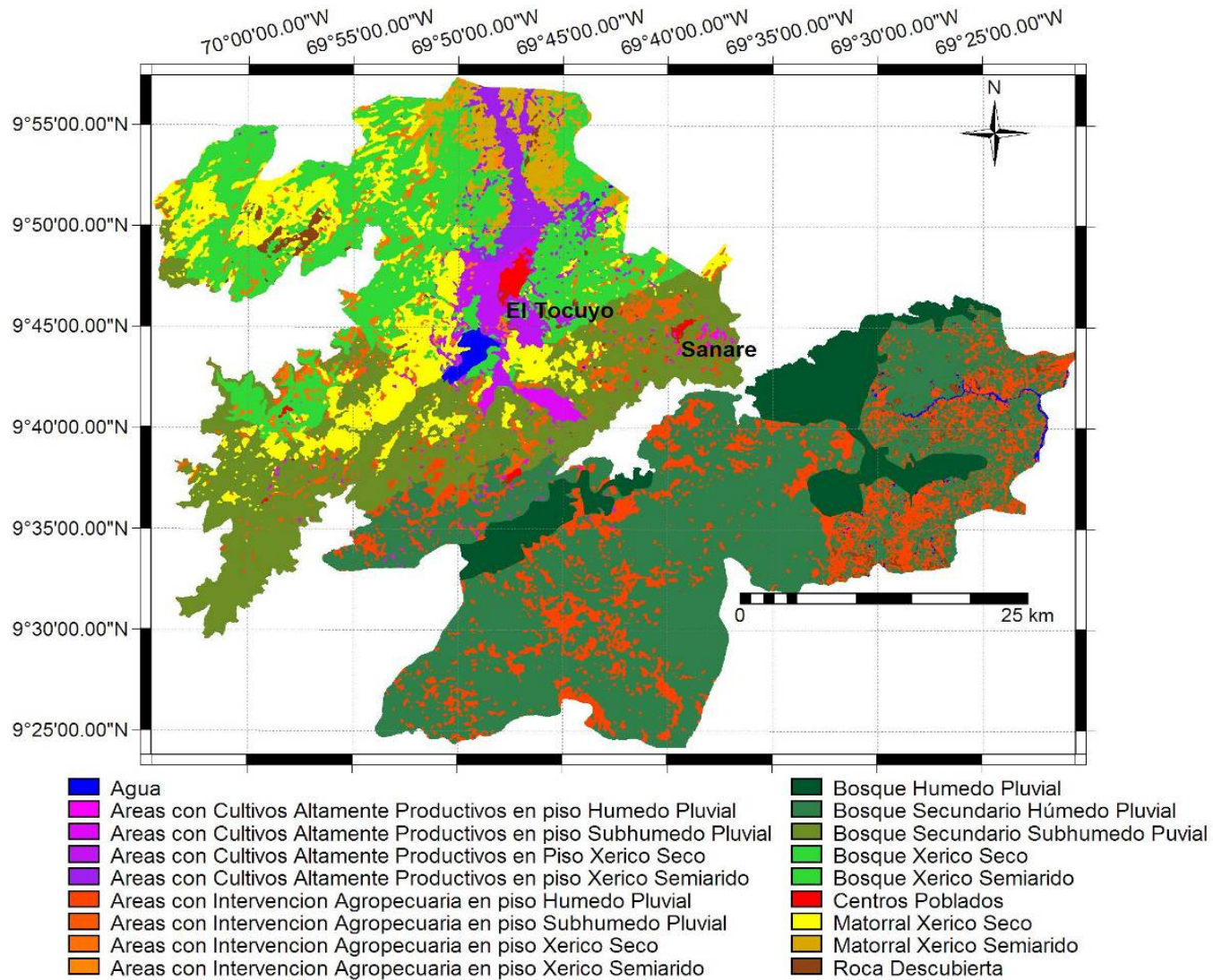


Figura 17. Distribución de ecosistemas en el área de estudio.

En la figura 17 se puede observar la distribución de los ecosistemas en toda el área de estudio, estos están separados en ecosistemas naturales y ecosistemas de reemplazo o agroecosistemas.

De los agroecosistemas o ecosistemas de reemplazo, los “cultivos altamente productivos” están caracterizados por ser en general monocultivos, utilización de maquinaria agrícola pesada, alta tecnificación y en la mayoría de los casos sistemas de riego. Las “áreas con intervención agropecuaria” son en su mayoría conucos con cultivo de varios rubros que no abarcan grandes extensiones de terreno y donde se utilizan métodos mas tradicionales de labranza, pueden también coincidir con pastizales y/o potreros.

Los “bosques secundarios” son aquellos bosques donde se puede apreciar crecimiento activo de la vegetación y una cobertura no uniforme, estos bosques pueden coincidir en los pisos superiores a mil metros de altitud, con los cultivos de café de sombra.

En el caso de las coberturas naturales, los “bosques” están caracterizados por una cobertura arbórea, dosel continuo, vegetación vigorosa con gran productividad y pocos o ningún parche de suelo desnudo. Los “matorrales”, por otra parte, están caracterizados por vegetación arbustiva (o arbórea de porte bajo), dosel discontinuo y se pueden apreciar zonas con suelo desnudo.

La clase “agua” incluye todos los cuerpos de agua corriente permanentes, incluye también los embalses artificiales, lagos y lagunas.

La clase “roca descubierta” incluye todos los afloramientos rocosos que no presentan cobertura vegetal.

La clase “centros poblados”, se refiere a todos aquellos asentamientos humanos que pueden ser observados en la imagen de satélite, vale destacar que no todos los centros poblados del área de estudio se pueden observar en la imagen Landsat, por lo cual realizó un mapa de centros poblados individual tal y como se describe a continuación en la sección 2.3.4.

Los ecosistemas anteriormente descritos se encuentran en diferentes pisos bioclimáticos, es por ello que en su definición se agrega al final el piso bioclimático en el cual se encuentran.

2.3.5 Distribución de la vialidad, hidrografía y centros poblados

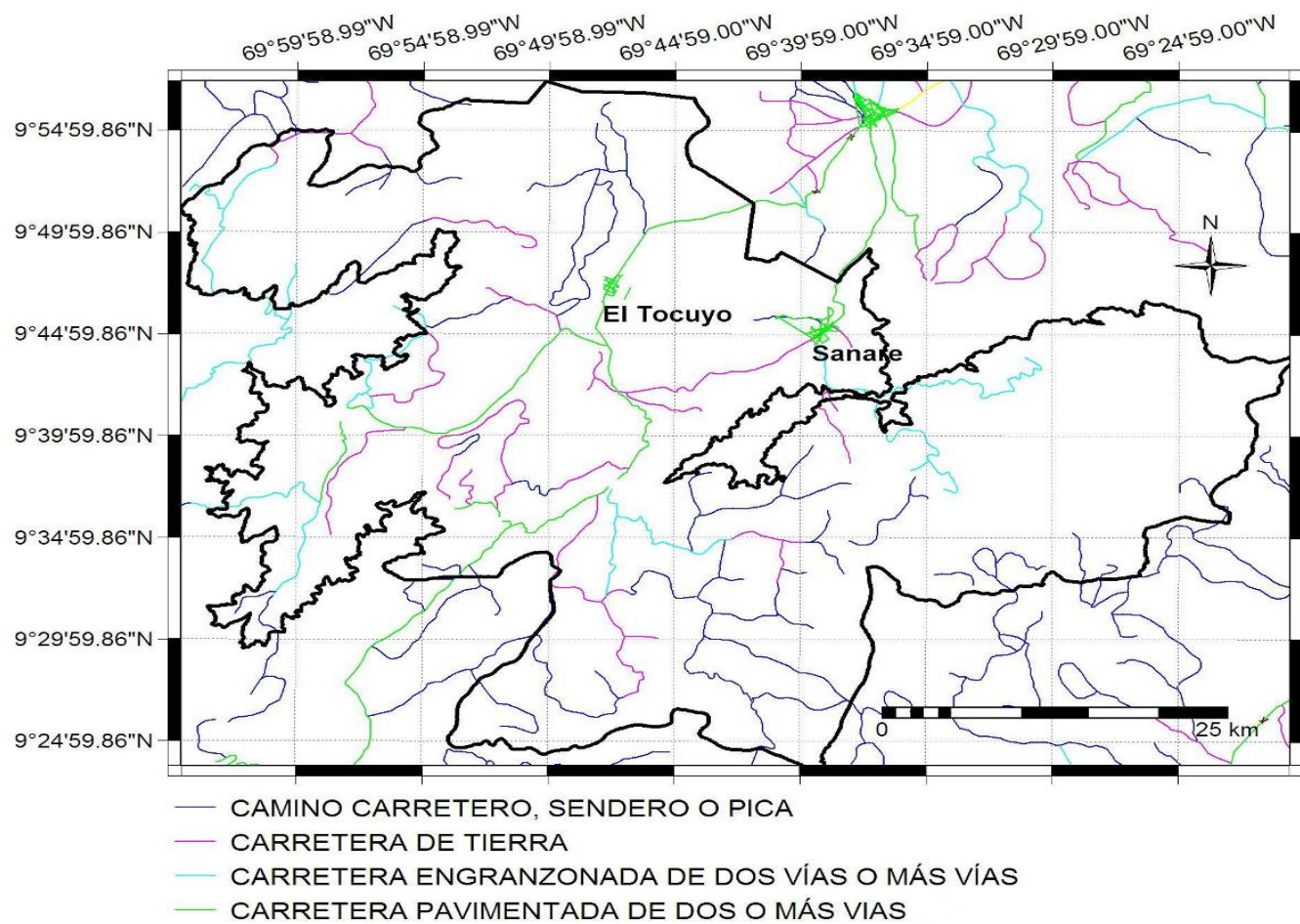


Figura 18. Vialidad (carreteras principales, secundarias y troncales) en el área de estudio.

La figura 18 muestra como gran parte del área de estudio está cubierta por carreteras. También existe una amplia red de vialidad agrícola y caminos que facilitan el acceso a diferentes zonas. Vale destacar que las vías se encuentran, en algunos casos, bastante deterioradas y el acceso a ciertas zonas a través de estas amerita el uso de vehículos de doble tracción.

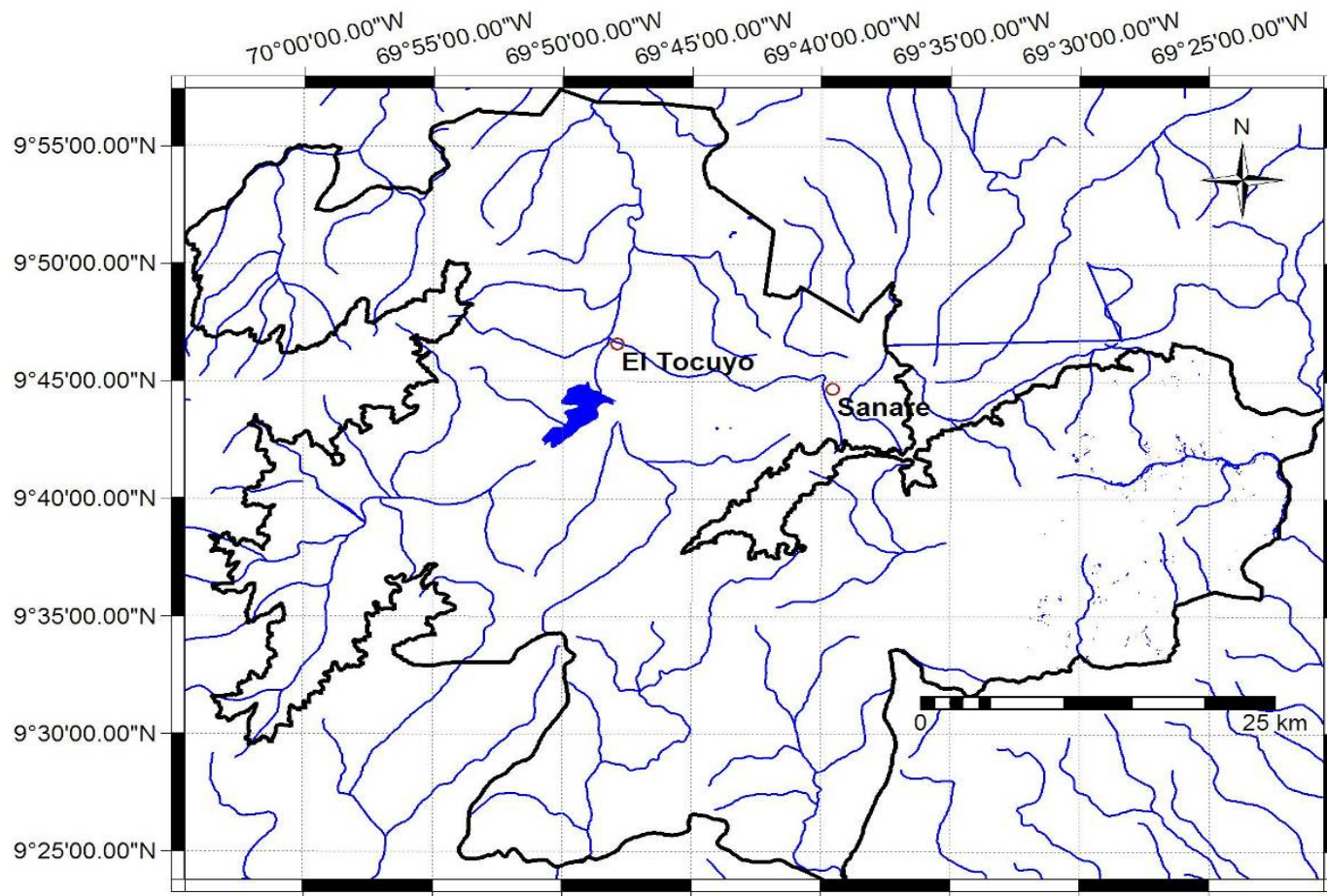


Figura 19. Hidrografía (principales cursos de agua) en el área de estudio.

En la figura 19 se observa que existe una amplia red de drenaje a lo largo y ancho de toda el área. Existen algunos embalses importantes, como es el caso de “dos cerritos” en la zona sur de El Tocuyo (se puede observar en la figura 19), además en la zona este noreste del área se está desarrollando el complejo hidráulico Yacambú-Quibor.

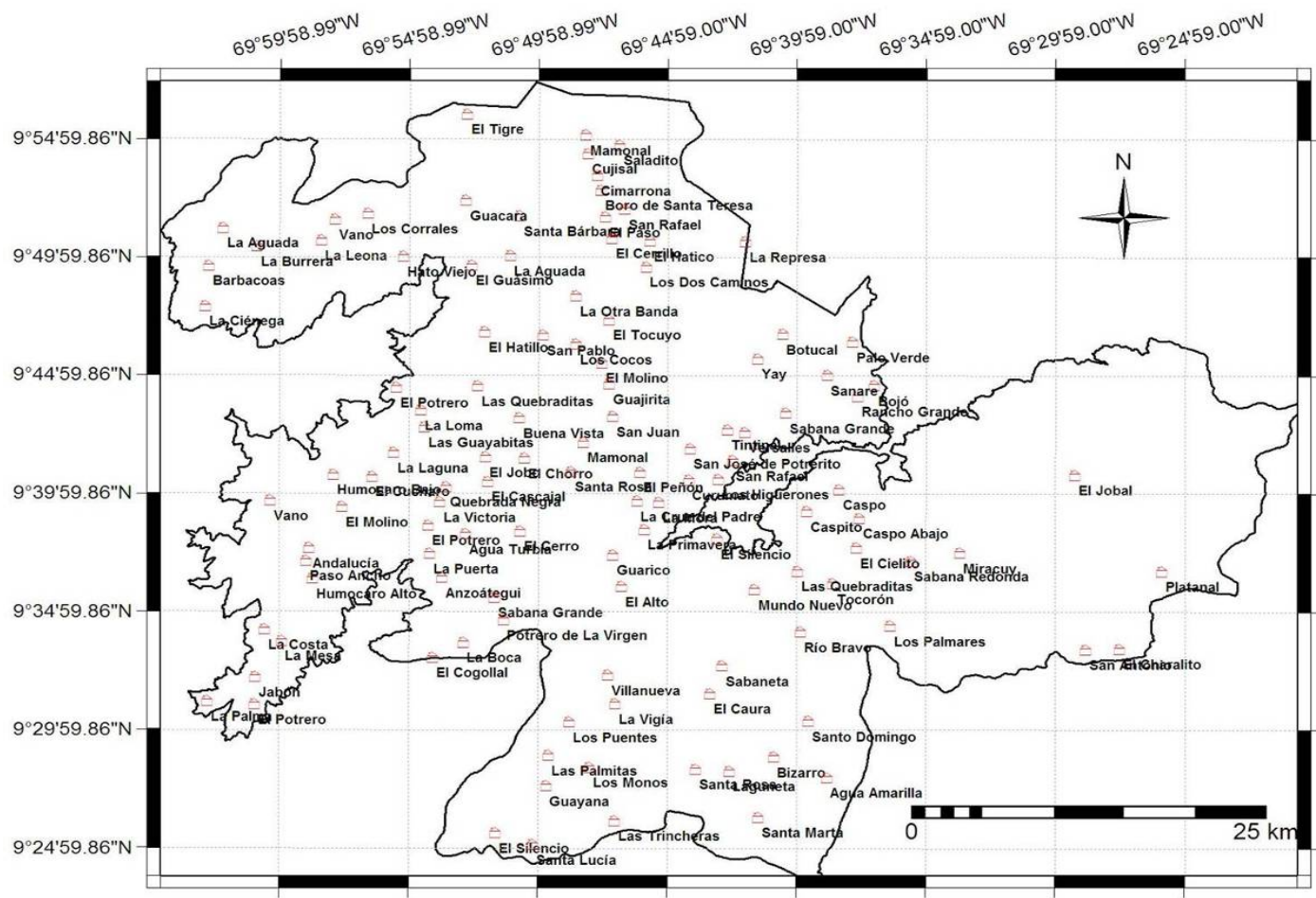


Figura 20. Urbanismo, se observan los 117 centros poblados (Caseríos, aldeas y pueblos) considerados en el análisis dentro del área de estudio.

En la figura 20 se puede apreciar que hay una gran cantidad de centros poblados, alrededor de 117, por toda el área de estudio con diferente número de habitantes. La mayoría de estos poblados tienen como principal actividad productiva la agricultura, con rubros que abarcan: Papa, Café, Tomate, Hortalizas, Pimentón, Pastos, etc.

2.4 Discusión

Luego de la caracterización ecológica espacial del área de estudio es evidente la heterogeneidad espacial que presentan los municipios en cuestión. El hecho de que se encuentren ubicados en las estribaciones finales de la cordillera de Los Andes, y en contacto con la depresión de Quibor al norte, influye en los patrones climáticos, edáficos y topográficos, que a su vez influyen de forma importante en los patrones de distribución de la vegetación y el uso de la tierra, como se puede observar en el mapa de ecosistemas y en la figura 17. En esta última figura se observa como los bosques secundarios dominan el área reflejando de cierta forma el grado de intervención del área de estudio y la dominancia del cultivo de café. El segundo ecosistema en proporción son los bosques, cuya distribución concuerda con las áreas bajo régimen de administración especial presentes en la zona. La vocación agrícola de estas tierras también se ve reflejada (en proporción), al observar que las áreas con intervención agropecuaria y con cultivos altamente productivos tienen proporciones importantes dentro del área estudiada. Además se puede apreciar la influencia climática, en la zona norte (xéricas secas y semiáridas) del área donde predomina el matorral.

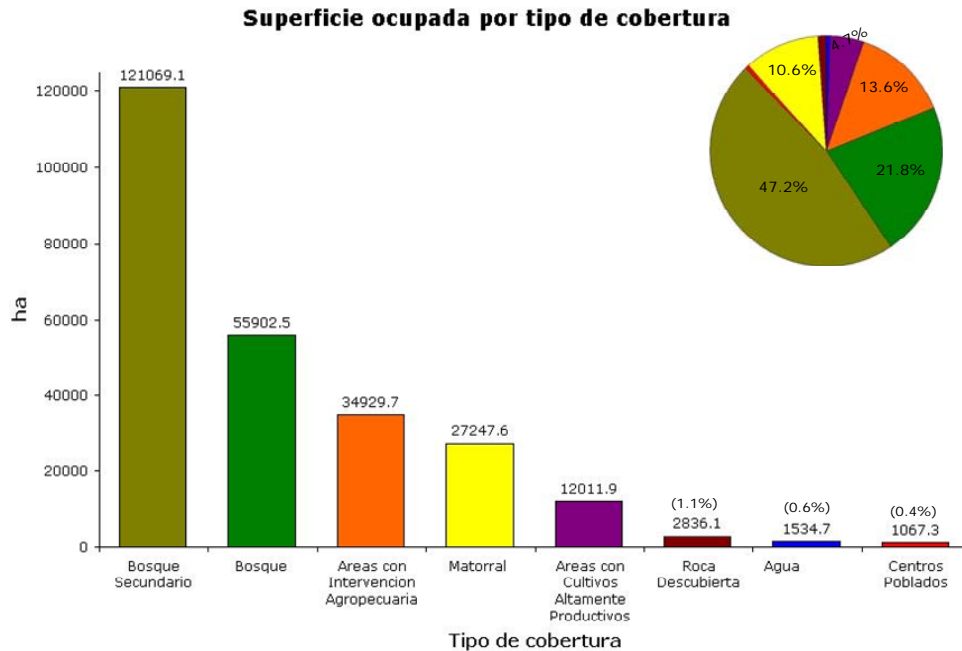


Figura 21. Superficie del área de estudio ocupada por cada tipo de cobertura.

Se debe destacar que la caracterización realizada es parcial, debido a que algunas variables como los tipos de suelos y la geomorfología, entre otras, aun quedan por caracterizar.

La caracterización de la distribución espacial del hábitat de los Triatomíneos a través del uso de variables biofísicas no es posible a menos que estas variables estén espacialmente caracterizadas. El producto de dicha caracterización en el caso de cada variable es un mapa de distribución de la misma. Hay variables que se pueden mapear de forma relativamente directa o sencilla, Sin embargo, existen otras que requieren de trabajo y herramientas adicionales muy diversas, tal y como se pudo apreciar a lo largo del presente capítulo. Se debe destacar el hecho de que las metodologías utilizadas para la construcción de los diferentes mapas de cobertura de las variables en cuestión, han sido modificaciones, en su mayoría, de metodologías que han sido desarrolladas por el grupo de ecología del paisaje del Instituto de Ciencias Ambientales y Ecológicas de la Universidad de Los Andes.

La utilización de técnicas geoestadísticas para la caracterización de las precipitaciones representa una herramienta importante en el estudio del

clima y el bioclima en la región, al tener en cuenta que la información climática es escasa, la interpolación a través del kriging permite generar mapas de distribución espacial de la precipitación en la región. Así pues, teniendo en cuenta que la gran mayoría de los organismos vivos presentan una distribución asociada a este elemento climático, se puede ir en busca de patrones que permitan identificar el tipo de respuesta de estos organismos a los gradientes de humedad, tal como en el caso de la subfamilia Triatominae, objeto del presente estudio.

La utilización de los índices propuestos por Rivas-Martínez para caracterizar el bioclima, es un aporte importante tanto metodológica como ecológicamente para el estudio de los patrones de distribución de la vegetación en el área de estudio, en la figura 22 se puede apreciar que más del 50% de su superficie corresponde con un bioclima húmedo pluvial, seguido en porcentaje por el bioclima xérico seco, pluvial subhúmedo y xérico semiárido respectivamente.

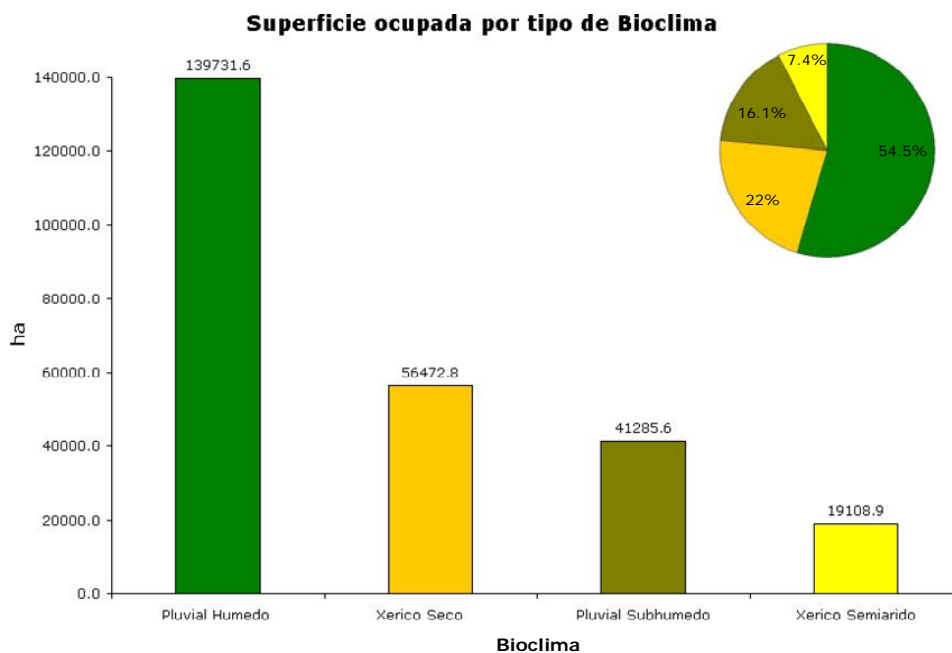


Figura 22. Superficie del área de estudio ocupada por cada tipo de cobertura.

La caracterización ecológica espacial del área de estudio es un paso prospectivo previo en muchos estudios ecológicos, es por ello que el aporte en la caracterización espacial de la precipitación, temperatura, bioclima y ecosistemas, llevado a cabo durante el desarrollo del presente trabajo puede ser empleado en estudios posteriores. En ese mismo orden de ideas se debe destacar que tener todas estas variables caracterizadas espacialmente a través de herramientas como los SIG o la geoestadística, puede ser de gran utilidad en los casos en que los patrones de distribución llegaran a cambiar, estos cambios podrían ser incorporados a la caracterización ecológica del área de forma relativamente sencilla y con eso obtener un modelo de respuesta ante dichos cambios, los cuales podrían ser naturales (como los cambios climáticos globales, desastres naturales, etc.) o antropogénicos (como cambios en el uso de la tierra, expansión de la frontera agrícola, construcción de obras de ingeniería de gran envergadura, etc.).

En los próximos capítulos se utilizará la caracterización espacial de las variables desarrolladas en el presente capítulo para la construcción de los modelos de distribución espacial del hábitat de los Triatominos y para el cálculo del Índice ecológico de riesgo potencial de transmisión vectorial de la enfermedad de Chagas.

Capítulo III

Modelo de distribución espacial del hábitat de
Triatominos

3.1 Introducción

3.1.1 Problemática

La transmisión vectorial de la enfermedad de Chagas es la forma de transmisión más común de esta zoonosis, a pesar de que existen algunos otros tipos de transmisión. Las iniciativas de control de la enfermedad de Chagas que han mostrado ser más eficientes son siempre aquellas que se realizan sobre los insectos vectores. Es por ello que resulta importante caracterizar espacialmente los lugares donde potencialmente se pueden hallar estos animales y considerar dicha distribución como un factor de riesgo para el contagio con *T. cruzi*. Así pues el principal objetivo de este capítulo es la descripción del hábitat de los triatominos a través de un modelo espacial, el cual puede ser útil en el estudio de la dinámica de transmisión de dicha enfermedad y en la toma de decisiones en cuanto a medidas de control de la misma. Proponemos en este capítulo sintetizar información de la ecología de los Triatominos contenida en la bibliografía, en lo que hemos denominado como modelo teórico o bibliográfico, en base al cual se construyó un modelo espacial de la distribución del hábitat de estos insectos partiendo de la caracterización ecológica del área de estudio llevada a cabo en el capítulo anterior.

3.1.2 Ecología y hábitat de los Triatominos

Los Triatominos (Insecta: Heteroptera: Reduviidae) son una subfamilia de insectos hematófagos, que se alimentan sobre sus huéspedes, generalmente por la noche, en un proceso lento que puede durar varios minutos (Borrór, 1992; Service, 1996), es entonces cuando la transmisión del parásito (cuya forma infectiva se encuentra alojada en la ampolla rectal de los insectos) tiene lugar. El triatolino infectado contamina con sus heces al hospedador durante y/o inmediatamente después de la ingesta de alimento (Gómez Núñez y Fernández, 1963; Aldana *et al.*, 2001).

Su ciclo de vida es hemimetábolo o incompleto, sus características biológicas y ecológicas, en todas las etapas del ciclo de vida son similares, éste consta de cinco estadios juveniles no alados e inmaduros sexualmente llamados ninfas cuya alimentación al igual que la de los adultos es con sangre. El ciclo de vida de los Triatominos, desde la oviposición hasta el adulto, toma al menos 3 o 4 meses en condiciones de laboratorio y en condiciones naturales el ciclo se completa aproximadamente en un año (Lent y Wydgozinsky, 1979; Service, 1996; Aldana *et al.*, 2001).

Los Triatominos, en general, habitan en bosques y áreas secas, muchos se alimentan de una amplia variedad de animales silvestres (Tabla 6), como armadillos, ratas, ratones, marsupiales, zorrillos, murciélagos, aves (Service, 1996).

Diferentes procesos han tenido como consecuencia una interacción mucho mayor entre estos insectos y las personas, y también existen evidencias de lo que se conoce como “proceso de domiciliación”, el cual se explica como una tendencia hacia hábitats más estables que ofrecen un suministro abundante de comida que, en algunos casos ha producido un hábitat altamente especializado y/o asociaciones con el hospedador. La tendencia principal en los triatominos es hacia una asociación progresivamente mayor con el hombre. En cuanto a la epidemiología y el control de la enfermedad de Chagas, esta tendencia es de gran importancia, que de acuerdo con Schofield (1988) puede describirse convenientemente por cinco categorías sucesivas que representan las fases en la ruta hacia la domesticación:

- i. Especies selváticas con hospedadores altamente especializados y asociación de hábitat.* Son especies tan especializadas a ecotopos silvestres particulares que su cría en el laboratorio se dificulta y es poco probable que se adapten a ambientes domésticos. Ejemplos: *Cavernicola pilosa*, invariablemente hallada con murciélagos y las tres especies de *Psammolestes* las cuales solo se hallan en nidos de aves.

- ii. *Especies selváticas con hábitats bastante especializados.* Los adultos son hallados ocasionalmente cerca o dentro de las casas atraídos por la luz. Ejemplos: *Triatoma protracta*, *T. platenses*, *T. rubrovaria*, *Eratyrus cuspidatus*, *Panstrongylus geniculatus* y algunas especies del genero *Rhodnius*.
- iii. *Especies selváticas con ecotopos más generales.* Ocasionalmente colonizan las casas pero son hallados generalmente en sus ecotopos silvestres. Ejemplos: *R. ecuadoriensis* y *R. neglectus*.
- iv. *Especies que conservan sus ecotopos silvestres pero están también asociadas comúnmente con el domicilio humano.* A menudo colonizan gallineros y otros encierros de animales domésticos. Ejemplos: *T. maculata* en Venezuela.
- v. *Especies adaptadas al ambiente domestico.* Principalmente restrictos a ambientes domiciliarios y peridomiciliarios, a lo largo de todo su rango geográfico. Ejemplo: *T. infestans* en Brasil. En Venezuela y Colombia: *R. prolixus*.

Las especies adaptadas al ambiente domestico y sus alrededores (peridomicilio) se alimentan de animales como; burros, caballos, perros, ratas, cerdos, gallinas y otras aves de corral, etc. (Tabla 6). El ciclo de vida de estas especies está comprometido con el domicilio humano y su periferia, hallándose huevos, ninfas y adultos en refugios hechos por el hombre para dichos animales alrededor de las casas, y dentro de estas (Forattini *et al.* 1970; Service, 2000).

Un factor clave en el proceso de domesticación es la dispersión, que puede ser pasiva o activa. En el primer caso algunos individuos aislados pueden ser transportados por su huésped a un nuevo hábitat donde al ser liberados darán inicio a una nueva colonia, también existe la posibilidad de que en zonas rurales los trabajadores que vuelven del campo con enseres, tales como leña, pastos, paja o herramientas, traigan en estos algunos insectos o huevos de los mismos. En el segundo caso la dispersión se da cuando los adultos vuelan, el vuelo está invariablemente asociado con

estados nutricionales pobres, los individuos que vuelan están hambrientos y este es un factor clave en la colonización de nuevos hábitats (Schofield *et al.* 1999).

Las actividades humanas en el ecotono entre áreas silvestres o prístinas y zonas pobladas y/o cultivadas y dentro del bosque; incluyendo la deforestación, la expansión de las fronteras urbana y agrícola, las migraciones, los cambios climáticos y el estatus socio-económico pueden propiciar cambios tanto en la ecología de los vectores, como en las probabilidades de contacto con estos y por ende de infección (Vásquez, et al 2004). La reinfestación domiciliar por *Triatoma infestans* se haya evidentemente asociada a la movilidad de la población humana. En localidades donde ésta es baja, su reaparición se torna más difícil (Forattini, *et al.* 1984).

En un paisaje fragmentado la disminución de huéspedes animales como resultado de la deforestación trae consigo un efecto profundo en las poblaciones de Triatominos que allí habitan, por una parte la eliminación de la competencia natural permite que el tamaño de las poblaciones de Triatominos se incremente en los relictos. Por otra parte, tales alteraciones pueden provocar cambios microclimáticos y/o una disminución de la disponibilidad de fuentes alimenticias considerable, obligando así a los insectos a dispersarse de los lugares de alimentación originales (Coimbra, 1988). La fragmentación del paisaje, generalmente originada por el cambio de uso de la tierra y otros cambios antropogénicos, podría ser considerada como un mecanismo que propicia la migración de las poblaciones silvestres de Triatominos, convirtiéndose así en un factor de riesgo importante para los asentamientos humanos en áreas con paisajes fragmentados.

Los patrones de reinfestación y flujo de genes a la escala de un centro poblado, se encuentran determinados por la dispersión a través del vuelo de los insectos y puede depender de la distancia entre las casas, la abundancia local de insectos y huéspedes y la cobertura vegetal. Dada la capacidad de dispersión por vuelo entre 200 y 2000m se ha hallado que *T. infestans* a

partir de algunos pocos focos peridomésticos, puede reinfectar todo un centro poblado.

La heterogeneidad espacial generada por los efectos de la configuración del paisaje y la cobertura vegetal puede afectar la distribución espacial de infestación por *T. infestans* y el riesgo de invasión domiciliaria, si estas actúan como barreras para la dispersión de los insectos. En Amamá (Brasil), se observó que la poca cobertura vegetal permite que una trampa de luz pueda divisarse desde un radio de 500 o 600m, mientras que en Trinidad en lugares donde la cobertura vegetal es más densa y hay árboles altos, la visibilidad de las trampas fue tan solo de 100 o 200m a la redonda.

Así pues, además de las deficiencias alimenticias típicas que propician el vuelo de los insectos, las diferencias en la configuración del paisaje así como de la cobertura vegetal implica una modificación en el número de insectos que llegan a las trampas de luz (Vázquez-Prokopec *et al.*, 2004), hecho que llama la atención al extrapolar este fenómeno e interpretar las viviendas como potenciales fuentes de luz atrayendo a estos insectos.

En América, se han hallado palmeras infectadas con diferentes especies de Triatomíneos. Las más frecuentemente encontradas son: *Rhodnius prolixus*, *R. neglectus*, *R. pictipes*, *R. nasutus*, *R. pallescens*, *R. neivai*, *R. robustus*, *Triatoma maculata*, *T. pseudomaculata*, *T. dimidiata*, *T. sordida*, *Panstrongylus megistus*, *P. lignarus*, *Eratyrus mucronatus* y *E. cuspidatus* (Barretto *et al.* 1969, Forattini *et al.* 1971, Gamboa 1973, Feliciangeli & Torrealba 1977, Whitlaw & Chaniotis 1978, D' Alessandro *et al.* 1984, Rossell-Reyes 1984, Diotaiuti *et al.* 1993 *citados en:* Bar *et al.* 2001).

En el Chaco (Argentina), la distancia media entre las palmas y los domicilios fue de 190.7m, en un rango que varió desde 50m hasta 1000m. Las especies halladas fueron: *T. sordida*, *T. platenses* y *Psammolestes coreodes* (Bar *et al.* 2001).

En Venezuela varias especies de Triatomíneos han sido halladas en asociación con palmeras: *R. prolixus* y *Copernitia tectorium* (Palmae), *R. robustus* y *R. prolixus* en palmeras silvestres como *Attalea maracaibensis* y *Acrocomia aculeata* (Longa y Scorza, 2005).

Existen más de cien especies de Triatominos, cuyo rango de dispersión puede ser muy amplio, como en el caso de *Panstrongylus geniculatus*, desde el sur de México al norte de Argentina, o de rango limitado, como *Triatoma obscura*, hallada solo en una región de Jamaica. *P. geniculatus* es considerada una especie euritermica porque tolera variaciones amplias de temperatura (Carcavallo *et al.* 1998a).

Latitudinalmente la mayoría de las especies se encuentran cerca o dentro de las áreas intertropicales. Sin embargo, *Triatoma sanguisuga* ha sido hallada en los Estados Unidos acerca de los 40°N, mientras que *T. infestans* y *T. patagonica* han sido encontradas cerca de los 40°S en Argentina. En cuanto a la altitud, la mayoría de las especies se hallan en tierras bajas (100 - 1800m) y otras en tierras altas; tal es el caso de *Triatoma infestans* hallada a 4100m, en Bolivia (Carcavallo *et al.* 1999).

Los Triatominos son muy sensibles a pequeñas variaciones tanto de temperatura como de humedad. En zonas calidas *T. infestans* puede tener dos generaciones por año, mientras que en climas más templados solo tiene una.

La mayor diversidad de estas especies se ha encontrado en biomas con estaciones secas y húmedas bien marcadas. En lugares con estaciones secas largas y altas temperaturas se han encontrado mayores densidades poblacionales. Estudios de campo y de laboratorio ha revelado que el rango óptimo de temperatura para la mayoría de las especies de Triatominos está entre 26°C y 30°C y un máximo de humedad relativa de 75%.

Curto de Casas y colaboradores (1994), llevaron a cabo una revisión bibliográfica extensa acerca de los factores bioclimáticos relacionados con la distribución y dispersión de las especies de Triatominos. El análisis consistió en buscar relaciones entre la Temperatura de cría y la extensión del ciclo de vida. Encontraron que la humedad relativa de la mayoría de las zonas endémicas apenas sobrepasa el 75% durante la estación húmeda. Consecuentemente basan su artículo en la hipótesis de que en condiciones de sequía los insectos hematófagos tienen que alimentarse o "picar" más

frecuentemente debido a la deshidratación. El metabolismo también se acelera, por lo que las densidades poblacionales aumentan.

T. infestans en zonas con altas temperaturas tiene dos generaciones por año, mientras que en zonas templadas o frías solo tiene una generación durante el mismo periodo. Observaciones recientes sobre el cambio climático, en particular sobre el calentamiento mundial y la Oscilación el Sur; el Niño, han revelado que temperaturas mas altas pueden aumentar la distribución geográfica de los vectores y la altitud a la que pueden sobrevivir. Esto es particularmente importante en el caso de las especies salvajes con tendencia a invadir los hábitats humanos. Si bien una menor humedad puede ampliar la distribución geográfica y aumentar la densidad de la población, también puede afectar negativamente los ciclos vitales en medios secos tropicales y subtropicales y zonas áridas (WHO, 2007).

Existen en nuestro país tres especies catalogadas como las más importantes, dada su capacidad vectorial, y que en orden de importancia son: *Rhodnius prolixus*, *Triatoma maculata* y *Panstrongylus geniculatus*. Los datos de seroprevalencia de la enfermedad de Chagas de los que se dispone en la actualidad son subreales dado que los mismos son obtenidos de algunas zonas endémicas y no de la totalidad, o por lo menos, la mayoría de los lugares. Los estados con mayor incidencia y considerados endémicos son: Barinas, Trujillo, Portuguesa, Guarico, Yaracuy, Carabobo, Sucre y Lara (Ramírez *et al.*, 2004).

De acuerdo a la bibliografía actual donde se correlacionan las características ecológicas con la distribución de especies de Triatomíneos en las Américas se tiene la distribución de las especies de acuerdo a las regiones fisiográficas principales, tal y como se describe en la tabla 3.

Tabla 3. Grandes unidades fisiográficas a las que se encuentran asociadas tres especies de Triatomos naturalmente.

Grandes Unidades Fisiográficas	Especie		
	<i>R. prolixus</i>	<i>P. geniculatus</i>	<i>T. maculata</i>
Bosques tropicales y subtropicales	x	x	-
Bosques secos tropicales y subtropicales	x	x	X
Bosques xerofíticos	x	x	X

En Venezuela existen iniciativas que parten del uso de modelos y sistemas de información geográfica para el estudio de enfermedades tales como: Malaria y Dengue así como de otras zoonosis (Indriago, 1999; Barrera, 2000; Delgado *et al.* 2003; Osborn *et al.* 2004; Delgado *et al.* 2004).

3.1.3 Hábitat y Modelos

Es de suma importancia la forma en que las especies responden a las variaciones de su hábitat, así pues, los modelos de hábitat deben ser desarrollados y probados a escalas relevantes para la ecología de los organismos objeto de estudio, ya que los patrones del uso del hábitat y sus efectos en los atributos del *fitness* (reproducción y supervivencia) pueden variar a diferentes escalas espaciales de resolución (Kroll y Haufler, 2006).

La combinación de factores climáticos con otros factores ambientales, ha sido ampliamente usada para explicar los patrones de vegetación alrededor del mundo. La cuantificación de tales relaciones especie-ambiente representa la clave de los modelos geográficos predictivos en ecología. Dichos modelos están basados generalmente en varias hipótesis, en cuanto a como los factores ambientales controlan la distribución de las especies y las comunidades (Guisan y Zimmermann, 2000).

Los tipos principales de modelos utilizados para la aproximación a las influencias futuras del clima sobre las enfermedades infecciosas incluyen modelos del tipo estadístico, modelos basados en procesos y modelos basados en paisaje. Estos tres tipos de modelos abordan diferentes interrogantes.

Los modelos estadísticos requieren que sean derivadas las relaciones estadísticas o empíricas entre la distribución geográfica actual de una enfermedad y las condiciones climáticas lugar-específicas actuales. Esto describe la influencia climática vigente, sobre la distribución actual de las enfermedades, dada la predominancia de los niveles de intervención humana (control de enfermedades, manejo ambiental, etc.), para así aplicar estas ecuaciones estadísticas y estimar la distribución futura de una enfermedad basada en la distribución actual, asumiendo que los niveles de intervención humana no cambian dentro de una zona climática particular.

Los modelos basados en procesos o matemáticos, usan ecuaciones que expresan las relaciones entre las variables climáticas y los parámetros biológicos tales como: reproducción de los vectores, supervivencia y tasas de incubación de los parásitos, entre otras. En su forma más simple estos modelos expresan, a través de una serie de ecuaciones, como una cierta configuración de las variables climáticas dadas afectaría la biología de los vectores y los parásitos, y por lo tanto la transmisión de la enfermedad. Estos modelos se aproximan a preguntas como; "si cambian las condiciones climáticas, ¿Cómo podrían estos cambios afectar la transmisión de una enfermedad?". El problema de incorporar contextos de intervención humana se puede solventar con la utilización de una "integración horizontal" entre diferentes disciplinas más compleja.

Dado que el clima influencia también el hábitat, los modelos basados en paisaje resultan sumamente útiles, ya que vinculan los métodos de análisis espacial al estudio tanto de los efectos climáticos como de otras variables ambientales (tipos de vegetación, topografía, hidrología, etc.), con los modelos basados en clima -estadísticos y matemáticos- (McMichael *et al.*, 2003).

En el presente trabajo proponemos construir un modelo espacialmente explícito basado en paisaje utilizando sistemas de información geográfica para integrar información extraída de la revisión bibliográfica.

3.2 Metodología

3.2.1 Formulación del modelo teórico

El modelo que se propone en este trabajo está basado en evidencia recopilada por expertos que han estudiado diferentes aspectos de la biología y la ecología de la subfamilia Triatominae desde hace varias décadas.

El modelo teórico o bibliográfico se desarrolló a través de una revisión bibliográfica detallada con el fin de caracterizar los factores ecológicos (bióticos y abióticos) reportados como asociados y/o determinantes del hábitat de los Triatominos, la síntesis del modelo teórico puede ser observada en la Tabla 6 de la sección de resultados del presente capítulo.

El modelo inicialmente depende del levantamiento de datos de presencia y/o ausencia de insectos en campo para su calibración y validación, Sin embargo, esta parte del trabajo no se pudo llevar a cabo. De forma alternativa, la aproximación metodológica que aquí proponemos puede percibirse como un primer paso en el modelado de la distribución del hábitat de Triatominos, además de representar una forma práctica de elaborar modelos de distribución de hábitat preliminares para estudios exploratorios.

3.2.2 Modelo Biofísico

Las características biológicas y ecológicas (bióticas y abióticas) que han sido reportadas asociadas al hábitat de los Triatomíneos en la literatura tal y como se describen en la caracterización del hábitat, resumidas en la Tabla 6 y definidas como Modelo Teórico, serán el punto inicial del desarrollo del modelo junto con la caracterización espacial de las variables ambientales (Capítulo II). Para el cálculo del modelo biofísico en el SIG se utilizaron los rangos que se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Parámetros biofísicos en base a los cuales se desarrollo el modelo biofísico

	Límite inferior	Límite Superior
Temperatura Máxima Media (°C)	24	34
Bioclima	Todos los tipos	
Altitud (m)	300	1500
Vegetación	Todos los tipos	

El modelo biofísico fue calculado a través de la opción "Map Calculation" utilizando el operador "Inrange" del software ILWIS 3.21® (ITC, 2001). Lo que dio como resultado el mapa que se presenta en la figura 23.

3.2.3 Modelo de intervención o de uso de la tierra

Este modelo está basado en el modelo biofísico, y de igual manera fue calculado utilizando el operador "Inrange" del software ILWIS 3.21® (ITC, 2001). Sin embargo, a diferencia del modelo biofísico, para el cálculo de este modelo se excluyen aquellas áreas donde la cobertura fuera: Carreteras, roca desnuda y áreas con cultivos altamente productivos, tal y como se puede apreciar en la figura 24.

3.2.4 Modelo de dispersión

Este modelo está basado en el modelo biofísico y además en las características fisonómicas de la vegetación, en el comportamiento de los insectos y en la caracterización bioclimática del área de estudio. Para lo cual se separaron las unidades de vegetación en mapas individuales de: Bosque, matorral, bosque secundario, áreas con intervención agropecuaria y áreas con cultivos altamente productivos.

A cada uno de estos nuevos mapas (figura 25) se les realizó un cálculo de distancia omnidireccional con la opción "Map Distance" del software ILWIS 3.21® (ITC, 2001). En base a las distancias descritas en la Tabla 5.

Tabla 5. Distancias consideradas para cada tipo de vegetación o cobertura en el modelo de dispersión

Tipo de vegetación o cobertura	Distancia de dispersión (m)
Bosque	250
Matorral	600
Bosque secundario	500
Áreas con intervención agropecuaria	1000
Áreas con cultivos altamente productivos	2000

3.3 Resultados

3.3.1 Modelo teórico o bibliográfico

Tabla 6. MODELO BIBLIOGRÁFICO O TEORICO: Síntesis de los factores bióticos y abióticos (tipos y rangos) reportados en la bibliografía como de gran importancia para el hábitat de los Triatomínos.

FACTORES	ESPECIE		
	<i>Rhodnius prolixus</i>	<i>Panstrongylus geniculatus</i>	<i>Triatoma maculata</i>
Latitud	Trópico	Sur de México – Norte de Argentina	Trópico
Altitud	300 – 1500 msnm		
Temperatura	26°C – 29°C		
Humedad	< 75%		
Tipo de vegetación	Bosques tropicales y subtropicales, Bosques secos tropicales y subtropicales, Bosques xerofíticos	Bosques tropicales y subtropicales, Bosques secos tropicales y subtropicales, Bosques xerofíticos	Bosques secos tropicales y subtropicales, Bosques xerofíticos
Fauna asociada	<p>Nidos de aves: <i>Mimus gilvus</i>, <i>Mycteria americana</i>, <i>Agamia agami</i>, <i>Caracara plancus</i>, <i>Cercibis oxycerca</i>, <i>Theristicus caudatus</i>, <i>Euxenura maguari</i>, <i>Neochon jubata</i>, <i>Phacellodomus rufifrons</i>, <i>Thryothorus rutilus</i>, <i>Polyborus plancus</i></p> <p>Nidos de mamíferos silvestres: <i>Didelphis marsupialis</i>, <i>Marmosa cinerea</i>, <i>Philander sp.</i>, <i>Tamandua tetradáctila</i>, <i>Conepatus semistriatus</i>, <i>Cuniculus pacca</i>, <i>Dasybus novemcictus</i>, <i>Oechomys concolor</i>, <i>Rattus</i></p>	<p>Nidos de animales silvestres: Madrigueras de <i>Dasypodidae</i>, cuevas y refugios de marsupiales y osos hormigueros, nidos de aves</p> <p>En los domicilios: Normalmente en el peridomicilio y raras veces en las casas, son atraídos por las luces</p>	<p>Nidos de aves: <i>Mycteria americana</i>, Furnariidae, Dendrocolaptidae</p> <p>En los domicilios: Peridomicilio (gallineros y palomares), en las casas, son atraídos por las luces</p> <p>En hábitat silvestres asociados a: <i>Didelphis marsupialis</i>, <i>Tamandua tetradactila</i>, <i>Dasybus</i></p>

	<p><i>rattus</i></p> <p>Reptiles: <i>Ameiva</i> sp. y otras lagartijas</p> <p>En los domicilios: Gallineros, palomares, corrales, son atraídos por las luces</p> <p>Enemigos biológicos (predadores): <i>Apiomerus</i> sp., algunos Tenebrionidae, hormigas del genero <i>Tapinoma</i>, arañas de las familias; Theridiidae y Heteropodidae.</p>	<p>En hábitat silvestres asociados a: <i>Philander opossum</i>, <i>Didelphis marsupialis</i>, <i>novemcinctus</i>, <i>tetradáctila</i>, <i>Cuniculus pacca</i>, <i>Coendu</i> sp., <i>Micronicterys</i> sp.</p>	<p><i>novemcinctus</i>, <i>Sigmodon</i> sp., varios murciélagos, con otros Triatominos (<i>Eratyrus mucronatus</i> y <i>Cavernicola pilosa</i>) y con Pseudoescorpiones</p>
Flora asociada	<p>Palmas: <i>Copernicia tectorum</i>⁺, <i>Mauritia flexuosa</i>⁺, <i>M. minor</i>, <i>Acrocomia sclerocarpa</i>¹, <i>A. aculeata</i>⁺, <i>Orbignya speciosa</i>¹, <i>Maximiliana elegans</i>¹, <i>Sabal mauritiiformis</i>², <i>Attalea butyracea</i>⁺, <i>Scheelea</i> sp. ¹, <i>Cocos nucifera</i>¹, <i>Oenocarpus bataua</i>⁺, <i>Leopoldina piassaba</i>, <i>Jessenia polycarpa</i>¹, <i>J. bataua</i>⁺</p> <p>Árboles: <i>Samanea saman</i>, <i>Chlorophora</i> sp.¹,</p> <p>Bromelias: <i>Aechmea</i> sp., <i>Aechmea castelnavii</i>²</p>	<p>Palmas: <i>Copernicia tectorum</i>⁺, <i>Acrocomia sclerocarpa</i>¹, <i>A. aculeata</i>⁺, <i>Leopoldina piassaba</i>, <i>Arecastrum romanzoffianum</i>¹ (bajo los troncos y cortezas, sobre bromelias)</p>	<p>Palmas: <i>Attalea butyracea</i>⁺, <i>Acrocomia sclerocarpa</i>¹, <i>A. aculeata</i>⁺, <i>Scheelea</i> sp. ¹, <i>Copernicia tectorum</i>⁺, <i>Sabal mauritiiformis</i>², <i>Cocos nucifera</i>¹ (Troncos huecos y muertos, bromelias)</p>

(Carcavallo *et al.* 1998b) ⁺ No ha sido reportado en Lara según (MOBOT, 2009) ¹No reportada en Venezuela (MOBOT, 2009)
² Reportada en Lara según (MOBOT, 2009)

Nidos de aves:

**Mimus gilvus*: Paraulata llanera. Común en las zonas pobladas y rurales así como de otras zonas abiertas y secas con arbustos aislados, comunes de las zonas secas dominadas por acaceas, cactus y arbustos

***Mycteria americana*: Gaban huesito. Asociado comúnmente a los cuerpos de agua, lagunas, ríos, caños, manglares, etc. Migran cortas distancias, regular en los llanos e impredecible e irregular en otros lugares

***Neochen jubata*: Residentes muy localizados de zonas húmedas en los llanos.

**Phacellodomus rufifrons*: Guaití. Residente común de zonas arboladas alrededor de casas rurales, bordes de los bosques de galería, zonas secas disturbadas con árboles aislados y pocos arbustos, en menor numero en zonas húmedas y en bordes de bosque húmedos.

**Thryothorus rutilus*: Cucarachero pechicastaño. Típicos del borde de bosques semidecuidos, humedos y en colinas.

*Furnariidae y Dendrocolaptidae: ambas son grandes familias bien distribuidas en todo el país.

** *Agamia agami*: Garza Pechicastaña. Poco común, residente con baja densidad muy localizado en arroyos arbolados, lagunas, áreas lodosas y húmedas en bosques de galería y/o estacionales. Distribuido en los Llanos, Perijá y Mérida. No se reporta en Lara.

* *Cercibis oxycerca*: Tarotaro. Llanos occidentales. No reportado en Lara.

* *Theristicus caudatus*: Tautaco. Común de las sabanas, distribuido en los Llanos. No reportado en Lara.

* *Euxenura maguari*: Gaban pionio. Residente local de sabanas tropicales secas. No reportado en Lara.

** *Polyborus plancus* (ahora *Caracara cheriway*): Caricare. Residente común de zonas secas abiertas y con escasos árboles, zonas agrícolas y a lo largo del borde de los ríos en zonas boscosas. Reportado al sur oeste de Lara.

** Según Hilty no ha sido reportado en Lara

* Según Hilty ha sido reportado en Lara

Nidos de mamíferos silvestres:

¹ *Didelphis marsupialis*: Dos subespecies; *Didelphis marsupialis marsupialis* (a) y *Didelphis marsupialis colombica* (b). Faro, rabopelado, rabopelao, rabipelao. La subespecie b se encuentra en la vertiente este de Los Andes entre 10 y 1100 m de altura. Reportada al sur de Lara por Linares.

® *Philander* sp.: No esta reportada ninguna especie en Lara (Linares, 1998).

® *Tamandua tetradáctila*: No esta reportada ninguna especie en Lara (Linares, 1998).

® *Conepatus semistriatus*: No esta reportada ninguna especie en Lara (Linares, 1998).

¹ *Dasypus novemcictus*: Cachicamo común. Distribuida ampliamente en toda Venezuela entre 10 y 2700m de altitud.

® *Oecomys concolor*: Rata trepadora oscura. No esta reportada ninguna especie en Lara (Linares, 1998).

¹ *Sigmodon hispidus*: Rata de pastizales parduzca. Reportada en Los Andes entre 200 y 1580m de altitud.

¹ Reportada en Lara según Linares

® No reportada en Lara según Linares

3.3.2 Distribución del modelo biofísico

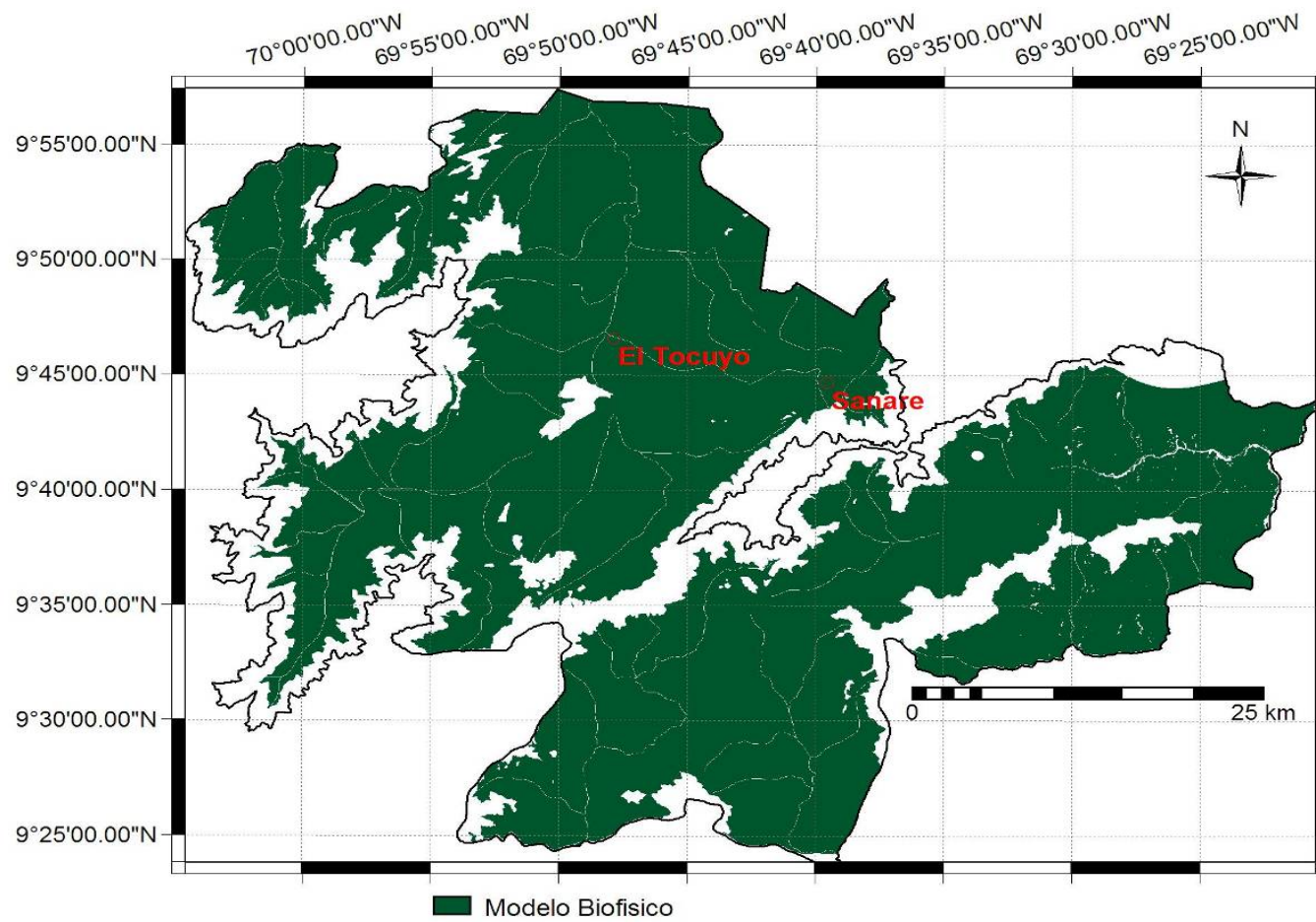


Figura 23. Distribución espacial potencial del hábitat de los Triatominos de acuerdo al modelo biofísico.

En la figura 23 se observan en verde las áreas en las cuales el modelo biofísico predice la distribución espacial del hábitat de los triatominos. Las áreas descritas por el modelo biofísico cubren una gran proporción del área de estudio, exactamente el 80% de la misma. En este modelo han sido excluidos los cursos de agua, ya que el ciclo de vida de los Triatominos, a diferencia de otros grupos de insectos vectores como los dípteros, no está comprometido con los cuerpos de agua en ninguna de sus etapas.

Se puede observar también como el borde del área de estudio (línea negra) que coincide con la cota altitudinal de 1800m, no llega a ser alcanzado por los bordes del modelo biofísico.

3.3.3 Distribución del modelo con intervención o uso de la tierra

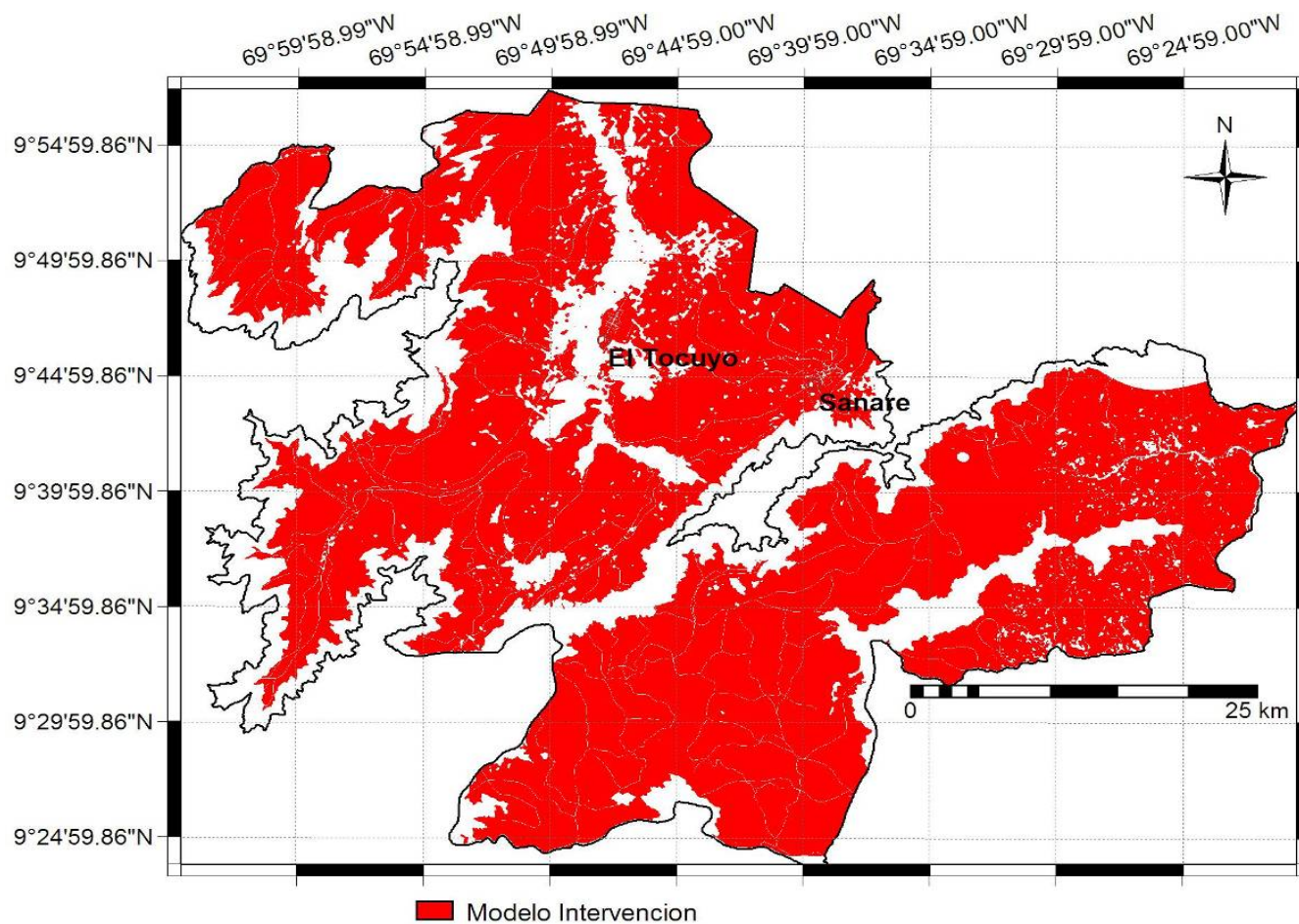


Figura 24. Distribución espacial potencial del hábitat de los triatomines de acuerdo al modelo con intervención o uso de la tierra.

En la figura 24 se pueden apreciar (en rojo), las áreas que el modelo de intervención o de uso de la tierra predice como la distribución espacial potencial del hábitat de los Triatominos. Las áreas descritas por el modelo de intervención o uso de la tierra es proporcionalmente menor que el área de estudio, cubriendo un 74% de la misma, estas áreas a su vez, cubren una menor superficie que las áreas descritas por el modelo biofísico (área verde de la figura 23).

En este modelo las coberturas: vialidad, roca descubierta, agua y cultivos altamente productivos, han sido excluidas, de manera de incorporar el parámetro intervención o uso de la tierra en el modelo, teniendo en cuenta que los insectos no se encuentran en estas áreas particulares.

3.3.4 Distribución del modelo de dispersión de los insectos

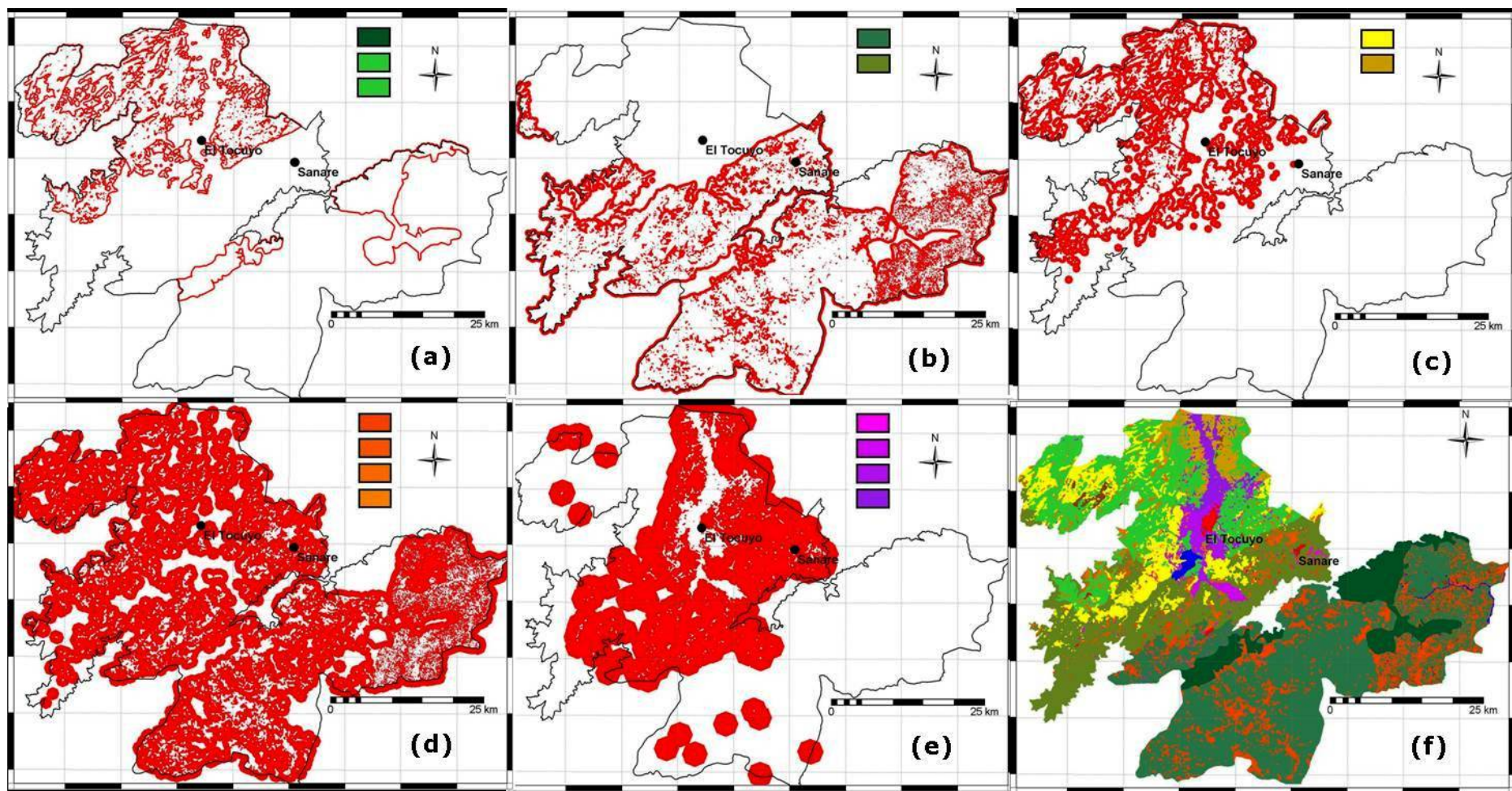


Figura 25. Distribución del modelo de dispersión para cada tipo de cobertura.

En la figura 25 se pueden apreciar en rojo, las franjas de dispersión, acorde a las distancias descritas en la tabla 5 para: a) bosque, b) bosque secundario, c) matorral, d) áreas con intervención agropecuaria, e) áreas con cultivos altamente productivos. La figura f) corresponde al mapa de ecosistemas, cuya representación (color) del tipo de cobertura, se observa en la parte superior derecha del resto de las figuras (a-e).

En esta figura se puede observar como los diferentes tipos de cobertura han sido excluidos de los mapas de dispersión y solo quedan las franjas alrededor de las mismas, donde el modelo de dispersión predice una dispersión potencial a partir de dichas coberturas.

Todas estas franjas de dispersión, excepto la de las áreas con cultivos altamente productivos (e), representan una dispersión actual de insectos, mientras que la franja e, representa la dispersión potencial ocasionada por la remoción total de la cobertura vegetal para la implantación de ese tipo de cultivos.

Al observar las franjas de dispersión y comparar entre ellas, es posible notar que existe un solapamiento entre las franjas de dispersión de los diferentes tipos de cobertura, Sin embargo, esta información, mas allá de ser redundante, será de gran utilidad mas adelante al incorporar la información acerca de dentro de que franjas de dispersión se encuentran los centros poblados, al Índice ecológico de riesgo potencial de la transmisión vectorial de la enfermedad de Chagas (Capítulo IV).

3.4 Discusión

El modelo de distribución espacial del hábitat de los Triatominos desarrollado en el presente trabajo para los municipios Andrés Eloy Blanco y Morán del estado Lara, representa un aporte metodológico en el estudio ecológico de los Triatominos y para el modelado ecológico de la enfermedad de Chagas.

El uso de modelos para el estudio de la distribución del hábitat de especies es hoy en día, de uso muy común entre los ecólogos. Se debe tener en cuenta que para su desarrollo es imperioso contar con bases de datos diversas de muy alta calidad y bien estructuradas. En el caso del presente trabajo se debe destacar la carencia de bases de datos que cumplieran con todas esas características, hecho que implicó un reto importante en su desarrollo y el cual fue afrontado a través del uso de la información bibliográfica, el análisis espacial, la geoestadística, los sensores remotos y los sistemas de información geográfica. Lo que permitió ensamblar un modelo que puede ser adaptado a nuevos escenarios a través de modificaciones relativamente sencillas de los parámetros sujetos a cambio, lo cual brinda un carácter práctico en escenarios de cambio en general.

El modelo de distribución del hábitat de Triatominos aquí desarrollado parte de premisas rescatadas de trabajos previos hallados en la bibliografía, lo cual hace que este modelo sea bastante general, hecho que puede ser apreciado al realizar una simple comparación de las superficies ocupadas por los modelos con el total del área de estudio (256598.8 hectáreas), el modelo biofísico o natural abarca un 80.36% y el modelo con intervención o uso de la tierra un 74.39% (Figura 26).

En cualquiera de los casos esto implica que los modelos predicen la presencia potencial de Triatominos en más de $\frac{3}{4}$ de la superficie estudiada. Hecho que puede contribuir en el entendimiento y explicación de las tasas de infección por *T. cruzi* halladas en algunos lugares de dicha área (Rodríguez-Bonfante, 2007).

Debe tenerse muy en cuenta que la aproximación llevada a cabo en el presente estudio se basa en la distribución del hábitat de los Triatominos, que es solo uno de los componentes de la dinámica de transmisión vectorial de la enfermedad de Chagas, zoonosis que debe ser entendida como un sistema natural sumamente complejo.

El modelo desarrollado sirve como una base a la cual se deben ir integrando mas factores involucrados en la dinámica de transmisión, realzando el valor y la importancia de que, incluso las aproximaciones de

modelización que cuentan con bases de datos bastante completas y en las que se logran desarrollar modelos matemáticos sofisticados como la propuesta de Cohen y Gürtler (2009), concluyen que las predicciones cualitativas pueden dar una mejor apreciación de los patrones reales de transmisión de *T. cruzi* a la escala a la que trabajaron.

La propuesta aquí presentada al ser una aproximación cualitativa en la búsqueda de comprender y describir los componentes de un fenómeno ecológico complejo como lo es la transmisión de enfermedades infecciosas, requiere de comprobación de campo para ganar precisión.

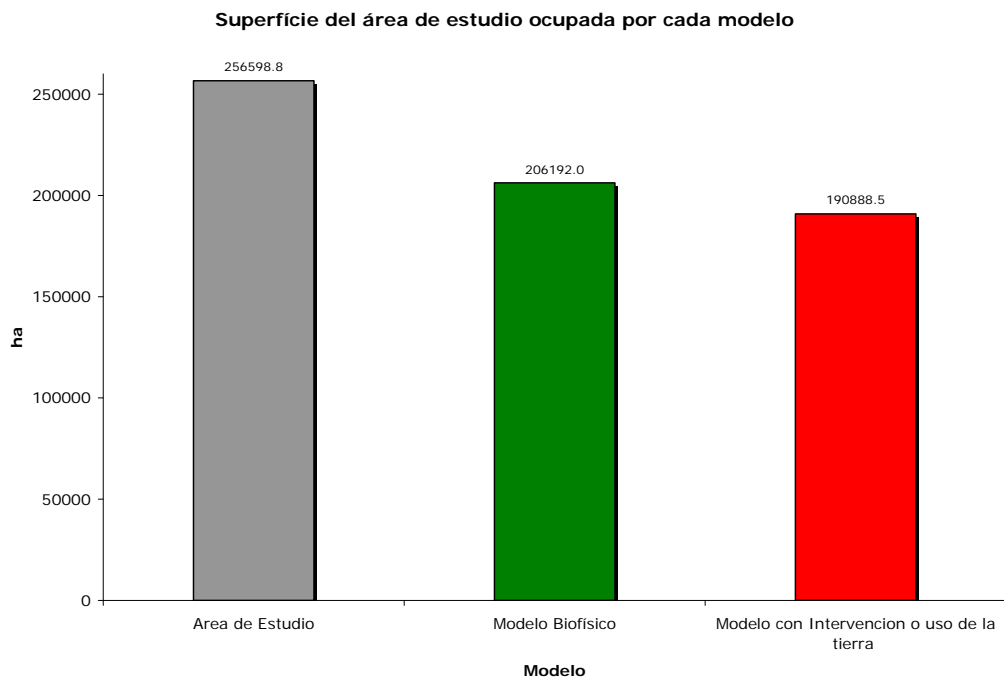


Figura 26. Superficie del área de estudio (barra gris, 100%), cubierta por el modelo biofísico (barra verde, 80.36%) y el modelo con intervención o uso de la tierra (barra roja, 74.39%)

Uno de los aportes adicionales del modelo desarrollado es la capacidad de integración de datos de índole muy diversa (ambiental, social, uso de la tierra, climático, epidemiológico, etc.), que a pesar de que en esta etapa sea susceptible a incertidumbre o subjetividad tiene el potencial de integrar la visión general del proceso de transmisión de la enfermedad de Chagas como

un fenómeno ecológico, a través del estudio de la distribución espacial del hábitat de los triatominos.

La incorporación de los datos de fauna y flora asociados a los triatominos reflejados en modelo teórico (Tabla 6), no ha sido posible debido a la carencia de mapas de distribución de dichas especies, Sin embargo, se logro conocer si las especies han sido reportadas para Venezuela y en particular en el estado Lara, a través de la consulta de diferentes textos y algunas bases de datos, tal y como se muestra en la Tabla 6 y sus anexos. Una forma a través de la cual dicha información puede ser integrada al modelo es a través de una evaluación ecológica rápida, para detectar la presencia de estas especies animales y vegetales, con lo cual se podrían generar mapas de distribución puntual de las mismas para ser incorporados luego a los modelos biofísico y de intervención, de modo que dichos modelos puedan ganar mas precisión.

Algunas otras aproximaciones de modelización aplicadas al estudio de los Triatominos, han sido llevadas a cabo a través de la aplicación del Modelado de Nicho Ecológico (MNE), cuyas técnicas son utilizadas para predecir el rango de ocurrencia de una o varias especies a partir de la extrapolación de datos de presencia (o ausencia) junto a capas de datos ecológico-ambientales (mapas de distribución de variables ambientales), tales son los trabajos de Townsend Peterson (2002) y de López-Cárdenas (2005) y colaboradores. En ambos casos se utilizo la herramienta informática conocida como Algoritmo Genético de Producción de Reglar Fijas (GARP por sus siglas en ingles). Estos algoritmos generan un grupo de reglas o ecuaciones diferenciales que describen la relación entre la presencia de la especie y los valores de las capas ecológico-ambientales. Cada una de esas reglas es considerada como un gen, así el grupo de reglas es combinado de forma aleatoria y siguiendo premisas de la genética, para generar posteriormente muchos modelos que describen la ocurrencia potencial de las especies, y a partir de los cuales se generan (en un SIG) mapas promedio de

dichas ocurrencias potenciales o mapas de predicción del nicho ecológico de las mismas.

Al comparar el MNE con el modelo que aquí se presenta, se puede detectar cierta similitud en cuanto a la aplicabilidad y el potencial debido a que estos basan sus predicciones en las relaciones existentes entre las coberturas y la presencia de los insectos, mientras que el nuestro basa las predicciones en la información bibliográfica.

En nuestro caso por no contar con datos de presencia, utilizamos la alternativa de integrar información ecológica descrita con anterioridad para determinar las zonas donde las condiciones ecológico-ambientales son favorables para el mantenimiento de las poblaciones de Triatomíneos. Una diferencia importante entre nuestra propuesta y el MNE a través de algoritmos genéticos, es que el MNE utiliza modelos de caja negra porque construyen sus respuestas o soluciones únicamente a partir de los datos procesados sin tomar en cuenta los parámetros que definen el proceso.

La propuesta aquí planteada está basada en la integración de la información bibliográfica, es decir que se basa los principios físicos conocidos *a priori*, hecho que lo convierte en un modelo de caja blanca o modelo físico.

La integración de ambas aproximaciones es posible, para ello se deben utilizar los mapas de distribución de las variables construidos desde cero para nuestra área de estudio en particular, junto a datos de presencia de los insectos recavados en campo para modelar el nicho ecológico de una forma más precisa a través de la utilización de los algoritmos genéticos, debido a que en general y por defecto dichas herramientas informáticas utilizan capas ecológico-ambientales desarrolladas para regiones muy amplias y al ser utilizadas a mayor escala (regiones más pequeñas) pierden resolución y precisión.

Así como la presencia potencial de los Triatomíneos determinada por las condiciones ecológico-ambientales descritas en los modelos de distribución del hábitat, la capacidad de dispersión de estos animales representa un factor importante a tomar en cuenta si se percibe el contacto entre estos y los seres humanos como un factor de riesgo para el contagio con *T. cruzi*.

La dispersión de estos insectos puede ser activa o pasiva, ésta última está determinada en general por la intervención humana, los hábitos de labranza y los animales peridomésticos. Mientras que la dispersión activa es favorecida, entre otros factores, por el estado nutricional o de deshidratación (que propicia el vuelo) y la atracción por fuentes de luz (propiciada por la fisionomía de la vegetación). El modelo de dispersión fue desarrollado en base a estos factores detonantes de la dispersión. Así que su potencial radica en que la predicción de la presencia de los insectos ya no es en $\frac{3}{4}$ del total del área de estudio, sino en toda ella e incluso en zonas que se encuentran fuera de la misma (esta información no tiene relevancia al tomar en cuenta que la delimitación de dicha área está basada principalmente por los límites políticos y no por límites geográficos o ecológicos reales). Este modelo contribuye a la incorporación de un parámetro dinámico, como la dispersión, dentro del modelo. Además la incorporación de la información que aporta el mismo será uno de los insumos principales en el desarrollo y el cálculo de uno de los subíndices del Índice ecológico de riesgo potencial de transmisión vectorial de la enfermedad de Chagas que es presentado en el siguiente capítulo.

Capítulo IV

Índice ecológico de riesgo potencial de
transmisión vectorial de la enfermedad de
Chagas (IER)

4.1 Introducción

4.1.1 Problemática

La enfermedad de Chagas es una zoonosis debido a que su agente etiológico, *T. cruzi*, puede ser transmitido de otros animales vertebrados a los seres humanos o viceversa. Una de sus formas de transmisión más importantes es la transmisión vectorial llevada a cabo por insectos pertenecientes a la subfamilia Triatominae. La transmisión vectorial de la enfermedad de Chagas depende, entre otros factores, de aquellos que pudieran afectar directa o indirectamente la presencia y el comportamiento de los insectos vectores. Es importante entonces, cuantificar como la configuración espacial de dichos factores pudiera incidir en la dinámica de transmisión. En los capítulos anteriores se pudo observar como el hábitat potencial de estos insectos está distribuido prácticamente en toda el área de estudio. Es por ello que el principal objetivo de este capítulo es la formulación de un Índice ecológico de riesgo potencial de transmisión vectorial de la enfermedad de Chagas en los centros poblados del área de estudio, utilizando el análisis de la configuración espacial de las variables ecológicas y climáticas desarrolladas en el capítulo 2 del presente trabajo para cada uno de los 117 centros poblados dentro del área de estudio.

4.1.2 Ecología de enfermedades infecciosas

La epidemiología puede ser definida como el estudio de los factores que determinan enfermedad y/o infección en las poblaciones humanas, entre las preguntas que intenta responder están: ¿Qué causa la enfermedad? Y ¿cómo se identifican las causas? La epidemiología depende de otras disciplinas científicas como la biología para entender mejor los procesos de las enfermedades; Las ciencias de información geográfica para el almacenamiento de datos y el mapeo de los patrones de la enfermedad y de

las ciencias sociales para la interpretación de los factores de riesgo (Last, 2001).

La epidemiología del paisaje involucra la identificación de áreas geográficas donde es transmitida una enfermedad, es una aproximación holística que comprende las interacciones y asociaciones entre los elementos en la dinámica de transmisión de enfermedades que forman parte de los ambientes físicos y culturales. Sus orígenes conceptuales datan de los años sesenta, cuando el epidemiólogo ruso Pavlovsky (1966), propuso que a través del conocimiento de la vegetación y de las condiciones geológicas necesarias para el mantenimiento de algunos patógenos específicos en la naturaleza, se puede utilizar el paisaje para identificar la distribución temporal y espacial del riesgo de enfermedades, fue el quien introdujo el concepto de "Anidamiento" o "Focalización" (del inglés "Nidality" o "Focality") de los paisajes, que consiste en la idea de que existen nidos o focos de infección que están determinados por el ecosistema completo, es decir que en dichos focos convergen características particulares de aspectos ambientales clave como la elevación, temperatura, precipitación y humedad, que afectan la presencia, el desarrollo, la actividad y la longevidad de patógenos, vectores y reservorios de infección, así como sus interacciones con los seres humanos que comparten dichos territorios.

La epidemiología del paisaje encuentra sus raíces en la ecología del paisaje, por lo que esta disciplina analiza, a través del espacio y el tiempo, los patrones de riesgo y los factores de riesgo ambientales asociados a la transmisión de enfermedades (Galuzo, 1975). Este campo emerge a partir de la teoría acerca de que la historia de vida de la mayoría de los vectores, huéspedes y patógenos tiene un componente espacial importante dado el vínculo entre el paisaje y los determinantes ambientales que controlan la distribución de los organismos. Esta disciplina ha encontrado un gran aliado en desarrollos teóricos y tecnológicos como los sistemas de información geográfica, los sensores remotos y los métodos estadísticos que incluyen el componente espacial (Kitron, 1998)

El concepto de epidemiología del paisaje ha sido aplicado analíticamente para el estudio de algunas enfermedades dentro de las que se incluyen: Malaria, hantavirus, enfermedad de Lyme, enfermedad de Chagas, virus del Nilo, dengue, encefalitis, la rabia, etc.

La enfermedad de Lyme es una enfermedad de gran importancia epidemiológica en el hemisferio norte, cuyo agente etiológico son bacterias del género *Borrelia* y es transmitida por garrapatas pertenecientes al género *Ixodes*. Recientemente en los Estados Unidos ha habido un incremento en el número de personas padeciendo esta enfermedad, debido a lo cual, se llevo a cabo un estudio en el que desarrollaron modelos espacialmente explícitos para predecir la distribución de *Ixodes scapularis*.

La relación entre la presencia de *Ixodes* y datos ambientales a gran escala permitió obtener información acerca de los determinantes esenciales de idoneidad de hábitat para dicha especie, predecir zonas de riesgo para la enfermedad y generar escenarios futuros de distribución de *I. scapularis* a lo largo de todo el país (Brownstein *et al.* 2003).

La enfermedad de Chagas ha sido abordada por la epidemiología del paisaje en trabajos como los de Vázquez-Prokopec y colaboradores (2002, 2005 y 2008) en Argentina, donde se ha logrado estudiar la dispersión activa de *Triatoma infestans*, los patrones de reinfestación por *Triatoma guasayana* en los domicilios y los factores ambientales y demográficos que determinan la distribución espacial de *T. guasayana* en el peridomicilio y en hábitats selváticos en zonas rurales de ese país. Así mismo en México Townsend-Peterson y colaboradores (2002), evaluaron los reservorios potenciales de la enfermedad de Chagas.

La ecología de las enfermedades infecciosas es el estudio de los principios subyacentes que influyen los patrones espacio-temporales de las enfermedades, intenta responder preguntas acerca de ¿Cómo varían los patrones de las enfermedades? o ¿cuales son las variables más importantes?

Difiere de la aproximación medica clásica en que su principal objetivo no es la descripción de las patologías de los individuos y difiere de la epidemiología en que el énfasis se hace en los procesos generales de las interacciones entre poblaciones mas que en la caracterización de las enfermedades específicas (Glass, 2009).

El principio propuesto por Gause (1934) o principio de exclusión competitiva (Hardin, 1960) indica que en la naturaleza no pueden existir los “competidores totales”, es decir que en un ambiente con recursos finitos uno de los competidores siempre dominará al otro, llevándolo a la extinción o a una modificación evolutiva o de comportamiento hacia otro nicho ecológico, este ultimo concepto propuesto por G. E. Hutchinson (1959), indica que las especies pueden coexistir debido a que se encuentran en un espacio multidimensional, en el cual cada dimensión está representada por un factor biótico u abiótico, así pues cada especie existirá solo en una configuración de condiciones bióticas y abióticas particulares o nicho, lo cual ayuda a comprender el porque los “competidores totales” no pueden existir. De acuerdo a lo expuesto por Glass (2009), en ecología de enfermedades infecciosas, la dinámica de transmisión de enfermedades es percibida como el solapamiento en el espacio y el tiempo de los nichos de las poblaciones que componen el sistema.

4.1.3 Índices y factores de riesgo

De forma general un índice de riesgo considera el peligro o amenaza que un evento pueda producir frente a la fragilidad que pueda presentar un área dada. Son métodos de evaluación de peligros cualitativos o semicuantitativos directos y relativamente simples que dan como resultado una clasificación del riesgo asociado a un evento particular (Cendero *et al.* 1992).

En las ciencias médicas el término factor de riesgo se refiere a una variable asociada al incremento en el riesgo de una enfermedad o infección. Es necesario hacer énfasis en que los factores de riesgo están correlacionados con la enfermedad o infección pero no causan directamente la misma. Los factores de riesgo son evaluados al comparar el riesgo de aquellos expuestos al potencial factor de riesgo con aquellos que no lo están (Mokdad et al. 2004).

En el presente trabajo a partir del análisis de la configuración espacial de variables ecológicas y climáticas tales como: fragmentación del paisaje, intervención humana o uso de la tierra, bioclima, rangos de dispersión de los insectos y cobertura en los centros poblados, se generan intervalos numéricos asociados a una clasificación del riesgo de que en un centro poblado pueda ocurrir potencialmente la transmisión vectorial de *T. cruzi*. Así pues, ajustando el planteamiento del Índice ecológico de riesgo potencial de Transmisión Vectorial de la Enfermedad de Chagas, en lo adelante denominado IER. Al concepto de índice de riesgo en general, el peligro o amenaza es el contagio vectorial de los habitantes de los centros poblados con *T. cruzi* y la vulnerabilidad o fragilidad del área es la configuración ecológica y climática espacial que presentan dichos centros poblados.

4.2 Metodología

El Índice ecológico de riesgo potencial de transmisión vectorial de la enfermedad de Chagas (IER), es una propuesta innovadora desarrollada en el presente trabajo, depende del cálculo de subíndices, coeficientes y promedios ponderados para los factores ecológicos y climáticos considerados. Dichos índices y coeficientes también fueron propuestos y desarrollados por vez primera en este trabajo, estos fueron desarrollados recopilando información a partir del uso de un sistema de información geográfica, integrando la misma con información bibliográfica a través del uso de diferentes metodologías (descritas a continuación). La asignación de los

valores correspondientes a cada subíndice fue realizada de forma arbitraria con base en información bibliográfica previa. Los valores del IER como los subíndices, coeficientes y promedios ponderados fueron normalizados y por ende varían entre cero y uno (0-1) y no poseen unidades.

4.2.1 Subíndice bioclima (sB)

El subíndice bioclima (sB) fue elaborado al asignar a cada una de las categorías en la clasificación bioclimática del área de estudio un valor, siendo mas altos los valores de los bioclimas xérico seco y xérico semiárido y menos altos para los bioclimas mas húmedos; pluvial húmedo y pluvial subhúmedo, tal y como se describe en la tabla 7. Dicha asignación de valores se realizo con base en la propuesta de Curto de Casas y colaboradores (1994) acerca de que los Triatominos, en ambientes más secos tienden a deshidratarse y por ende a picar con más frecuencia.

Tabla 7. Valores del subíndice bioclima para cada tipo de bioclima

Bioclima	Valor
Pluvial Húmedo	0.3
Pluvial Subhúmedo	0.6
Xérico Seco	0.8
Xérico Semiárido	1

Bioecológicamente, los valores más altos del sB (cercaos a uno), deben ser interpretados como bioclimas en los que los Triatominos requieren mayor cantidad de ingestas de sangre. Por otra parte los menores valores del subíndice bioclima (cercaos a cero) describen bioclimas que no favorecen un incremento en la frecuencia de ingestas de sangre por los Triatominos debido a la deshidratación.

4.2.2 Coeficiente de fragmentación del paisaje (cF).

La fragmentación del paisaje, generalmente originada por cambios antropogénicos, es considerada como un mecanismo que propicia la migración de las poblaciones silvestres de Triatomíneos, convirtiéndose así en un factor de riesgo importante para los asentamientos humanos en áreas con paisajes fragmentados.

A través del coeficiente de fragmentación del paisaje (cF) se busca cuantificar la fragmentación del paisaje alrededor de los centros poblados, percibiendo la fragmentación como el número de unidades de paisaje o coberturas ocupando un área determinada (Badii y Landeros, 2006). Para calcular el coeficiente de fragmentación del paisaje (cF) primero fue necesario realizar un mapa de distancias con un radio de 500m alrededor de cada centro poblado, para ello se utilizó la opción "distance map" del software ILWIS 3.21® (ITC, 2001). Este mapa da como resultado un polígono circular de 500m de radio en cada centro poblado. Este mapa de polígonos (CP_500m) fue luego de cruzado con el mapa de cobertura (Figura 16) utilizando la opción "cross map" del software ILWIS 3.21® (ITC, 2001), este cruce da como resultado una lista de unidades de cobertura asociadas a cada centro poblado, a partir de esta lista se calculó el subíndice de fragmentación para cada centro poblado al dividir 1 (un polígono equivalente a un centro poblado), entre el número de unidades de cobertura totales (uC) presentes en la lista, y luego para normalizar este valor entre cero y uno (0-1) y crear el coeficiente se le resta a 1 dicho valor, tal y como se muestra a continuación:

$$cF = 1 - \left(\frac{1}{uC} \right)$$

Los valores más altos del cF (cerca de 1) deben ser interpretados bioecológicamente como paisajes altamente fragmentados que propician la migración de las poblaciones silvestres de Triatomíneos, los valores más bajos

de este coeficiente deben ser interpretados como paisajes poco fragmentados en los cuales las poblaciones de Triatominos tienden a permanecer en los relictos de origen.

4.2.3 Promedio ponderado de la intervención humana o uso de la tierra (pI).

La actividad humana ha sido identificada como un factor de riesgo importante en la transmisión de la enfermedad de Chagas (Catalá, *et al.*, 2004; Vázquez-Prokopec, *et al.*, 2005 y Walter, *et al.*, 2005), para incorporar este parámetro al IER se propone promediar valores arbitrarios asignados a cada unidad de cobertura, proporcionando un mayor peso a las unidades de intervención, para ello se utilizó el cálculo de un promedio ponderado que ha sido llamado pI.

Para calcular el promedio ponderado de la intervención humana o uso de la tierra (pI), se utilizó la información obtenida del cruce de los mapas de centros poblados (CP_500m) y cobertura al igual que en el cálculo del "cF".

De la lista con las unidades de cobertura totales (uC) asociadas a cada centro poblado fueron separadas las unidades naturales (uN=3) y las unidades de intervención (uI=5). A cada una de estas unidades se les asignó un valor entre cero y uno de forma que la sumatoria de los valores diera más peso a las unidades de intervención (Total sumatoria uIi = 0.6) que a las unidades naturales (Total sumatoria uNi = 0.4), ya que lo que interesa en este caso es reflejar en el IER el efecto de la intervención y uso de la tierra en cada centro poblado.

La diferencia entre los valores asignados a cada uNi (tabla 8) tiene que ver con la fisonomía del tipo de cobertura, siendo más alto para las uNi más ralas (Matorral) que para las más densas (Bosque) y cero para la roca desnuda.

En el caso de las uI los valores más altos (tabla 8) fueron asignados a las coberturas con intervención agropecuaria, debido a que en el caso de la uIi "Cultivos altamente productivos" existe una remoción total de la

vegetación que tiene como resultado una dispersión omnidireccional tanto de los huéspedes como de los insectos. En el caso de la uli “áreas con intervención agropecuaria” a pesar de que la deforestación no es total, el flujo de materiales desde dichas zonas a las viviendas constituye un riesgo importante. De forma similar ocurre con las coberturas de “bosque secundario” y “vialidad”. La cobertura “centros poblados” al igual que “roca desnuda” en el caso de las uN no representa un aporte importante en cuanto al flujo de insectos, porque estos no se encuentran en dichas unidades (Vázquez-Prokopec *et al.*, 2004; 2005).

Tabla 8. Valores asignados a cada unidad de cobertura natural (uNi) y de intervención (uli), para el cálculo del promedio ponderado e la intervención humana o uso de la tierra (pI).

Cobertura Natural	Ponderación uNi	Cobertura de Intervención	Ponderación uli
Bosque	0.15	Áreas con Cultivos Altamente Productivos	0.25
Matorral	0.25	Áreas con Intervención Agropecuaria	0.15
Roca Desnuda	0	Bosque Secundario	0.10
TOTAL uN	0.4	Vialidad	0.10
		Centros Poblados	0
		TOTAL ul	0.6

Luego de la asignación de valores a cada uli y uNi se procedió al cálculo del pI promediando dichos valores para cada centro poblado de la siguiente manera:

$$pI = \frac{\sum uNi + uli}{uC}$$

Los valores mas bajos del pI (ceranos a cero) deben ser interpretados bioecológicamente como paisajes donde la influencia de la intervención humana sobre los procesos activo y pasivo de dispersión de los insectos es baja. Mientras que los valores altos de este promedio (ceranos a uno) reflejan que la intervención humana es intensa y propicia la migración de los insectos hacia las viviendas.

4.2.4 Subíndice de cobertura en el centro poblado (sP).

El subíndice de cobertura en el punto (sP) se desarrolló al igual que para los casos de cF y pl, a través del cruce del mapa de polígonos de 500m de radio de los centros poblados (CP_500m), con el mapa de coberturas. En este caso la información de la lista resultante de dicho cruce que fue utilizada fue el área correspondiente a cada unidad de cobertura, es decir se tomo como cobertura del centro poblado aquella cobertura que ocupara mayor superficie del polígono de 500m. Dependiendo del tipo de cobertura se asigno un valor entre cero y uno (0-1) teniendo en cuenta también la fisonomía de la cobertura, teniendo en cuenta que los insectos son atraídos por la luz (Curto de Casas *et al.*, 1994; Vázquez-Prokopec *et al.*, 2004; 2005). Los valores asignados se pueden observar en la tabla 9.

Tabla 9. Valores del subíndice cobertura en el punto (sP) asignado a cada tipo de cobertura.

Cobertura en el punto	Valor
Centros Poblados	0.1
Vialidad	0.1
Áreas con Cultivos Altamente Productivos	0.2
Bosque	0.4
Bosque Secundario	0.6
Áreas con Intervención Agropecuaria	0.8
Matorral	1.0

Los valores más bajos del sP, cercanos a cero, deben interpretarse como centros poblados cuyas coberturas mas abundantes impiden la visualización de las fuentes de luz por los Triatominos. Por otra parte los valores mas altos del sP, cercanos a uno, describen centros poblados cuyas coberturas más abundantes facilitan la visualización de las fuentes de luz por los Triatominos contribuyendo así a la dispersión de los insectos hacia dichos centros poblados.

4.2.5 Subíndice de dispersión de insectos (*sD*)

El subíndice de dispersión de insectos (Dispersión) fue creado con base en el modelo de dispersión desarrollado en el capítulo 3 del presente trabajo.

Utilizando las distancias de dispersión (Tablas 5) y los mapas de dispersión para cada tipo de cobertura. Se realizó el cruce del mapa de centros poblados con cada modelo de dispersión a través de la opción "cross map" del software ILWIS 3.21® (ITC, 2001), con lo cual se generan cinco tablas donde se pueden observar los centros poblados que están asociados a cada franja de dispersión. Como un centro poblado puede estar dentro de más de una franja de dispersión se toma el promedio de los valores asignados (tabla 10) para cada franja de dispersión para cada centro poblado, y es así que se obtiene el subíndice de dispersión de insectos (*sD*).

Tabla 10. Valores del subíndice de dispersión de insectos (*sD*) asignado a cada tipo de cobertura.

Tipo de cobertura	Franja de Dispersión	Valor
Áreas con Cultivos		
Altamente Productivos	2000m	0.2
Bosque	250m	0.4
Bosque Secundario	500m	0.6
Áreas con Intervención		
Agropecuaria	1000m	0.8
Matorral	600m	1

Debido a que la migración potencial de los insectos depende del tipo de vegetación en la que estos se encuentran originalmente así como del uso de la tierra y el bioclima. Los mayores valores del *sD* (cerca de uno) deben ser interpretados bioecológicamente como centros poblados que se encuentran ubicados dentro de las franjas de dispersión de ecosistemas o agroecosistemas a partir de los cuales la migración es más probable, mientras que los valores más bajos del subíndice (cerca de cero) deben interpretarse como centros poblados ubicados fuera de las franjas de dispersión de los ecosistemas que propician la migración de los insectos.

4.2.6 *Índice ecológico de riesgo potencial de transmisión vectorial de la enfermedad de Chagas.*

Una vez obtenidos: el subíndice de bioclima (sB), coeficiente de fragmentación del paisaje (cF), promedio ponderado de la intervención humana o uso de la tierra (pl), subíndice de cobertura en el centro poblado (sP) y subíndice de dispersión de insectos (sD) (en lo adelante denominados factores ecológico-climáticos [f_i]), se hizo necesario conocer si estas variables estaban aportando o no información redundante o si estaban o no correlacionadas y en caso de estarlo, que tipo de correlación había entre ellas. Para solventar esta duda se procedió entonces a calcular los coeficientes de correlación lineal (r), coeficiente de correlación R² y la covarianza (Cv) entre todos los factores (Tabla 11). Se puede observar que no hubo correlación para ninguno de los coeficientes, subíndices o promedios para ninguna de las variables (P<0.005), por lo tanto se tomo el promedio de todos los factores ecológico-climáticos para el cálculo del índice de riesgo ecológico para cada centro poblado.

Tabla 11. Valores del coeficiente de correlación lineal (r), coeficiente de correlación R² y covarianza entre los factores empleados para el calculo del IER.

	Fragmentación			Intervención			Bioclima			Dispersión		
	r	R ²	Cv	r	R ²	Cv	r	R ²	Cv	r	R ²	Cv
Intervención	0.03	0	0									
Bioclima	0.21	0.04	0.01	0.48	0.23	0.02						
Dispersión	0.21	0.04	0.01	0.07	0	0	0.09	0.01	0			
Cobertura	0.04	0	0	0.07	0.01	0	0.08	0.01	0	0.08	0.01	0

En forma general, el Índice ecológico de riesgo potencial de transmisión vectorial de la enfermedad de Chagas (IER) es básicamente un promedio de los valores de cada subíndice, se define como la sumatoria de

los factores ecológico-climáticos (f_i) entre el número total de factores ecológico-climáticos (F), tal y como se describe a continuación:

$$IER = \frac{\sum_{i=1}^F f_i}{F}$$

En el caso particular del presente trabajo $f_i = sB, cF, pI, sP, sD$; por lo tanto; $F = 5$. Con lo cual el IER para cada uno de los 117 centros poblados evaluados en los municipios Andrés Bello y Morán del estado Lara se calculó a través de la siguiente fórmula:

$$IER = \frac{sB + cF + pI + sP + sD}{5}$$

Debido a que la variación del índice (IER) es entre cero y uno (0-1), se proponen entonces de manera totalmente empírica, los siguientes intervalos (Tabla 12) para la categorización de los valores del índice en cuanto al riesgo que presenta para cada centro poblado la configuración particular de los factores ecológico-climáticos. Esta categorización potencial debe ser sometida a calibración, con lo cual es probable que dichos intervalos se modifiquen.

Tabla 12. Intervalos de clasificación de riesgo potencial de los valores del IER.

Intervalo de valores del IER	Categoría de riesgo ecológico potencial
0 - 0.30	Bajo
0.31 - 0.60	Moderado
0.61 - 0.80	Alto
0.81 - 1.00	Muy Alto

4.2.7 Caracterización de los centros poblados de acuerdo al riesgo ecológico potencial de transmisión vectorial de la enfermedad de Chagas.

Una vez calculado el IER para cada centro poblado se procedió a construir un mapa de atributos a partir del mapa de puntos de centros poblados, el atributo en este caso fue el valor del IER para cada CP.

Este mapa con los valores del IER fue luego rasterizado y a ese nuevo mapa raster del valor del IER para cada centro poblado se le aplicó la opción "slicing" del software ILWIS 3.21® (ITC, 2001), cuyo dominio son entonces los intervalos de la categorización de riesgo ecológico que se pueden apreciar en la tabla 11. El mapa de la distribución de los centros poblados según la clasificación de riesgo ecológico a partir del valor del IER se puede apreciar en la figura 27.

4.3 Resultados

El total de centros poblados evaluados con el IER fue de 117, de los cuales 93 se encuentran en el municipio Morán y 24 en el municipio Andrés Eloy Blanco del estado Lara.

4.3.1 Clasificación de riesgo potencial de transmisión vectorial de la enfermedad de Chagas de los centros poblados

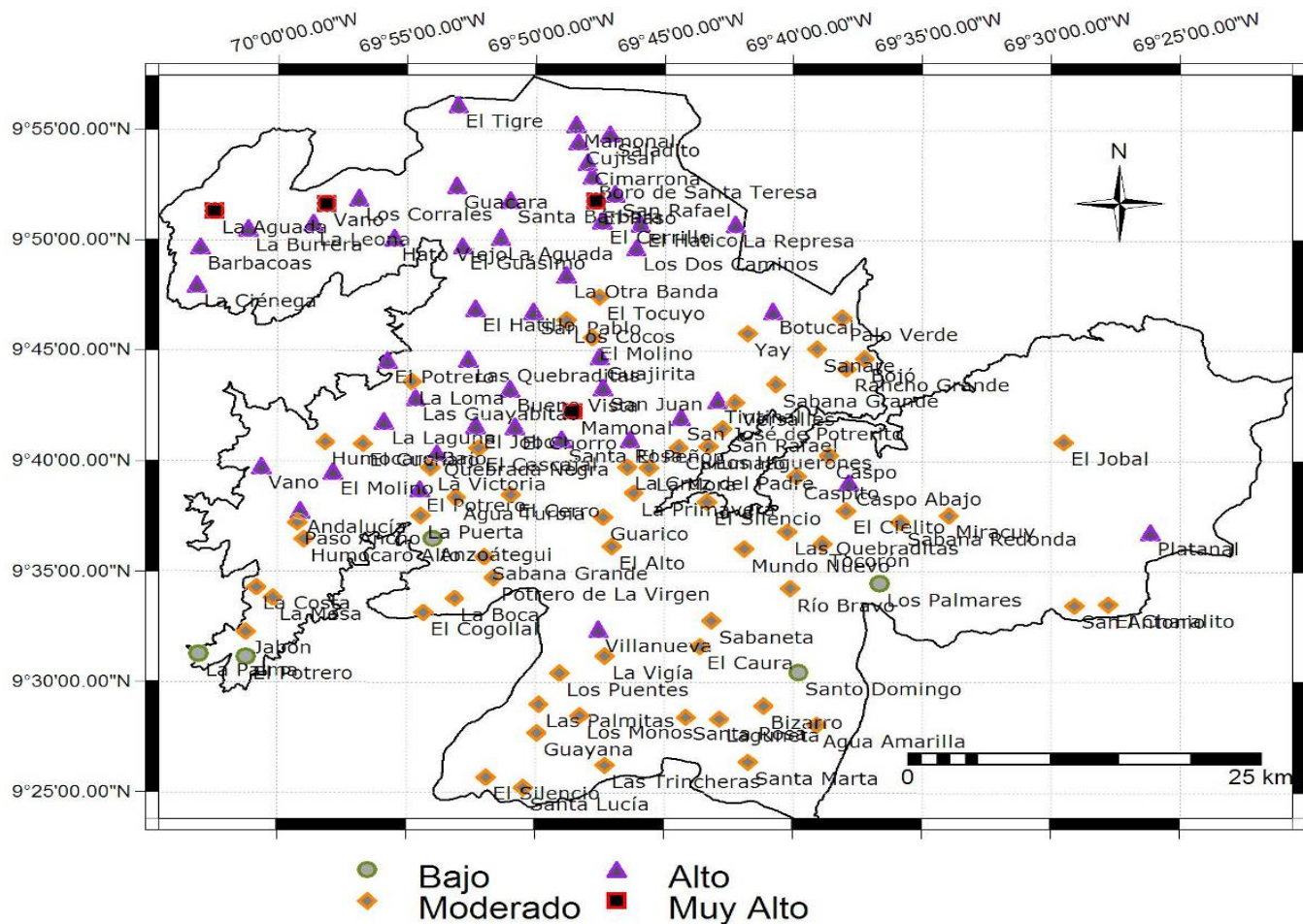


Figura 27. Distribución de los centros poblados clasificados de acuerdo a su valor particular del IER por las categorías de riesgo ecológico potencial.

En la figura 27 se observa la clasificación de riesgo potencial de transmisión vectorial de la enfermedad de Chagas para cada uno de los 117 centros poblados del área de estudio luego del cálculo del IER.

Los 24 centros poblados del municipio Andrés Eloy Blanco evaluados a través del IER, se encuentran únicamente en dos categorías de riesgo: Moderado y alto, siendo esta última categoría la más importante en proporción, ya que el 67% de dichos centros poblados se encuentran en esta categoría como se puede apreciar en la figura 28.

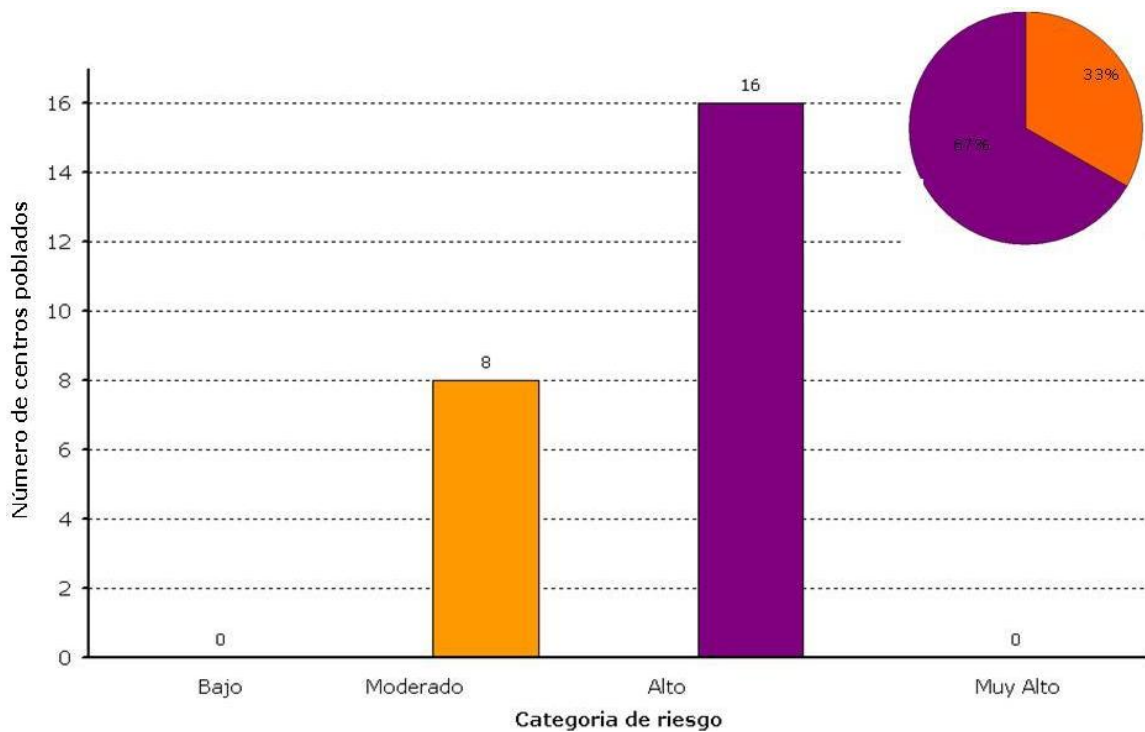


Figura 28. Número y porcentaje de centros poblados por categoría de riesgo del IER en el municipio Andrés Eloy Blanco.

En el municipio Morán fueron evaluados 93 centros poblados, los cuales se encuentran en todas las categorías de riesgo tras la aplicación del IER. Cincuenta (54%) de estos centros poblados se encuentran en la categoría de alto riesgo, veintiséis (28%) en la de riesgo moderado, trece (14%) en la categoría de muy alto riesgo y apenas cuatro (4%) en la categoría de bajo riesgo. Tal y como se puede apreciar en la figura 29.

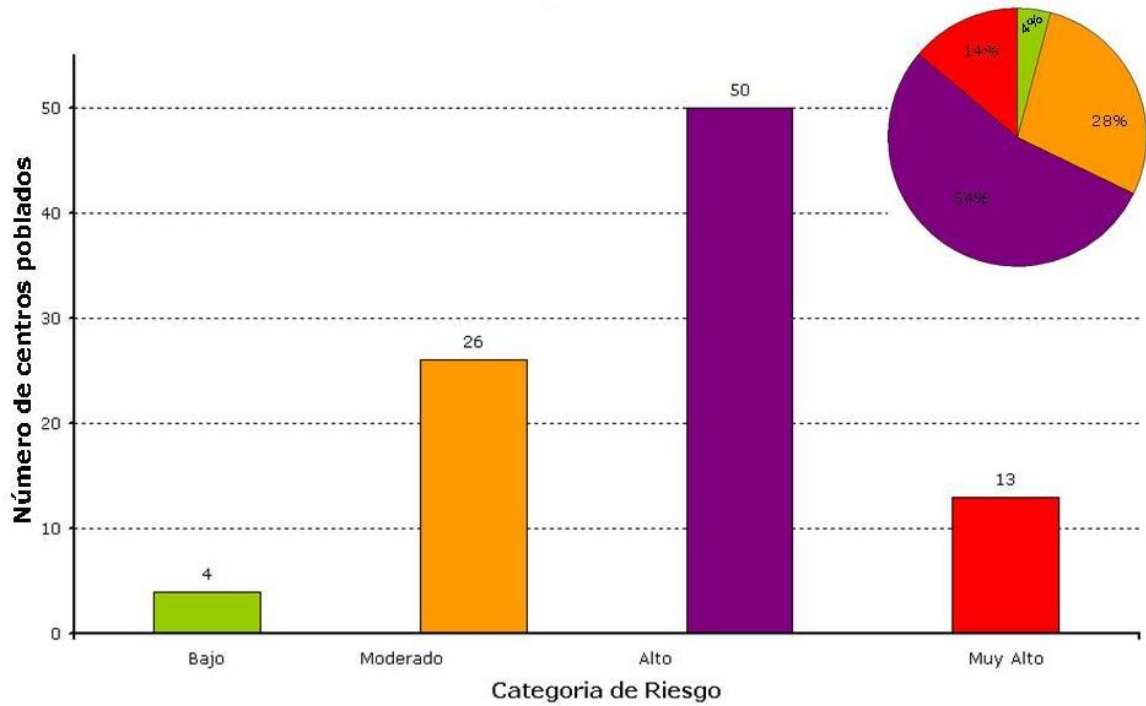


Figura 29. Número y porcentaje de centros poblados por categoría de riesgo del IER en el municipio Morán.

De los ciento diez y siete (100%) centros poblados evaluados a través del IER, cuatro (3.42%) están en la categoría de bajo riesgo, treinta y cuatro (29.1%) en la categoría de riesgo moderado, sesenta y seis (56.4%) en la categoría de alto riesgo y trece (11.08%) en la categoría de muy alto riesgo como puede ser apreciado en la figura 30.

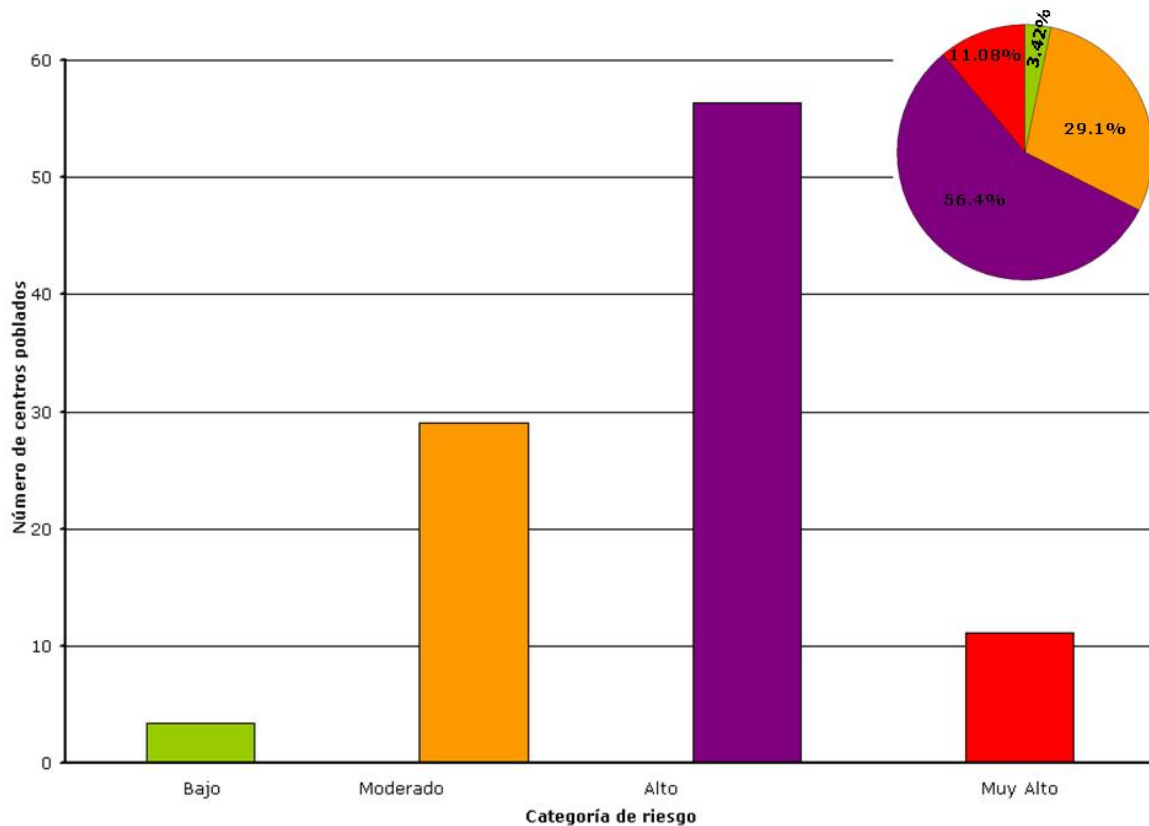


Figura 30. Número y porcentaje de centros poblados por categoría de riesgo del IER en toda el área de estudio.

4.4 Discusión

El Índice ecológico de riesgo potencial de transmisión vectorial de la enfermedad de Chagas (IER) presenta la ventaja de integrar información proveniente de fuentes muy diversas. Para su cálculo se utiliza la caracterización ecológica y climática, el análisis del paisaje y la revisión de la bibliografía, para tener como resultado una aproximación al riesgo de que los Triatomíneos se hallen en los centros poblados, representado por la configuración de una serie de variables que intervienen en la transmisión vectorial de la enfermedad de Chagas, como factor de riesgo para el contagio de sus moradores con *T. cruzi*.

Debido a la naturaleza del modelo y de su alcance, el índice tal y como ha sido planteado es de carácter meramente potencial, debido a que aun no ha sido calibrado o validado con datos epidemiológicos. Sin embargo, la validación del IER puede ser llevada a cabo para poder cuantificar el riesgo y con ello dar precisión al índice, para ello es necesario comparar la incidencia de la enfermedad de Chagas en los centros poblados cuyas categorías del IER sean alto y muy alto ($IER > 0.61$) con aquellos para los que el IER sea bajo ($IER < 0.31$).

Una vez lograda esta comparación se puede cuantificar el riesgo de una forma sencilla al dividir el número de centros poblados con una alta tasa de infección por *T. cruzi* con el total de centros poblados en riesgo de infección o expuestos, es decir, con todos aquellos centros poblados donde se hallan encontrado Triatomíneos infectados. Este último punto es sumamente importante ya que el índice ha sido creado única y exclusivamente para el estudio de la transmisión vectorial y no se debe perder de vista que esa es solo una de las formas de infección. Es por ello que la integración entre profesionales de diferentes disciplinas es de suma importancia, pues los médicos y epidemiólogos suelen recavar datos de forma rutinaria que pueden ser útiles para poder identificar los tipos de transmisión más comunes así como los focos de infección e integrar dicha información al índice.

La caracterización de los centros poblados a través del índice (IER) puede servir como punto de referencia tanto para investigaciones futuras como para las autoridades sanitarias que trabajan en el área, ya que a pesar de no estar calibrado aun, este planteamiento lleva consigo un respaldo conceptual, teórico y metodológico bastante desarrollado. Pudiendo ser una herramienta útil en la planificación del sector salud, específicamente en la planificación de acciones para el control de la enfermedad de Chagas en estos dos municipios.

Al comparar con otras aproximaciones a los factores de riesgo de la enfermedad de Chagas como las planteadas por Catalá (2004), Walter

(2005) y Vázquez-Prokopec (2005) y colaboradores, se puede notar que en ellas toman en cuenta la estructura de los hábitats selváticos a un nivel más detallado, es decir a una escala más grande.

En estos trabajos también integran la estructura del peridomicilio, los animales domésticos y la configuración espacial de estos alrededor de las viviendas, parámetros que no son tomados en cuenta en el IER. A través de estos trabajos se han determinado algunos factores de riesgo que incrementan la transmisión vectorial de *T. cruzi*, dentro de los que destacan: El tipo de ambiente domiciliario, los lugares donde han sido construidas las viviendas (siendo superior en viviendas construidas en ecotopos naturales bien conservados para unas especies y en viviendas ubicadas en lugares con vegetación alterada y con presiones antropogénicas fuertes para otras) y presencia de ganado y sus corrales alrededor de las viviendas (Walter *et al.* 2005).

Otros factores de riesgo descritos son: los patrones socioculturales, el nivel económico y la estructura familiar de cada domicilio (Catalá *et al.*, 2004). Además otros de los factores de riesgo mas importantes, en los cuales coinciden varios de estos trabajos son: la presencia de animales en sitios contiguos a los dormitorios de las viviendas, perros dentro de las viviendas y densidad de cabras alrededor de las mismas (Catalá *et al.*, 2004; Vázquez-Prokopec *et al.*, 2005). Por otra parte una recomendación muy importante para disminuir la densidad de insectos dentro de los dormitorios es el mantenimiento en orden y limpieza del domicilio (Catalá *et al.*, 2004).

Finalmente se debe mencionar que para hacer extrapolaciones del índice a otras regiones es necesario contar con la caracterización espacial de las mismas variables que fueron tomadas en cuenta para el presente trabajo, de forma tal que se puedan calcular todos los subíndices necesarios para calcular el IER para un centro poblado.

Es posible concluir entonces que la evaluación del riesgo potencial de transmisión vectorial de la enfermedad de Chagas está depende de la caracterización ecológica y climática del área de estudio y del modelo teórico del hábitat de los Triatominos. Para lo cual ha sido necesaria la integración

de metodologías de la ecología del paisaje, del enfoque de la epidemiología del paisaje y la ecología de enfermedades así como la revisión y el conocimiento del comportamiento, biología y ecología de la subfamilia Triatominae.

Capítulo V

Discusión, conclusiones generales y

Referencias bibliográficas

5.1 Discusión y conclusiones generales

El modelado de diversos fenómenos biológicos es hoy en día una tarea común entre los investigadores. Particularmente, el modelado de fenómenos relacionados con la interacción entre los organismos y entre estos con el medio circundante, ocupa gran parte del tiempo de los ecólogos.

Las aproximaciones son muy variadas y de acuerdo a las estrategias planteadas por Levins (1966), se pueden generar modelos realistas y precisos (carentes de generalidad); modelos muy generales y precisos (poco realistas) y modelos realistas y generales pero poco precisos. Los modelos planteados en el presente trabajo podrían estar enmarcados en el tercer grupo de modelos antes mencionados o dentro de la tercera estrategia de Levins, debido a que son muy generales, basados en información bibliográfica para diferentes especies de la subfamilia Triatominae, y carecen de precisión debido a la falta temporal de calibración con datos de campo. Es por esta razón que estos modelos deben ser definidos, en todo caso, como potenciales.

Es primordial reconocer la importancia de la percepción de la transmisión de la enfermedad de Chagas como un fenómeno ecológico, en el que se encuentran involucrados factores tan diversos como el clima, la vegetación, el uso de la tierra, la distribución de los centros poblados, los tipos de vivienda, la estructura etárea de la población humana, la distribución del hábitat y micro hábitat de los insectos vectores, la distribución de los hospedadores silvestres y sus propios hábitat, el nivel socioeconómico de las personas, entre muchos otros.

La mayoría de los factores involucrados en la dinámica de transmisión de una enfermedad tienen un componente espacial importante y es por ello que su abordaje a través del análisis espacial, la ecología del paisaje y la geoestadística resulta pertinente.

Recientemente han evolucionado disciplinas científicas que se encargan del estudio de las relaciones del componente espacial de los diferentes factores involucrados en la dinámica de transmisión de

enfermedades infecciosas, tales son los casos de la epidemiología del paisaje y la ecología de enfermedades infecciosas.

El presente trabajo representa entonces un aporte para el desarrollo metodológico de estas nuevas disciplinas científicas, en tal sentido el índice ecológico de riesgo potencial de transmisión vectorial de la enfermedad de Chagas surge entonces, como una aproximación al estudio de los nidos o focos de infección propuestos en la epidemiología del paisaje por Pavlovski (1966).

La caracterización ecológica del área de estudio junto a la revisión bibliográfica o modelo teórico, representan los principales insumos para la elaboración de los modelos de distribución de hábitat y del Índice ecológico de riesgo potencial de transmisión vectorial de la enfermedad de Chagas. Además dicha caracterización da cuenta de la utilidad de la aplicación del análisis espacial, los sistemas de información geográfica, la geoestadística y el análisis del paisaje, para la caracterización de variables biofísicas y antropogénicas con una resolución de 28.5m en el tamaño del píxel para cada uno de los mapas de distribución de las variables.

Para completar la caracterización ecológica de los municipios Andrés Eloy Blanco y Morán del estado Lara, hace falta incorporar otras variables que no fueron tomadas en cuenta en el presente estudio.

En el estado Lara, particularmente en los municipios Andrés Eloy Blanco y Morán, las condiciones socioeconómicas, culturales y climático ambientales están dadas para que la transmisión vectorial de la enfermedad de Chagas tenga lugar. Al tener en cuenta que en Venezuela la transmisión vectorial de *T. cruzi*, es la forma mas común de las formas de infección posibles y que además el monitoreo y control de los vectores ha sido la forma más efectiva en la lucha por la erradicación de esta dolencia en todo el continente americano. Se deben proponer proyectos que permitan llevar a cabo dichas acciones, para lo cual sería altamente recomendable utilizar aproximaciones similares a las propuestas en el presente trabajo en cuanto a metodologías y enfoque.

Los resultados de esta investigación son empíricos y los modelos generados son potenciales, sin embargo, tienen un gran valor como herramienta exploratoria para estudios posteriores, además esta propuesta puede ser convertida en una herramienta muy precisa para el estudio de la dinámica de transmisión de la enfermedad de Chagas a través de la inclusión de datos de presencia de Triatomíneos en el área de estudio para la calibración de los modelos de hábitat y de datos epidemiológicos de la enfermedad de Chagas (incidencia y prevalencia) para la corrección del IER.

Por tener un carácter potencial, la aproximación aquí propuesta requiere de verificación experimental en campo, fase que espera por ser completada a través de proyectos futuros en los que se desarrollen muestreos aleatorios estratificados de Triatomíneos en toda el área de estudio, los cuales tendrían como resultado bases de datos de presencia/ausencia y abundancia de insectos, con las cuales se pueden obtener los modelos de respuesta de los insectos a las variables ecológicas más importantes, al estudiar los tipos de relaciones y correlaciones existentes entre la distribución de los insectos, su abundancia y la distribución de las variables ecológicas y climáticas utilizadas.

Vale destacar que todo el material cartográfico producto de la caracterización ecológica y climática del área de estudio puede ser utilizado, junto con la base de datos de presencia de los insectos, para generar mapas de predicción de hábitat con cierto grado de precisión, utilizando herramientas de modelado de nicho ecológico tales como los algoritmos genéticos de predicción de reglas fijas (GARP), a través de la utilización de software libre como es el caso de desktopGARP®. Este paquete trae consigo bases de datos predeterminadas, desarrolladas para todo el mundo con tamaños de píxel de 1Km., cuya resolución a escala continental o subcontinental puede funcionar, pero no a escalas de trabajo más grandes (superficies más pequeñas).

La ventaja de utilizar la información aquí desarrollada sobre la utilización de bases de datos asociadas a los software libres y comerciales, es en todo caso, que la escala de trabajo estaría ajustada a un área de estudio

pequeña con un tamaño de píxel de 28.5m para todas las capas (precipitación, temperatura, bioclima, ecosistemas, etc.).

Al integrar las dos aproximaciones: modelos de respuesta de las especies de insectos a los factores ambientales y mapas de predicción de hábitat, se podría entonces desarrollar un modelo de predicción de hábitat preciso, que serviría como herramienta base en la toma de decisiones referentes al manejo y control de la enfermedad de Chagas en el área de estudio. Hecho que podría percibirse además como la integración de un modelo físico o de caja blanca como el propuesto en este trabajo con un modelo de caja negra como el utilizado en el modelado de nicho ecológico.

La incidencia que puede tener una enfermedad infecciosa sobre los seres humanos está relacionada con el estado en el que se encuentren los ecosistemas donde viven, a su vez el estado de estos ecosistemas depende de las decisiones que tomen los habitantes de dichas regiones, en cuanto a la explotación y el manejo. Creándose así una especie de paradoja tautológica que pudiera ser irresoluble, hasta el punto en el que el agotamiento de los recursos o la incidencia de los patógenos lleven a las poblaciones humanas a migraciones masivas o al borde de la extinción.

Aunado a tal realidad antropogénica se encuentra la variabilidad natural del clima, vegetación, hidrología y algunas otras características geográficas propias que influyen sobre todos los fenómenos ecológicos que se suscitan en un área determinada, es esta realidad dinámica la cual propicia la propuesta del índice ecológico de riesgo potencial de transmisión vectorial de la enfermedad de Chagas (IER), ya que a través del mismo se integran aspectos involucrados en el estado de conservación de los ecosistemas como el uso de la tierra, intervención y fragmentación del paisaje; con elementos ambientales naturales como lo son el clima, bioclima, ecosistemas, etc.

El desarrollo del IER como propuesta metodológica debe seguir orientado a la identificación e integración al mismo de factores influyentes en la dinámica de transmisión, todo esto aunado a estudios que permitan calibrar el índice a través del cálculo del riesgo neto.

En las investigaciones enmarcadas dentro de la epidemiología del paisaje y de la ecología de enfermedades, es muy común que los objetivos planteados giren en torno a la búsqueda de factores ambientales y culturales relacionados con la dinámica de transmisión de enfermedades, en el presente trabajo el análisis de los resultados indica que más que algún factor en particular, lo que puede revelar información importante respecto al riesgo de transmisión vectorial de la enfermedad de Chagas, es la combinación de factores tanto climático-ambientales como socio-económico-culturales, es decir como la configuración del componente espacial de algunas variables como el bioclima, la vegetación y el uso de la tierra alrededor y dentro de los asentamientos humanos van a implicar diferentes niveles de riesgo para la presencia de Triatomíneos y por ende de transmisión vectorial de *T. cruzi*.

Como reflexión final del presente trabajo, no se puede perder de vista que lo más importante de las aproximaciones a través de modelos es que estas, en el caso de investigaciones preliminares y con datos limitados, terminan generando más preguntas que respuestas.

Es común observar como el desarrollo de modelos es en algunos casos criticado duramente hasta su destrucción por especialistas, quienes arguyen para ello su imprecisión, la carencia de realismo, la falta en la consideración de parámetros de valor o la redundancia de otros dentro de los mismos, etc. Por lo cual no se debe perder de vista que estas herramientas surgen como hipótesis por confirmar con un carácter potencial por naturaleza. Para que estos modelos tomen forma y dejen de ser meras hipótesis debe irse integrando a ellos información, deben irse cargando datos de calibración para que su precisión y calidad aumente. Todo esto aunado a una disminución de las expectativas subjetivas acerca de la capacidad de respuesta de los mismos, y un aumento objetivo en el entendimiento de su potencial en la búsqueda de respuestas a las preguntas planteadas, a las hipótesis por confirmar y a la construcción y el desarrollo de los paradigmas de la teoría ecológica.

Finalmente algunas perspectivas y recomendaciones derivadas del presente trabajo:

- Calibración de los modelos de distribución de hábitat con datos derivados de muestreos aleatorios estratificados en el área de estudio.
- Probar otros modelos de hábitat con la información obtenida a través de la caracterización ecológica del área de estudio.
- Calibración del IER con datos epidemiológicos.
- Utilización del IER como una herramienta exploratoria para el estudio de la epidemiología de la enfermedad de Chagas en los municipios AEB y Morán del estado Lara.
- Identificación de zonas de riesgo para la enfermedad de Chagas en áreas no pobladas del área de estudio.
- Recopilación de información de la circulación del parásito en animales salvajes e integración de esta en modelos de procesos.
- Integración de la información derivada de los modelos de hábitat y el IER con modelos de procesos de la circulación de *T. cruzi* en el ámbito silvestre.

5.2 Referencias Bibliográficas

- Ahrens, C. D. 2001. Essentials of meteorology. An invitation to the atmosphere. 2nd ed. Wadsworth Publishing Company. United States of America.
- Aldana E., E. Lizano, O. Rodríguez, A. Valderrama. 2001. Alimentación y defecación en Triatominos del género *Rhodnius* (Hemiptera, Reduviidae) alimentados con sangre humana. *Revista de Biología Tropical*. 49(2):693-696.
- Almeida, C., M. Vinhaes, J. Almeida, A. Silveira, J. Costa. 2000. Monitoring the Domiciliary and Peridomiciliary Invasion process of *Triatoma rubrovaria* in the state of Rio Grande do Sul, Brazil. *Memorias del Instituto Oswaldo Cruz*. 95(6):761-768.
- Añez, N. G. Crisante, A. Rojas, N. Díaz, N. Añez-Rojas, H. Carrasco, H. Parada, M. Aguilera, G. Moreno, I. Galíndez-Girón, R. Sandoval, I. Sandoval, L. Vásquez, O. Nava-Rulo, F. Guerra, G. Uzcátegui, J.Y. Yépez, C. Rodríguez, R. Bonfante-Cabarcas. 2003. La cara oculta de la enfermedad de Chagas en Venezuela. *Boletín de Malariología y Salud Ambiental*. 43(2).
- Añez, N., G. Crisante, A. Rojas, N. Díaz, S. Díaz, E. Lizano, Y. Superlano, E. Aldana. 2005. Domiciliación de *Triatoma nigromaculata* de la región montana del sur de Mérida, Venezuela. *Boletín de Malariología y Salud Ambiental*. 45(1).
- Aronoff, S. 1993. Geographic information System: A management perspective. WDL Publications Canada.
- Badii, M. H., J. Landeros. 2006. Cuantificación de la fragmentación del paisaje y su relación con Sustentabilidad. *International Journal of Good Conscience*. 2(1): 26-38.
- Bakker, S. A., N. J. Van den Berg, and B. P. Speleers. 1994. Vegetation transitions of floating wetlands in a complex of turbaries between 1937 and 1989 as determined from aerial photographs with GIS. *Vegetation* 114:161-167.
- Bar, M.A., C. Wisnivesky-Colli. 2001. *Triatoma sordida* Stål 1859 (Hemiptera, Reduviidae: Triatominae) in Palms of Northeastern Argentina. *Mem Inst Oswaldo Cruz, Río de Janeiro*, Vol. 96(7): 895-899.

- Barrera, R., N. Delgado, M. Jiménez, I. Villalobos & I. Romero. 2000. Estratificación de una ciudad híper endémica en dengue hemorrágico. *Revista Panamericana de Salud Pública* 8(4): 225-233.
- Blackburn, G. A., E. J. Milton. 1996. Filling the gaps: remote sensing meets woodland ecology. *Global Ecology and Biogeography Letters* 5:175-191.
- Borror, D. J., D. M. De long, C. A. Triplehorn. 1992. *An Introduction to the Study of Insects*. (6th Edition). Saunders College Publishing, New York. P: 300-302.
- Brownstein, J. S., T. R. Holford, D. Fish. 2003. A Climate-Based Model Predicts the Spatial Distribution of the Lyme Disease Vector *Ixodes scapularis* in the United States. *Environmental Health Perspectives* 111(9): 1152-1157.
- Burgos, J.J., S.I. Curto de Casas, R.U. Carcavallo, I. Galíndez Girón. 1994. Global climate change influence in the distribution of some pathogenic complexes (malaria and Chagas disease) in Argentina. *Entomología y Vectores* 1: 69-78.
- Cadwell, L. L., J. L. Downs, C. M. Phelps, J. J. Nugent, L. Marsh, L. Fitzner. 1996. Sagebrush restoration in the shrub steppe of south central Washington in *Proceedings: Shrubland ecosystem dynamics in a changing environment*. Las Cruces, NM, 23-25 May 1995. Intermountain-Research-Station, USDA Forest Service. General Technical Report No. INT-GTR-338.
- Campbell, J.B. 2002. *Introduction to remote sensing* (3rd ed.). The Guilford Press.
- Carcavallo, R. U. 1999. Climatic Factors Related to Chagas Disease Transmission. *Memorias del Instituto Oswaldo Cruz* 94(I): 367-369.
- Carcavallo, R.U., S.I. Curto de Casas, I.A. Sherlock, I. Galíndez Girón, J. Jurberg, C. Galvão, C.A. Mena Segura, F. Noireau. 1998a. Geographical distribution and alti-latitudinal dispersion *In Atlas of Chagas Disease Vectors* (R.U. Carcavallo, I Galindez Girón, J. Jurberg & H. Lent - eds.). Vol. III: 747-792. Editora Fiocruz, Rio de Janeiro.
- Carcavallo, R.U., M.E. Franca Rodríguez, R. Salvatella, S.I. Curto de Casas, I.A. Sherlock, C. Galvão, D. da Silva Rocha, I. Galíndez Girón, M.A. Otero Arocha, A. Martinez, J. Aristeo Da Rosa, D.M. Canale, T.H. Farr, J.M.S Barata. 1998b. Habitats and Related Fauna *In Atlas of Chagas Disease Vectors* (R.U. Carcavallo, I Galindez Girón, J. Jurberg & H. Lent - eds.). Vol. II: 561-619. Editora Fiocruz, Rio de Janeiro.

- Carrasco H. J., A. Torrellas, C. García, M. Segovia, M. D. Feliciangeli. 2005. Risk of *Trypanosoma cruzi* I (Kinetoplastida: Trypanosomatidae) transmisión by *Panstrongylus geniculatus* (Hemiptera: Reduviidae) in Caracas Metropolitan District) and neighboring States, Venezuela). *International Journal for Parasitology* 35: 1379–1384.
- Catalá, S. S., L. B. Crocco, A. Muñoz, G. Morales, I. Paulone, E. Giraldez, C. Candiotti, C. Ripol. 2004. Aspectos entomológicos de la transmisión de la Enfermedad de Chagas en Argentina. *Revista de Salud Publica* 38 (2): 216-222.
- Cendero, A., E. Frances E., J.R. Diaz de Terán. 1992. Geoenvironmental Units as Bases for the Assessment, Regulation and Management of the Earth's Surface. *Lectures Notes in Earth Sciences*.
- Chacón-Moreno, E. 2004. Mapping savanna ecosystems of the Llanos del Orinoco using multitemporal NOAA satellite imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 5: 41–53.
- Chacón-Moreno, E. 2007. Ecological and spatial modelling: Mapping ecosystems, landscape changes, and plant species distribution in Llanos del Orinoco, Venezuela. PhD Thesis. International Institute for Geo Information Science and Earth Observation, and Wageningen University. Enschede, The Netherlands.
- Chacón-Moreno, E. Márquez, T.C., Rodríguez, M. y Ulloa, A. 2008. Mapa de Ecosistemas de Los Andes venezolanos. ICAE, Facultad de Ciencias, Universidad de Los Andes.
- Cherrill, A. J., C. McClean, P. Watson, K. Tucker, S. P. Rushton, R. Sanderson. 1995. Predicting the distributions of plant species at the regional scale: a hierarchical matrix model. *Landscape Ecology* 10: 197-207.
- Cohen, J. E., R. E. Gürtler. 2009. Modeling Household Transmission of American Trypanosomiasis. *Science* 297: 694-697.
- CONICIT, 1994. Censo de estaciones hidrometeorológicas en funcionamiento. Dirección de política y planificación del sector; Comisión nacional de meteorología e hidrología.
- Curto de Casas, S.I., R.U. Carcavallo, C.A. Mena Segura, I. Galíndez Girón, J.J. Burgos. 1994. Bioclimatic factors of Triatomine Distribution. *Useful Techniques for studies on climatic change. Entomol. Vect.* 1(2): 51-67.

- Damborsky, M. P., M. E. Bar, E. B. Oscherov. 2001. Detección de Triatominos (Hemiptera: Reduviidae) en ambientes domésticos y extradomésticos. Corrientes, Argentina. *Cad. Saúde Pública* 17(4): 843-849.
- Delgado, L., S. Ramos, N. Martínez, L. Gamboa. 2003. La Malaria en el Estado Sucre: Caso de Estudio Sobre la Relevancia de los Métodos Geoespaciales en Problemas de Salud Pública. *Acta Científica Estudiantil* 1:83-95.
- Delgado, L, S., K. Córdova, A.J. Rodríguez. 2004. Contribution of Geospatial Technology in Tropical Medicine and International Health Applications. *Informedica Journal* 3:2.
- Feliciangeli, M. D., H. Carrasco, J. S. Paterson, B. Suarez, C. Martinez, M. Medina. 2004. Mixed domestic infestation by *Rhodnius prolixus* stal, 1859, and *Panstrongylus geniculatus* latreille, 1811, vector incrimination, and seroprevalence for *Trypanosoma cruzi* among inhabitants in El Guamito, Lara state, Venezuela. *American Journal of Tropical Medicine and Hygiene* 71(4): 501–505.
- Forattini, O. P., E. Rabello, M. Castaño, y D. Pattoli. 1970. Aspectos ecológicos da tripanossomíase americana. I.- Observações sobre *Panstrongylus megistus* e suas relações com focos naturais de Infecção em área urbana na cidade de São Paulo. *Revista de Saúde Pública*. 4:19-30.
- Galuzo, I. G. 1975. Landscape Epidemiology (epizootiology). *Advances in Veterinary Science & Comparative Medicine* 19:73-96.
- Gause, G. F. 1934. *The Struggle for Existence*. Williams & Wilkins, Baltimore (reprinted 1964 by Hafner, New York).
- Githeko, A. K., S. W. Lindsay, U. E. Confalonieri y J. A. Patz. 2001. El cambio climático y las enfermedades transmitidas por vectores: un análisis regional. *Boletín de la Organización Mundial de la Salud*. Recopilación de artículos No 4.
- Gooding, R. F., D. Rackham, J. P. Holland, D. Robertson. 1997. Detailed surveying and mapping of plant communities on featureless terrain. *Grass and Forage Science* 52:439-444.
- Gómez Núñez, J.C., J. Fernández. 1963. La colonia de *Rhodnius prolixus* en el Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas. *Boletín Informativo de la Dirección de Malariología y Saneamiento Ambiental*. 3(3):132 –137.
- Gubler, D.J. 1998. Resurgent Vector-Borne Diseases as a Global Health Problem. *Emerging Infectious Diseases (Special Issue)* 4(3): 442-450.

- Guhl, F., Lazdins-Held, J. 2007. Grupo de trabajo científico sobre la enfermedad de Chagas, Geneva: Special Programme for Research and Training in Tropical Diseases.
- Guisan, A., N.E. Zimmermann. 2000. Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological Modelling*. 135: 147–186.
- Guzmán-Tapia, Y., M. J. Ramírez-Sierra, E. Dumonteil. 2007. Urban Infestation by *Triatoma dimidiata* in the City of Mérida, Yucatán, México. *Vector-Borne and Zoonotic Diseases* 7(4): 597-606.
- Hardin, G. 1960. The Competitive Exclusion Principle. *Science* 131, 1292-1297.
- Hengl, T. 2007. A practical guide to geostatistical mapping of environmental variables. European Commission, Joint Research Center, Institute for Environment and Sustainability. Luxemburg Office for official Publications of the European Communities.
- Hilty, S.L. 2003. *Birds of Venezuela*. Princeton University Press. New Jersey, USA.
- Hobbs, R. J. 1989. Remote Sensing of Spatial and Temporal Dynamics of Vegetation. In Hobbs, R.J. and Mooney, H.A. (eds). *Remote Sensing of Biosphere Functioning*. Ecological Studies 79. Springer-Verlag, Berlin.
- Houghton, J.T., L.G. Meira Filho, B.A. Callander, N. Harris, A. Kattemberg, K. Meskell. 1996. *Climate Change 1995: The science of climate change*. Cambridge University Press.
- Hutchinson, G. E. 1959. Homage to Santa Rosalia or why are there so many kinds of animals? *The American Naturalist* 93: 145-149.
- ILWIS 3.0 Academic. User's Guide 2001. International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC). Enschede, The Netherlands.
- Johnston, C. A. 1998. *Geographic information systems in ecology*. Methods in Ecology Series. Blackwell Science, Malden, MA. 239 pp.
- Kienast, F., B. Brzeziecki, O. Wildi. 1996. Long-term adaptation potencial of Central European mountain forests to climate change: a GIS-assisted sensitivity assessment. *Forest Ecology and Management* 80: 133-153.
- Kitron, U. 1998. Landscape Ecology and Epidemiology of Vector-Borne Diseases: Tools for Spatial Analysis. *Journal of Medical Entomology* 35: 435-445.
- Kroll, A.J., J.B. Haufler. 2006. Development and evaluation of habitat models at multiple spatial scales: A case study with the dusky flycatcher. *Forest Ecology and Management*. 229: 161-169.

- Last, J. M. 2001. A dictionary of epidemiology. Porta, M. (Ed.). Oxford University Press. 5th. edition (2008).
- Lent, H. y P. Wydgozinsky. 1979. Revision of Triatominae (Hemiptera: Reduviidae), and their significance as vectors of Chagas disease. Bulletin of the American Museum of Natural History. 163(3): 123-520.
- Levins, Richard. 1966. The strategy of model building in population ecology. American Scientist. 54: 421-431.
- Linés Escardí, Alberto. 1998. Contribución al concepto de clima. Territoris. 1:203-213.
- Longa, A. y J.V. Scorza. 2005. *Acrocomia aculeata* (Palmae), hábitat silvestre de *Rhodnius robustus* en el Estado Trujillo, Venezuela. Parasitol Latinoam 60: 17 – 24.
- López-Cárdenas, J., F. E. Gonzalez Bravo, P. M. Salazar Schettino, J. C. Gallaga Solorzano, H. Ramírez Barba, J. Martínez Mendez, V. Sánchez-Cordero, A. Townsend Peterson, J. M. Ramsey. 2005. Fine-Scale Predictions of Distributions of Chagas Disease Vectors in the State of Guanajuato, Mexico. Journal of Medical Entomology 42(6): 1068-1081.
- López Márquez, J., J. Sanchez., R. Andressen. 2001. Comparación de varios métodos para la representación cartográfica de información climática en zonas altas del estado Lara. Bioagro. 13(1): 39-46.
- MARN, Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales. 2005. Primera comunicación nacional en Cambio Climático de Venezuela. Proyecto MARN-PNUD VEN/00/G31. Caracas, Venezuela.
- McMichael, A.J., D.H. Campbell-Lendrum, C.F. Corvalan, K.L. Ebi, A. Githeko, J.D. Scheraga (Eds.). 2003. Climate change and human health - Risks and responses. Geneva: World Health Organization/World Meteorological Organization/United Nations Environment Programme.
- Medrano-Mercado, N., V. Ugarte-Fernandez, R. Butrón, S. Uber-Busek, H. L. Guerra, T. C. De Araújo-Jorge, R. Correa-Oliveira. 2008. Urban transmission of Chagas disease in Cochabamba, Bolivia. Mem. Inst. Oswaldo Cruz 103(5): 423-430.
- Meijerink, A. M. J., J. A. De Brouwer, C. M. Mannaerts, C. R. Valenzuela. 1994. Introduction to the use of geographic information systems for practical hydrology: IHP-IV M 2.3. Enschede, ITC, 1994. ITC Publication 23, 243p.

- Moncayo, Alvaro. 2003. Chaga's disease: current epidemiological trends after the interruption of vectorial and transfusional transmisión in the southern cone countries. *Mem Inst Oswaldo Cruz* 98: 577-91.
- Mokdad, A. H., J. S., Marks, D. F. Stroup, J. L. Gerberding. 2004. Actual causes of death in the United States. *Journal of American Medical Association* 291 (10): 1238-45.
- Mustalish, R. W., B. Evans, C. Tucker, K. Klein, L. E. Craker (ed.), L. Nolan (ed.), K. Shetty. 1996. Development of a phytohabitat index for medicinal plants in the Peruvian Amazon. *Acta Horticulturae* 426:123-131.
- Organización mundial de la salud (OMS), Iniciativa cono sur (Ed). 2003. Informe del taller: "Conceptualización de la vigilancia epidemiológica". Buenos Aires: OMS.
- Osborn, F.R., Y. Rubio-Palis, M. Herrera, A. Figuera, J.E. Moreno. 2004. Caracterización Ecoregional de los Vectores de Malaria en Venezuela. *Boletín de malariología y salud ambiental XLIV (2): 77-92.*
- Pavlovsky, E. N. 1966. *Natural Nidality of Transmissible Diseases, With Special Reference to the Landscape Epidemiology of Zooanthropose.* University of Illinois Press.
- Pax-Lenney, M., C. E. Woodcock, S. A. Macomber, S. Gopal, C. Song. 2001. Forest mapping with a generalized classifier and Landsat TM data. *Remote Sensing of Environment* 77 (2001) 241- 250.
- Ramírez, N., L.C. Silva, D. Kiriakos, A.J. Rodríguez Morales. 2004. Enfermedad de Chagas en Venezuela: Un Bosquejo de su Impacto sobre la Salud Pública. *Acta Científica Estudiantil* 2(4):148-156.
- Reyes-Lugo, M., B. Rodríguez-Acosta. 2000. Domiciliation of the selvatic Chagas disease vector *Panstrongylus geniculatus* Latreille, 1811 (Triatominae: Reduviidae) in Venezuela. *Trans. R. Soc. Trop. Med. Hyg.* 94:508-508.
- Richards, J.A., X. Jia. 2006. *Remote sensing digital image analysis: an introduction (4th Ed.).* Springer.
- Rodríguez, M. E. 2005. Cambio del paisaje en la cuenca del río Capaz. Trabajo Especial de Grado de Licenciatura en Biología. Universidad de Los Andes, Octubre 2005.

- Rodríguez-Bonfante, C., A. Amaro, M. García, L. E. Mejías Wohlert, P. Guillen, R. A. García, N. Álvarez, M. Díaz, E. Cárdenas, S. Castillo, R. Bonfante-Garrido, R. Bonfante-Cabarcas. 2007. Epidemiología de la enfermedad de Chagas en el municipio Andrés Eloy Blanco, Lara, Venezuela: infestación triatomínica y seroprevalencia en humanos. *Cad. Saúde Pública* 23(5): 1133-1140.
- Ruiz Diaz, R. L. 2005. Determinación, Evaluación y Caracterización de etapas sucesionales del sistema agroecológico de comunidades Piaroas de la Reserva Forestal Sipapo, Estado Amazonas usando sensores remotos. Trabajo Especial de Grado de Licenciatura en Biología. Universidad de Los Andes, Julio 2005.
- Sabins, Floyd. 1994. *Remote Sensing: Principles and Interpretation*. John Wiley and Sons. Toronto.
- Schofield, C.J. 1988. *Biosystematics of the Triatominae*. *Biosystematics of Haematophagous Insects* (ed. M. W. Service). Clarendon press. Oxford. UK.
- Schofield, C.J., y P. Dujardin. 1997. Chagas disease Vector Control in Central America. *Parasitology Today*. 13(4): 141-144.
- Schofield, C. J., L. Diotaiuti y J.P. Dujardin. 1999. The Process of Domestication in Triatominae. *Memorias del Instituto Oswaldo Cruz*. 94(1): 375-378.
- Scorza, J. V. 2004. ¿Antiguas Enzootias o Endemias Emergentes?. *Boletín de malarilogía y salud ambiental* Vol. XLIV (2).
- Service, M. W. 1996. *Medical Entomology*. Cambridge University Press. London. UK.
- Silver, William. 2000. Modelling as a discipline. *Int. J. General Systems*. 0(0):1-22.
- Soto Vivas, A., H. Barazarte, D. Molina de Fernández. 2001. Primer registro de *Eratyrus mucronatus* Stål, 1959 (Hemiptera: Reduviidae) en el ambiente domiciliario en Venezuela. *Entomotrópica*. 16(3): 215-217.
- Sperduto, M. B., R. G. Congalton. 1996. Predicting rare orchid (small whorled pogonia) habitat using GIS. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 62:1269-1279.
- Sutherst, R. 2004. Global change and human vulnerability to vector-borne diseases. *Clinical Microbiology Reviews* 17(1):136–173.

- Suárez Del Moral, P. M. 2009. Patrón de distribución de la línea de contacto bosque-páramo en los Andes venezolanos. Trabajo Especial de Grado de Licenciatura en Biología. Universidad de Los Andes, Septiembre 2005.
- Suárez Peña, D. C. Análisis comparativo de la diversidad del paisaje ecológico de selva nublada causado por el impacto humano. Trabajo Especial de Grado de Licenciatura en Biología. Universidad de Los Andes, Diciembre 2005.
- Travieso, L. E.; Bonfante-Garrido, R. 2004. Estudio seroepidemiológico de la enfermedad de Chagas en la localidad de Caballito, Municipio Simón Planas, Estado Lara. Venezuela. *Parasitología Latinoamericana*. 59: 46-50.
- Townsend Peterson, A., V. Sánchez-Cordero, C. B. Beard, J. M. Ramsey. 2002. Ecologic niche modeling and potential reservoirs for Chagas disease, Mexico. *Emerging Infectious Diseases* 8 (7): 662-667.
- Turner, M. G. 2005. Landscape ecology: what is the state of the science? *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics* 36:319-344.
- Ulloa Quintero, A. R. 2005. Distribución del hábitat del Chigüire (*Hydrochaeris hydrochaeris* Linne 1766) en sabanas inundables de la Estación Biológica El Frío, Venezuela. Trabajo Especial de Grado de Licenciatura en Biología. Universidad de Los Andes, Junio 2005.
- Urbina, J. 1999. Parasitological Cure For Chagas Disease: Is It Possible? Is It Relevant?. *Memorias del Instituto Oswaldo Cruz* 94(1): 349-355.
- Vásquez, A. M., F. E. Samudio, A. Saldaña, H. M. Paz, J. E. Calzada. 2004. Eco-epidemiological aspects of *Trypanosoma cruzi*, *Trypanosoma rangeli* and their vector (*Rhodnius pallescens*) in Panama. *Revista do Instituto de Medicina Tropical de São Paulo* 46(4):217-222.
- Vásquez, L. R., C. Galvão, N. A. Pinto, H. Granados. 2005. Primer registro de *Triatoma nigromaculata* (Stål, 1859) (Hemiptera: Reduviidae: Triatominae) para Colombia. *Biomédica*. 25: 417-21.
- Vázquez-Prokopec, G. M., Ceballos, L., Kitron, U. & Gürtler, R. E. 2004. Active dispersal of natural populations of *Triatoma infestans* (Hemiptera: Triatominae) in rural northwestern Argentina. *Journal of Medical Entomology* 41: 614-621.
- Vázquez-Prokopec, G. M., M. C. Cecere, D. M., Canale, R. E., Gürtler, U. Kitron. 2005. Spatiotemporal patterns of reinfestation by *Triatoma guasayana*

- (hemiptera: reduviidae) in a rural community of northwestern Argentina. *Journal of Medical Entomology* 42(4): 571-581.
- Vazquez-Prokopec, G. M., M. C. Cecere, U. Kitron, R. E. Gürtler. 2008. Environmental and demographic factors determining the spatial distribution of *triatoma guasayana* in peridomestic and semi-sylvatic habitats of rural northwestern Argentina. *Medical and Veterinary Entomology* 22: 273-282.
- Visschedijk, J. y S. Siméant. 1998. Targets for Health for All in the 21st Century. *World Health Statistics Quarterly*. 51: 56-57.
- Walter, A., I. Pojo do Rego, A. J. Ferreira, C. Rogier. 2005. Risk factors for reinvasion of human dwellings by sylvatic triatomines in northern Bahia State, Brazil. *Cuadernos de Salud Pública* 21: 974-978.
- White, M. A., D. J. Mladenoff. 1994. Old-growth forest landscape transitions from pre-European settlement to present. *Landscape Ecology* 9:191-205.
- WHO-World Health Organization. 2002. Control of Chagas disease. Second Report from the Committee of Experts. Series of Technical Reports 905. Switzerland, 117 pp.
- Zeledón, R. y J. E. Rabinovich. 1981. Chagas disease: an ecological appraisal with special emphasis on its insect vectors. *Annual Review of Entomology*. 26: 101-133.

5.2.1 Referencias WEB

- DRAE: Diccionario de la lengua española (22^{da} edición, 2001). Real Academia Española. [Documento en línea consultado el 5 de Julio del 2009] Disponible en Web: <http://buscon.rae.es/drae/>
- FUDECO (a): Fundación para el Desarrollo de la Región Centro Occidental de Venezuela. Dossier municipio Andrés Eloy Blanco estado Lara. 2004. [Documento en línea consultado el 3 de Junio de 2009]. Disponible en Web: <http://www.fudeco.gob.ve.estados.lara/municipios/andreseloy/htm>
- FUDECO (b): Fundación para el Desarrollo de la Región Centro Occidental de Venezuela. Dossier del estado Lara. 2004. [Documento en línea consultado el 3 de Junio de 2009]. Disponible en Web: <http://www.fudeco.gob.ve>

FUDECO (c): Fundación para el Desarrollo de la Región Centro Occidental de Venezuela. Dossier municipio Morán estado Lara. 2004. [Documento en línea consultado el 3 de Junio de 2009]. Disponible en Web:
<http://www.fudeco.gob.ve.estados.lara/municipios/moran/htm>

Glass, G. E. 2009. Ecological Principles of Disease Systems: Population Interactions and Dynamics. Bloomberg school of public health. Johns Hopkins University Press. Baltimore, USA. [Documento en línea consultado el 8 de Abril de 2009]. Disponible en Web:
<http://ocw.jhsph.edu/courses/PublicHealthBiology/PDFs/Lecture1.pdf>

GLCF: Global Land Cover Facility. Meryland University. [Documento en línea consultado el 16 de Abril del 2009] Disponible en Web:
<http://glcfapp.umiacs.umd.edu:8080/esdi/index.jsp>

MOBOT: Missouri Botanical Garden. Jardín Botánico de Missouri. [Documento en línea consultado el 16 de Abril del 2009] Disponible en Web:
<http://www.tropicos.org/>

NASA: National aeronautical and space administration. Administración Nacional de aeronautica y del espacio de los Estados Unidos de Norteamérica. [Documento en línea consultado el 5 de Julio del 2009] Disponible en Web:
<http://landsat.gsfc.nasa.gov/>

PAHO: Pan American Health Organization. Enfermedad de Chagas (Tripanosomiasis Americana). Washington D. C. [Documento en línea consultado el 12 de Septiembre del 2007]. Disponible en Web:
<http://www.paho.org/spanish/ad/dpc/cd/chagas.htm>

SEP: R. Frigg & S. Hartmann. "Models in Science". The Stanford Encyclopedia of Philosophy (Summer 2009 Edition). Edward N. Zalta (ed.). [Documento en línea consultado el 3 de Julio del 2009]. Disponible en Web:
<http://plato.stanford.edu/archives/sum2009/entries/models-science>

SRTM: Shuttle Radar Topography Mission. Anaglifo (vista estereoscópica) de Sur América. 2000. Ubicación: 15°N - 60°S y 30°W - 90°W. Orientación: Norte hacia arriba, proyección Mercator Resolución Original: 1 segundo de arco (30m) Fecha Adquirida: Febrero 2000. [Documento en línea consultado el 3 de Diciembre de 2006]. Disponible en Web:
http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/southAmerica_sp.htm#PIA03389

- WBCS: S. Rivas-Martinez & S. Rivas-Saenz. 1996-2009. Worldwide Bioclimatic Classification System. Phytosociological Research Center. Spain. [Documento en línea consultado el 5 de Septiembre del 2008]. Disponible en Web: <http://www.globalbioclimatics.org>
- WHO: World Health Organization. Chagas Disease. Washington D.C. [Documento en línea consultado el 12 de Septiembre del 2007]. Disponible en Web: http://www.who.int/topics/chagas_disease/es/