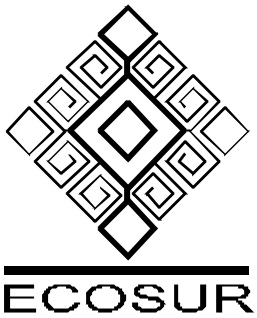

El Colegio de la Frontera Sur

La Estacionalidad de la Selva Baja Inundable: Su Análisis Mediante Percepción Remota

TESIS

Presentada como requisito parcial para optar al grado de
Maestría en Ciencias en Recursos Naturales y Desarrollo Rural

Por

Fernando Jesús Tun Dzul

2007

DEDICATORIAS

A mi esposa Bety, por el amor que me ofrece cada día y por todo el apoyo brindado para poder realizar mis estudios de maestría. Compañera de jornadas y quien siempre está para olvidar los ratos ingratos.

A mis hijos Iván y Raúl, quienes han sentido mi ausencia pero que siempre alegran el hogar, espero que les sirva en alguna ocasión como motivación.

A mis padres, Doña Juanita y don Darío, por enseñarme lo que ahora soy en la vida.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue dirigido por el Dr. Hans Vester, le agradezco todo el apoyo brindado, las charlas tan amenas, las sugerencias y por tener siempre una respuesta a mis interrogantes.

Agradezco el apoyo, las facilidades y la licencia otorgada por el Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C. (CICY) para realizar mis estudios de maestría.

Al Colegio de la Frontera Sur, y a la Coordinación de Posgrado, por la Beca de Colegiaturas y la ayuda del Programa de Apoyo para Tesis de Maestría (PATM).

Se agradece el apoyo del proyecto "Vulnerability and resilience in the coupled Human-environment system of the southern Yucatán: Linking remote sensing, field studies, and synthesis". Financiado por la NASA (NNH05ZDA001N-LCLUC) en colaboración con The George Perkins Marsh Institute–Clark University, University of Virginia and Rutgers University.

Mi gratitud a mis asesores, Dr. Rafael Durán García y C. a Dra. Birgit Schmook, por sus atinados comentarios y la displicencia a mi trabajo, su tiempo invertido es invaluable. A mis sinodales C. a Dra. Mirna Valdez Hernández y M.C. Holger Weissenberger, por su revisión, comentarios y sugerencias al escrito final.

A Paulino Simá Polanco por su gran colaboración en la identificación de mis ejemplares botánicos, así como a Rafael Durán y Filogonio May, que también prestaron su tiempo para ayudarme en la identificación.

A los Drs. Hector Hemández y Jorge Argáez, por ayudarme en el diseño del muestreo y en los análisis estadísticos, mi más sincera gratitud.

Al Dr. Roger Orellana por su insistencia, el apoyo y todas las facilidades otorgadas para poder realizar estos estudios. A mis compañeros del Laboratorio de SIG del CICY, José Antonio González, Celene Espadas, Jorge Argáez y Oscar Sosa.

A Maarten Debruyne y Richard Van SLuis, por su gran apoyo en el trabajo de campo, sin su ayuda la toma de datos hubiera sido más pesada. A los que prestaron su tiempo para acompañarme en algunas salidas, René Calderón, Miguel Xijum, Arianne Dor.

A mis compañeros de generación, por esos dos años de gran camaradería y buenas vibras, muy especialmente a Arianne Dor, René Calderón y Alejandro Villegas, por formar un cuarteto muy unido y siempre prestos para ayudarnos.

A mi hermana Yoly y mis sobrinos Ivonne y Roberto, por darme cobijo y hacer que no se sienta la ausencia de la familia.

A mis demás hermanos y sobrinos, quienes siempre estuvieron pendientes de mis avances.

La clasificación espectral de la vegetación usualmente está basada en la fisonomía de la misma y en su composición florística, pero la fenología es una fuente útil de información que raramente es utilizada debido a la dificultad para adquirir este tipo de información, aunque ésta pueda contribuir al conocimiento funcional de los ecosistemas (Hoare y Frost, 2004). Mediante el uso de imágenes de satélite periódicas se puede conocer el comportamiento espectral de la vegetación como respuesta a los cambios estacionales a una escala temporal y relacionar éstos con las condiciones ambientales presentes, lo que es conocido como el estudio de la fenología con base en la percepción remota (Hori, 1998).

Hoy día existe un énfasis creciente en desarrollar métodos de caracterización rápida de la estructura, diversidad y composición de los bosques utilizando técnicas de percepción remota (Sánchez-Azofeifa *et al*, 2003, Turner *et al*, 2003). Tres tipos de información sobre la vegetación se pueden obtener de las imágenes de satélite, en la región espectral ubicada entre 0.4 y 2.6 µm: los cambios en la pigmentación de las hojas se detectan en las bandas visibles (0.4 a 0.7 µm), diferencias estructurales en las hojas se observan en el infrarrojo cercano (0.8 a 1.0 µm) y el contenido de humedad en la vegetación es detectado en una longitud de onda entre 1.6 y 2.6 µm (infrarrojo medio) (Morain, 1974, en Hori, 1998).

Cuanto mayor sea el contraste entre las bandas, especialmente el rojo y el infrarrojo cercano, mayor será el vigor de la vegetación. Una manera de conocer este comportamiento espectral es a través de los índices de vegetación, los cuales se calculan a partir de los valores de reflectividad en estas dos bandas (Gilabert *et al*, 1997).

Mediante el uso de estos índices se pretende extraer la información relacionada con la vegetación, minimizando la influencia de perturbaciones debidas al suelo y condiciones atmosféricas. Entre los diferentes índices de vegetación desarrollados se encuentra el Índice de Vegetación de la Diferencia Normalizada (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI, Rouse *et al*, 1974, en Gilabert, *et al*, 1997) el cual tiene un gran potencial para reflejar variaciones en estructura, composición y diversidad de los bosques (Turner *et al*, 2003, Feeley *et al*, 2005).

ANTECEDENTES.

La primera descripción de la Selva baja inundable corresponde a Lundell (1934), el cual menciona a una "Vegetación de bajos" en el Petén de Guatemala denominada tintales, asociada con Manilkara zapota, Bucida buceras, Coccoloba cozumelensis, Miranda (1958) la denomina también con el nombre de "tintal" que se desarrolla en "bajos" u hondonadas de suelo profundo e inundable y la describe como selva baja subdecidua caracterizada por el dominio del palo de tinte (Haematoxylum campechianum), chechem negro (Metopium brownei), chechem blanco (Cameraria latifolia) y pucté (Bucida buceras).

Miranda y Hernández (1963) la denominan selva baja subperennifolia (pasando a veces a subcaducifolia) por lo regular en relación también con sabanas, que se desarrolla sobre suelos profundos con drenaje deficiente. Rzedowski (1978) clasifica la selva baja inundable ("bajos") de la península dentro de los Bosque espinosos, esto por la gran proporción de árboles espinosos que la conforman.

Con el nombre de Selva baja inundable la han descrito Orozco y Lot, 1976; Rico-Gray, 1982; Lot, 1983; Olmsted y Durán,1986. Estos últimos reconocen varios tipos de Selva baja inundable en Sian Ka'an: comunidades dominadas por Bucida spinosa (que llaman coloquialmente "bucidal"), comunidades dominadas por el "muk" o Dalberghia glabra ("Mucal"), comunidades dominadas por palo de tinte o Haematoxylumcampechianum (Tintal) y comunidades dominadas por pucté o Bucida buceras (Pucteal).

Palacio et al. (2002) describen a los "bajos inundables" desde una visión de paisaje, para caracterizar este ambiente cárstico único en Yucatán. Mencionan que este tipo de ecosistema existe funcionalmente por el estrecho vínculo entre las geoformas emisoras (lomeríos adyacentes, planicies onduladas y torrenteras) y receptoras (planicies de acumulación inundables), por lo que no se restringen a planicies acumulativas con suelos periódicamente inundados y vegetación hidrófita, sino también se vinculan a las geoformas y ecosistemas adyacentes.

Díaz-Gallegos et al. (2002) realizaron un estudio en el ejido La Guadalupe en la zona núcleo de la Reserva de la Biosfera de Calakmul donde analizaron la distribución espacial, transformación, estructura y composición de árboles de la selva baja subperennifolia a través de fotointerpretación de fotografías aéreas de 1970 y 1995 y mediante el uso de un SIG.

Mencionan que estas selvas son poco alteradas debido principalmente a las restricciones ambientales, a las limitantes edáficas (alto contenido de arcilla) y a las condiciones hídricas (inundación), impidiendo su utilización para cultivos tradicionales de la región.

Cortés e Islebe (2005), reportan un estudio donde intentan definir cuales son las diferencias en las características fisicoquímicas del suelo entre zonas altas y bajas del relieve y su papel en la distribución de las especies que conforman las comunidades presentes en la Reserva de la Biosfera de Sian Ka'an. Señalan que la distribución de las especies está determinada por el gradiente micro topográfico y la textura del suelo. Las condiciones micro topográficas y edáficas están altamente relacionadas con la distribución de las especies vegetales y con las características de la estructura de las comunidades tropicales.

JUSTIFICACIÓN.

La Selva baja inundable es una comunidad compleja, con composición de especies diferentes de acuerdo a las condiciones ambientales en las que se encuentran, pero tiene características particulares que las hace identificables. Tiene una gran importancia ecológica por su diversidad de especies y hábitat único en las zonas tropicales. Corresponde a un tipo de humedal que tiene un papel fundamental como refugio de flora y fauna, sobre todo en épocas de déficit hídrico. Sin embargo, su identificación en imágenes de satélite ha resultado en superficies muy distintas entre un año y otro, porque aparentemente en ciertas situaciones la reflectancia de la SBI se parece a la vegetación circundante y viceversa.

Entre los factores que pueden estar influyendo en la reflectancia de esta selva, y el cambio en superficie interpretada, se encuentran la fenología (pérdida de hojas) de las especies, el nivel de inundación, la composición y la estructura de la vegetación. Con los resultados del presente proyecto sobre el comportamiento estacional de este tipo de selva y de las especies vegetales que la componen, esperamos que la identificación sea más precisa.

Se realizó el presente trabajo con el propósito de obtener respuestas espectrales de la Selva baja inundable en un gradiente de humedad con respecto a la vegetación circundante, analizándolo a lo largo de un transecto, desde la vegetación circundante hacia el interior de la SBI a través del tiempo, de tal manera que podamos conocer la influencia de la composición, el comportamiento fenológico, la estructura así como la inundación sobre la respuesta

espectral. Los resultados obtenidos en este proyecto servirán de herramienta para mejorar la interpretación de las imágenes y así hacer una evaluación más cercana a la realidad del estado de conservación de la Selva baja inundable en el sur de la península, así como de su extensión.

OBJETIVO GENERAL

Evaluar los cambios fenológicos de la vegetación de Selva baja inundable, de acuerdo a la variabilidad de las respuestas espectrales de imágenes de satélite, con el propósito de describir su estacionalidad y la respuesta del vigor de la vegetación en un periodo de tiempo. Conocer la composición de especies, el comportamiento de la inundación y que relación tiene con la estructura, composición y reflectancia.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Realizar la clasificación de las clases de cobertura del suelo presentes en tres áreas de SBI de la Región de Calakmul, Campeche, mediante el uso de la imagen Landsat ETM del 2003.

- Evaluar las diferencias de la respuesta espectral del vigor de la vegetación en el gradiente selva baja inundable–selva mediana, a través de un periodo de 15 años.

- Describir la vegetación de Selva baja inundable evaluando su riqueza de especies, el valor de importancia ecológica de las mismas ysu estructura y diversidad, con el fin de establecer una relación entre estos parámetros y el vigor que muestra a través de las distintas épocas del año.

- Definir si los niveles de inundación al interior de la Selva baja inundable tienen influencia en la estructura y composición vegetal y en la reflectancia de las imágenes.

HIPÓTESIS:

1.- La zona intermedia entre lo que se distingue claramente como Selva baja inundable en imágenes de satélite y claramente como selva mediana, en todas las épocas, corresponde a una zona que estructuralmente es selva baja inundable, pero por su fenología o grado de inundación se parece a selva mediana en algunas épocas.

2.- Las diferencias en la reflectancia observada en imágenes de satélite se deben al comportamiento fenológico dado por las condiciones climáticas, más que a las diferencias en la composición de la comunidad, de tal manera que existe una relación directa entre el estado fenológico de la Selva baja inundable y la respuesta espectral obtenida mediante imágenes de satélite a lo largo del tiempo y en diferentes épocas del año, aún en selvas de composición diferente.

3.- La riqueza específica y diversidad de la Selva baja inundable es menor que el de las selvas circundantes, en el borde se espera que sea menor que la registrada al interior de la SBI. La similitud entre comunidades de SBI de diferentes ambientes es grande pero entre éstas y la selva circundante la similitud es mínima o ausente, es decir, las diferencias entre SBI y selva circundante son grandes.

4.- La Selva baja inundable presenta variación en el tipo de especies dominantes (Olmsted y Durán, 1986; Martínez y Galindo, 2002). Esta variación tiene una relación directa con el nivel de inundación relativa, definido por la pendiente del suelo.

ÁREA DE ESTUDIO

Localización geográfica: El presente trabajo se realizó en el sur de la Península de Yucatán, en el área comprendida dentro del proyecto Región Sur de la Península de Yucatán (Land-Cover and Land-Use Change (LCLUC) in The Southern Yucatan Peninsular Region –SYPR, por sus siglas en inglés). La SYPR es una unidad de estudio definida al norte y al sur por los límites de la Reserva de la Biosfera de Calakmul y al este y oeste por el contorno o la cota de altitud de 100 msnm (Fig. 1) (Klepeis y Turner II, 2001).

Esta demarcación coincide con la última extensión continua de bosque tropical estacional ubicada principalmente en esta porción de México. La región ocupa la altiplanicie cárstica que forma la espina dorsal de la península, formada por grandes depresiones u hondonadas características que se inundan temporalmente. La precipitación anual está en el rango de 900 mm en el norte-noroeste a 1400 mm en el sur (Lawrence et al., 2004). Comprende parte del municipio de Othón P. Blanco, Q. Roo y el municipio de Calakmul, Campeche, se encuentra entre la latitud 17^0 50' y 19^0 10' N y longitud 88^0 50' y 90^0 15' W (Fig. 1).

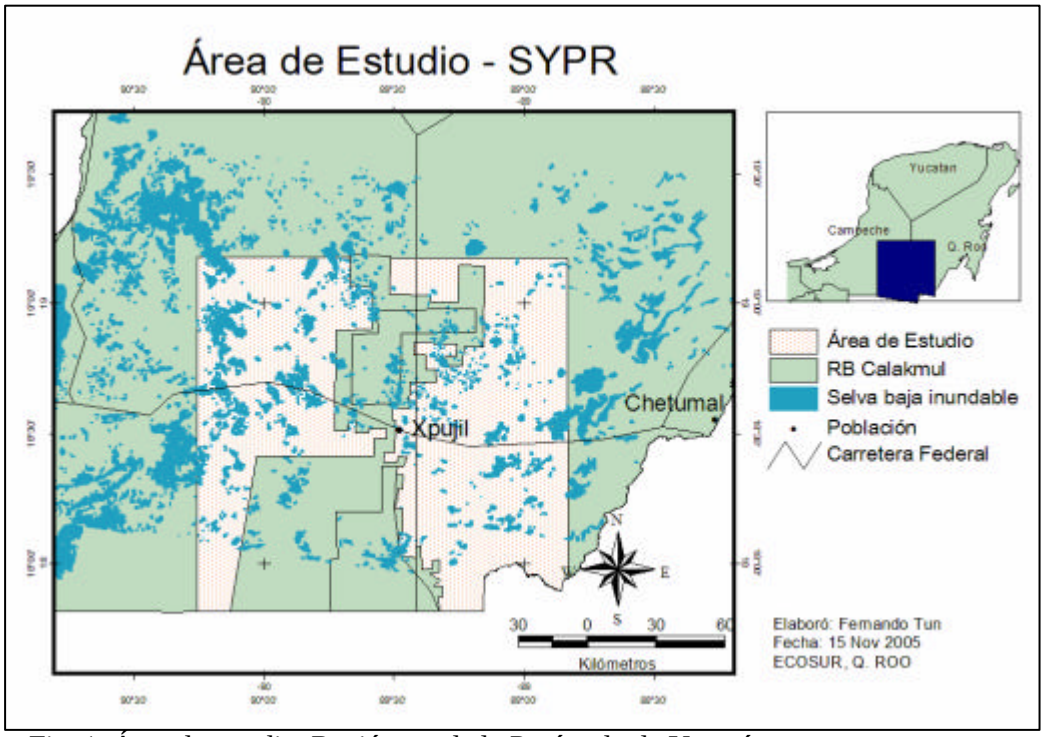

Fig. 1. Área de estudio. Región sur de la Península de Yucatán.

Distribución de las SBI: La Selva baja inundable se localiza en los ak´alches que se distribuyen tanto en el centro como al sur de Campeche, así como en el norte del Péten en Guatemala y parte del sur de Quintana Roo. En todos estos ambientes la SBI se presenta con diferentes composiciones florísticas, suelos y periodos de inundación. Se ha reportado su localización también en áreas de los Petenes de Campeche, Reserva de la Biosfera de Sian ka'an y en el norte de la Península (Ría Lagartos y Yum Balam) (Rico-Gray, 1982; Olmsted y Durán, 1986; Durán, 1987; Trejo-Torres, 1993; Tun-Dzul, 1996).

Geomorfología: La geomorfología y fisiografía es variada, abarca áreas de planicie con lomeríos, del orden de 200-300 m de altitud diferenciadas por lomeríos de laderas menos pronunciadas, y planicies altas con lomeríos suaves, de mayor altitud, con lomeríos aislados sobre las mismas (Lugo y García, 1999). Se caracteriza por las cañadas altas, cañadas planas, zonas bajas inundables y mesetas niveladas. La altitud varía de 250 a 340 msnm con pendientes <10% (Díaz-Gallegos, 2000).

Los lomeríos en la región del sur de la península representan la parte de la Península de Yucatán con mayor altitud promedio. Aunque no forman parte de las zonas bajas inundables si constituyen el mismo sistema hidrológico y de flujos superficiales de materia y energía (Palacio *et al*., 2002). Estos lomeríos presentan cimas epicársticas redondeadas y pequeñas cúpulas, características de ambientes cársticos tropicales.

La geología superficial de la zona está constituida por cuerpos de caliza, dolomita y evaporitas, dispuestos horizontalmente, indicando sedimentación calcárea marina del Cretácico al Cenozoico sobre un banco o plataforma continental constituido de calizas mesocretácicas y cretácico tardías, que revela la emergencia gradual de la plataforma con dirección Sur-Norte durante el Cenozoico (Ferrusquía-Villafranca, 1993).

Los ambientes geomorfológicos de estas zonas bajas son planicies semicóncavas u hondonadas amplias limitadas por elevaciones calcáreas. Se identifican sobre un relieve negativo de fondo plano con extensos depósitos deluviales y eluviales, bajo los cuales pueden haber cavidades con circulación vertical y horizontal o en donde se dispone el nivel base de un horizonte impermeable (Palacio *et al*, 2002).

Climatología: El clima es Ax'(w_1) (i_1)gw'', que pertenece al grupo de climas cálido subhúmedo, con temperatura media del mes más frío mayor de 18^0 C, con un régimen de

lluvias de verano- intermedio y un alto porcentaje de lluvia invernal y presencia de sequía intraestival o de medio verano, con poca oscilación térmica y marcha de la temperatura tipo Ganges (máximo antes del solsticio de verano) (Orellana et al., 1999).

La temperatura promedio mensual es superior a los 21^0 C y las oscilaciones térmicas anuales no son mayores a los 6^0 C. Las temperaturas más altas se presentan entre mayo y junio, las menores entre noviembre y febrero. La ausencia de heladas les da un alto potencial agroclimático a la Selva baja inundable (Palacio et al., 2002). La precipitación anual varía entre los 1000 y 1200 mm, concentrándose entre mayo y octubre.

El comportamiento de la precipitación en la zona de estudio, tomando como base las estaciones meteorológicas de Nicolás Bravo, Q. Roo y Zoh Laguna y Silvituc, Camp., para los últimos 20 años se muestra en la figura 2. La precipitación anual tiene un comportamiento similar en las tres estaciones. Los años más húmedos son variables en las tres estaciones, pero podemos puntualizar que estos fueron entre 1984-85, 1988, 1993-95, y 2001.

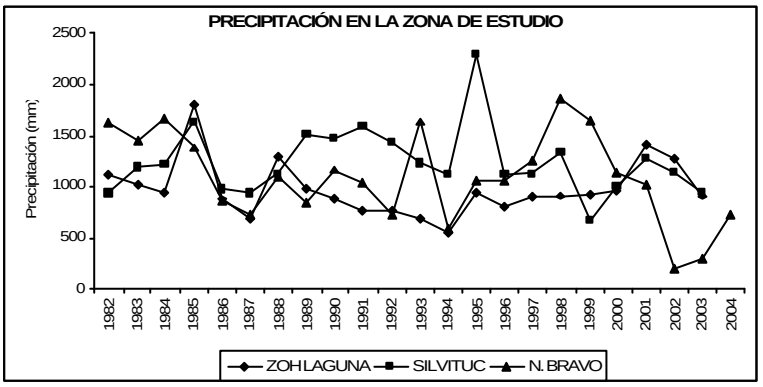

Fig. 2. Gráfica de precipitación de las tres estaciones climatológicas del área de estudio. Se presenta la precipitación total anual para el periodo de 1982 a 2003.

Edafología: Los suelos correspondientes a la Selva baja inundable están compuestos por residuales de las fracciones insolubles de las rocas carbonatadas. Muestran en general un drenaje deficiente por lo que la formación de suelo depende de la presencia relativa de agua (Palacio et al., 2002).

El suelo en este tipo de vegetación corresponde al tipo gleysol (INEGI, 1984), se caracteriza por ser un suelo que presenta un alto contenido de arcilla (58%) por lo que existen problemas en el drenaje interno y superficial, llegando a anegarse hasta 50 cm. ó más sobre la superficie en la época de lluvia.

El terreno presenta una topografía plana, con un microrelieve tipo gilgai, formado por pequeños montículos causados por el repetido secar y humedecer de las arcillas; se forma porque durante la sequía extrema la arcilla se agrieta y contrae y durante las lluvias el agua vierte el suelo de los bordes hacia las grietas y se forman los montículos, conocidos en maya como "kulenkul" (Macario et al., 1998)

Hidrología: La morfología cárstica de la planicie peninsular le confiere a la zona de estudio un desarrollo hidrológico subterráneo. En la superficie dominan formas de disolución del mismo origen formado por mesetas, planicies y valles (García-Gil et al, 2001).

La inundabilidad está asociada al balance entre el escurrimiento, la infiltración y las precipitaciones. La Selva baja inundable condiciona su dinámica ecológica a los cuerpos de agua permanentes, caracterizados por ser áreas de inundación marginal semipermanente anual y semipermanente extraordinario, lo que determina la disponibilidad de agua para procesos pedogenéticos y para la dispersión de especies vegetales (Palacio et al, 2002).

MATERIALES Y MÉTODOS

Identificación de sitios: Utilizando interpretaciones de imágenes anteriores (Tun-Dzul et al., 2000, Turner II et al., 2004; Lawrence et al., 2004) se seleccionaron tres comunidades de Selva baja inundable en la región, correspondiente a tres ambientes contrastantes en cuanto al tipo de vegetación y al régimen de precipitación: Ambiente Húmedo, en Dos Lagunas, al sur de la región e inmerso en una mezcla de Selva mediana subperennifolia y alta perennifolia; Ambiente Subhúmedo en Nuevo Becal, en el centro y con Selva mediana subperennifolia a su alrededor, y Ambiente Seco en Nadz Ka'an, al oeste y rodeado de Selva mediana subcaducifolia. Una vez identificados estos sitios en la imagen Landsat ETM 2003 (west path20/row 47), se procedió a ubicarlos en el campo y establecer las parcelas de estudio, sobre un gradiente de tierra alta hasta el centro de la comunidad de SBI (Fig. 3).

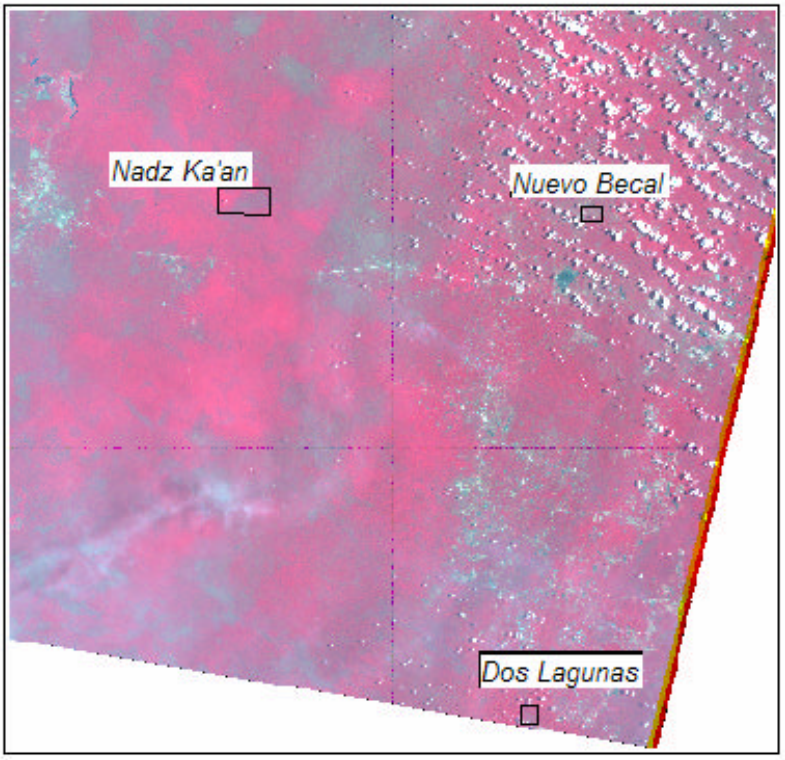

Fig. 3. Ubicación en el área de estudio de los tres ambientes estudiados.

Parcelas de muestreo: Para el muestreo en campo se definió un transecto sobre el gradiente de tierra alta al centro de cada una de las comunidades de SBI seleccionadas, de manera que se registrara las diferencias en composición de especies a lo largo de la pendiente, para conocer los posibles cambios en la vegetación y para poder definir cual es la vegetación

característica de la selva baja inundable. En cada transecto se establecieron cuatro parcelas de muestreo de 500m^2 cada una, tres correspondientes al gradiente dentro de lo que se reconoció en campo como SBI y una de la selva con la que limita (Fig. 4).

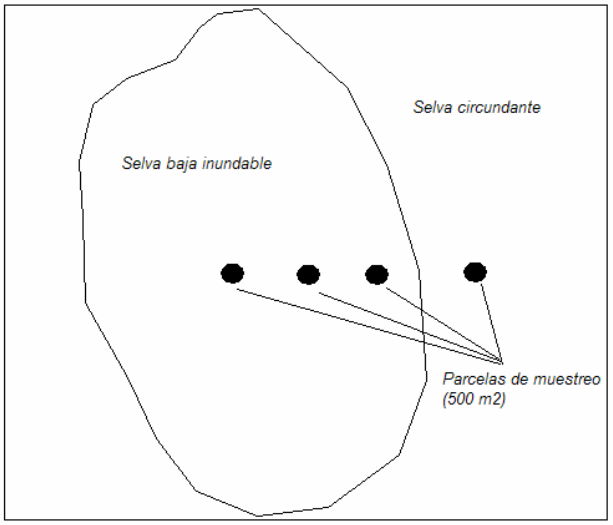

Fig. 4. Esquema del diseño de muestreo. Se esquematiza la representación de la superficie de SBI y el transecto trazado del centro hacia la selva circundante (Centro, Intermedio, Borde y Selva).

Se les denominó de la siguiente manera, tomando como base la pendiente de la SBI. La primera parcela, llamada "Borde", se eligió en la zona externa del área de SBI, tomando una distancia de 30 a 50 m dentro de la misma, desde el punto donde se consideró que comienza la Selva baja inundable, basándose en las condiciones presentes en el sitio y en donde se observaron especies propias de esta selva, árboles con troncos retorcidos y espinosos y que no sobrepasan los 10 m de altura; suelo tipo ak´alches, es decir, suelo oscuro, arcilloso, grumoso y que se encontraba reseco formando grietas, típico de época de secas de este tipo de suelo.

La parcela denominada "Centro", se ubicó trazando un transecto hacia el centro de la SBI, suponiendo que existían las condiciones más propias de la SBI, hasta donde las condiciones del sitio nos permitieron avanzar; la distancia desde el borde dependió del tamaño del parche de SBI, pero en general, no fue más de mil metros hacia dentro del mismo. La parcela "Intermedia" se ubicó entre las parcelas de Borde y Centro, seleccionando un sitio con diferencias en la estructura de las especies, alturas, distribución de los árboles, apertura de dosel, etc., condiciones que presentaban diferencias con respecto a la parcela Centro y que se podría considerar como una zona intermedia. Por último, la parcela denominada "Selva", que

se ubicó a una distancia no mayor de 500 m de la parcela Borde y que correspondió al tipo de selva circundante. Cada parcela se subdividió en ocho subparcelas o unidades de muestreo.

El esquema de muestreo correspondió a un diseño de dos vías anidado fijo, en donde se tiene tres ambientes (fijos) con cuatro parcelas (fijas) cada uno y ocho subparcelas como unidades de frecuencia. Estas mismas parcelas con sus respectivas subparcelas, sirvieron para obtener los datos de observación para cobertura del dosel (fenología foliar) y suelo, así como para el nivel de inundación a lo largo del año.

Se midieron los parámetros de diámetro a la altura del pecho (D.A.P.), altura y determinación taxonómica para cada individuo mayor a 3 cm. de D.A.P.

Para conocer la cobertura de especies a nivel del dosel y del suelo (por ejemplo pastos), en cada parcela se establecieron 16 cuadros de 4 m^2 cada uno, en donde se estimaron los valores de coberturas presentes.

Análisis de la vegetación.

Para describir la vegetación y definir las diferencias en composición de especies entre la vegetación de SBI y la de la selva circundante, así como ver las diferencias entre distintas épocas del año, se utilizaron los siguientes parámetros y análisis.

Parámetros estructurales: Con los datos medidos en campo se obtuvieron los valores de densidad, definida como el número de individuos registrados por unidad de muestreo; área basal, la cual representa el área total que ocupan los tallos de los individuos y se obtiene a partir del D.A.P., y la frecuencia de las especies dentro del área muestreada. Con base a estos datos se calcularon los valores de importancia de las especies, los índices de diversidad y la similaridad entre los ambientes.

Valores de Importancia: El índice de valor de importancia ecológica utilizado es el Valor de Importancia Relativa de Curtis (V.I.R.) (Mueller-Dombois y Ellenberg, 1974). Corresponde a la sumatoria de la densidad relativa, la frecuencia relativa y la dominancia relativa. El valor de las especies varía en un rango de 0 a 300 (Brower y Zar, 1977) dado que involucra los tres elementos señalados.

Índices de Diversidad: Estos índices permiten conocer que tan homogénea o heterogéneamente se distribuyen los individuos en la comunidad y como las especies presentes se reparten los recursos disponibles, dependiendo en gran medida del número de individuos presentes para cada especie (Magurran, 1989).

La diversidad alfa, la diversidad de una comunidad particular, es la que posee más índices y métodos de medición descritos. Se distingue entre los métodos que miden el número de especies existentes (riqueza específica) y los que miden la abundancia relativa de los individuos de cada especie (estructura). Entre los primeros, se encuentra el índice de Margalef, utilizado en el presente trabajo. Se expresa como (Magurran, 1989):

$$Dmg = (S-1)/\ln N$$

Donde S es el número de especies y N es la abundancia total de las especies.

Para estimar la diversidad existen diversos índices entre los que se encuentra el de Shannon-Wienner (Magurran, 1989), reportado de igual manera en este trabajo. Este índice proviene de la Teoría de la Información y se expresa como:

$$H' = -\sum p_i \ln p_i$$

Donde p_i es la abundancia proporcional de la especie 'i'.

La Diversidad Máxima ($Hmax = \ln S$) indica la proporción del valor máximo de la diversidad de la comunidad. La relación entre diversidad observada y diversidad máxima se puede tomar como una medida de la Equitabilidad en la comunidad, lo que permite conocer que tan equitativamente están distribuidos los individuos entre las distintas especies que conforman la comunidad (Brower y Zar, 1977; Begon et al., 1989, Magurran, 1989). Se expresa como:

$$E = H'/H_{max} = H'/\ln S$$

Los índices de diversidad fueron obtenidos utilizando el programa Primer 5 v. 5.2.9 (2002).

Similaridad: Para comparar la composición de especies entre los ambientes muestreados, se obtuvo la matriz del similaridad utilizando el programa Primer 5 v. 5.2.9 (2002). Se utilizó la medida de similaridad de Bray-Curtis utilizando una transformación de raíz cuadrada.

Ordenación de la Vegetación: Una ordenación es un "mapa" de las muestras, generalmente en dos o tres dimensiones, en el cual la colocación de las muestras más que representar su simple localización geográfica, refleja la similaridad de sus comunidades biológicas (Clarke y Warwick, 2001). Es decir, las distancias entre las muestras en la ordenación intentan igualar las disimilaridades correspondientes en la estructura de la comunidad: puntos cercanos tienen comunidades muy similares, muestras que están separadas tienen pocas especies en común o las mismas especies en diferentes niveles de abundancia o biomasa.

Se obtuvo la ordenación de la vegetación mediante la prueba MDS (Multi-Dimensional Scaling), esta ordenación está basada en el procedimiento no métrico descrito por Kruskal (Kruskal, 1964, in Clarke, K.R. y R.N. Gorley, 2002). El propósito del MDS es construir un "mapa" de configuración de las muestras, en un número específico de dimensiones, que logre satisfacer todas las condiciones impuestas por la matriz de similaridad, de tal manera que podamos apreciar en un plano las diferencias entre las muestras analizadas en términos del espacio que las separa.

Observaciones de campo: para definir si los factores nivel de inundación, cobertura del suelo y del dosel están influyendo en la respuesta espectral de la vegetación se realizaron tres censos en cada uno de los tres ambientes, de acuerdo a las temporadas de secas (abril), lluvias (julio) y nortes (octubre), para tomar datos de porcentaje de caducifoliedad del follaje de las especies en la comunidad, nivel de inundación y cobertura del suelo en cada ambiente.

Los datos de nivel de inundación se registraron sólo para un año. Para tener una impresión de la variabilidad interanual se comparó los datos pluviales de años anteriores en un periodo de 20 años (1982-2003), suponiendo que existe una relación directa entre la precipitación anual y el nivel del agua en las zonas bajas inundables.

Análisis de Imágenes.

Fuente de Información: La información espectral en una imagen está compuesta por varias bandas, éstas indican la cantidad de energía que es reflejada por la cubierta del suelo en distintas porciones del espectro electromagnético. La respuesta espectral de un tipo de vegetación puede cambiar durante el año debido a cambios en la vegetación como lo es el estado fenológico de las hojas. Por esta razón, para identificar estas diferencias es necesario

utilizar imágenes multi-temporales, ya que éstas permiten identificar las características específicas en cada época del año.

Agrawal et al., (2003), mencionan que con imágenes multi-temporales se puede detectar y monitorear las variaciones fenológicas sobre grandes áreas de observación, a cualquier periodicidad deseada. Estas imágenes no sólo nos proporcionan mayor exactitud en la clasificación sino también mayor consistencia en todas las clases mapeadas.

Las imágenes de satélites Landsat son las que se han utilizado con mayor frecuencia para la clasificación y generación de mapas de vegetación, tanto a nivel local como regional, debido al nivel de detalle que ofrecen. Para el presente trabajo, debido a que la superficie estudiada es de un área relativamente pequeña, se tomó la decisión de utilizar éstas para evaluar el comportamiento espectral de la vegetación de Selva baja inundable a través del tiempo.

Corrección geométrica: Este proceso es una georreferenciación que se efectúa a través de la localización de puntos de control, tanto en la imagen original como en la cartografía de referencia, y al cálculo posterior de las funciones de transformación entre las coordenadas de la imagen y las del mapa de referencia (Hori, 1998). Se corrigieron geométricamente las imágenes Landsat de 1988, 1994, 1996, 2000 y 2003 (west path20/row 47).

Clasificación de la imagen: La clasificación multiespectral es el proceso donde se lleva a cabo la asignación de los pixeles a un número determinado de clases individuales basado en sus valores de archivo. Se basa en el registro simultáneo del comportamiento de los objetos en distintas bandas del espectro (Chuvieco, 1990).

La imagen de satélite (Landsat ETM 2003, west path20/row 47) se clasificó mediante un enfoque híbrido, el cual consiste en utilizar técnicas de clasificación no supervisada y supervisada (Brondizio et al., 1996, Hori, 1998, González, 2004). Esto nos permite aprovechar las ventajas de ambos tipos de clasificación, de tal manera que la identificación de la selva baja inundable sea más precisa.

Clasificación no supervisada: Se realiza mediante la selección de un conjunto sistemático o aleatorio de elementos del área de estudio. Se le denomina de agrupamientos (cluster), ya que considera que los números digitales de la imagen forman una serie de agrupaciones o conglomerados. La clasificación se desarrolló con el módulo CLUSTER (Idrisi versión 14.1 Kilimanjaro, 2004). Este módulo realiza la clasificación basándose en un grupo de bandas de

entrada usando una técnica máxima de histograma multi-dimensional (Eastman, 2003). Para cada sitio de estudio se realizó la clasificación no supervisada de la imagen Landsat ETM del 2003. Se obtuvieron diferentes clases espectrales las cuales fueron identificadas y asignadas a una cobertura particular.

Clasificación supervisada: Parte del conocimiento de la zona de estudio utilizando sitios de entrenamiento previamente elegidos, de tal manera que permite delimitar en la imagen áreas representativas de los tipos de cobertura de la zona, en este caso tanto de la Selva baja inundable como de sus asociaciones. Estas áreas son los denominados campos de entrenamiento (training sites) y sirven para que el ordenador se "entrene" y reconozca dichos tipos de cobertura (a través de las firmas espectrales).

Una vez definidos los campos de entrenamiento, se corrió el algoritmo MAKESIG, utilizando las bandas 2, 3 y 4 de la imagen y obteniendo las firmas espectrales del número de clases o coberturas identificadas en cada ambiente. Se usaron solo tres bandas debido a que la superficie clasificada es pequeña y los campos de entrenamiento no contienen el suficiente número de pixeles para poder usar las siete bandas de la imagen debido al algoritmo utilizado por el programa.

Posteriormente, se corrió el módulo MAXLIKE (clasificador de Máxima Verosimilitud) con las firmas ya obtenidas previamente. MAXLIKE emplea una función de probabilidad multidimensional completa para determinar la probabilidad de que cualquier píxel pertenezca a una clase dada. Por defecto, cada píxel es asignado a la clase más probable (Eastman, 2003). Al usar la información de un grupo de sitios de entrenamiento, MAXLIKE emplea la media y los datos de varianza/covarianza de las firmas para estimar la probabilidad posterior de que un pixel pertenezca a cada clase (Eastman, 2003).

Análisis del comportamiento fenológico: Para lograr la discriminación de la reflectancia entre el efecto del suelo y la vegetación, se ha desarrollado metodologías en donde el objetivo es crear bandas artificiales, a partir de las bandas originales, mediante un cálculo de valores entre dos o más bandas de la misma imagen (Hori, 1998).

Una banda artificial de uso frecuente es el llamado Índice de Vegetación de la Diferencia Normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés) que refleja la respuesta espectral característica de la vegetación sana, con alto contenido de humedad. Se utiliza una combinación principalmente de la banda roja y la del infrarrojo cercano.

La combinación de estas dos bandas es debido a que mientras los pigmentos de la hoja absorben la mayor parte de la luz que reciben para realizar la función fotosintética en la región visible, en el infrarrojo cercano son bastante transparentes, lo que hace que la vegetación vigorosa presente baja reflectividad en la banda roja del espectro y alta en el infrarrojo cercano (Hori, 1998). Mientras mayor sea el contraste entre ambas bandas, mayor será el vigor vegetal que se refleja; si el contraste es menor entre estas bandas se interpreta como una vegetación enferma, senescente o sin hojas.

El NDVI se expresa como:

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$$

Donde: NIR= Infrarrojo cercano,
R= Rojo (correspondientes a las bandas 3 y 4 de Lansat TM).

Cuanto mayor sea el resultado, mayor vigor vegetal presenta la zona observada, en un rango que va de -1 a +1. De ellos, sólo los valores positivos corresponden a zonas de vegetación. Los valores negativos, pertenecen a nubes, nieve, agua, zonas de suelo desnudo y rocas; ya que sus patrones espectrales son generados por una mayor reflectancia en el visible que en el infrarrojo. El valor del NDVI puede variar en función del uso de suelo, estación fenológica, situación hídrica del territorio y ambiente climático de la zona.

Las diferencias en las respuestas del vigor de la vegetación a lo largo del transecto, se analizó estadísticamente utilizando el valor del NDVI de un conjunto de 9 píxeles alrededor de cada parcela de muestreo, incluyendo el píxel del centro como el correspondiente a la parcela, según método propuesto por Oza (1996, en Feeley et al., 2005) para examinar los valores de NDVI directamente sobre las parcelas en bosques tropicales secos.

Análisis temporal: El análisis temporal se realizó con imágenes Landsat ETM, El objetivo fue relacionar la respuesta espectral de la imagen con los parámetros ecológicos de la SBI, ya que se ha visto que la clasificación de este tipo de vegetación cambia sustancialmente de un año a otro de acuerdo a la respuesta espectral que presenta esta selva debido a condiciones tales como fenología, inundación, pendiente, etc.

Las imágenes seleccionadas fueron: 1988 (27/Abril); 1994 (29/Oct); 1996 (5/Feb); 2000 (27/Marzo) y 2003 (7/Mayo), por abarcar las tres estaciones y contener por lo menos dos de las tres comunidades de SBI, y no tener nubes o errores sobre las áreas de los mismos.

Se hace una comparación entre los promedios de NDVI para nueve pixeles correspondientes a cada parcela con su alrededor, analizando el comportamiento temporal entre estaciones, usando el mes de febrero como representativo para la temporada de nortes (imagen de 1996), mayo para la temporada de secas (imagen de 2003) y octubre para la temporada de lluvias (imagen de 1994).

Análisis Estadístico

Se realizó un Análisis de Varianza (ANOVA) de una vía, técnica estadística apropiada para contrastar medias de más de dos grupos (Daniel, 1987, Sokal y Rohlf, 1995), para determinar si las diferencias son significativas estadísticamente en los resultados de densidad, área basal y valores de NDVI. El ANOVA se basa en el supuesto de que la variación total presente en un conjunto de datos se distribuye en varios componentes.

Para cumplir con el supuesto de Normalidad de los datos se obtuvo la gráfica de residuales para verificar su distribución. Para la Homocedasticidad o igualdad de varianzas se utilizó la prueba de Levenné, la cual efectúa un análisis de varianza sobre las diferencias en valor absoluto entre las observaciones y la mediana.

Cuando el ANOVA prueba que existen diferencias entre las medias analizadas surge la pregunta sobre qué parejas de medias son distintas, esto se responde mediante una prueba Post Hoc Existen diversos procedimientos para hacer comparaciones individuales, el procedimiento más utilizado es el de la mínima diferencia significativa (LSD de Fisher, por sus siglas en inglés) (Daniel, 1987, Sokal y Rohlf, 1995). En este se calcula una sola medida patrón que sirve de base para medir diferencias observadas entre medias: toda diferencia mayor a esta cantidad patrón es declarada significativa para un nivel de significancia (α).

Cuando no se cumplieron los supuestos del ANOVA, aún realizando las transformaciones logarítmicas, fue necesario realizar una prueba no paramétrica para concluir si existen diferencias significativas o no. La prueba no paramétrica utilizada fue el ANOVA de rangos de Kruskal-Wallis; cuando esta prueba sugirió que existían diferencias se corrió la prueba de rangos Newman-Keuls para determinar que pareja de medias son distintas. Los datos fueron capturados y analizados con el programa Excel, el paquete estadístico utilizado fue el Statistica V. 7.1 (2005).

RESULTADOS

ANÁLISIS DE VEGETACIÓN

Riqueza de Especies: El ambiente Subhúmedo es el que presenta mayor riqueza de especies en todas las parcelas con excepción de la parcela Intermedia. La riqueza específica registrada por parcelas en los tres ambientes analizados parece ser mayor en las parcelas Intermedias (cuadro 1, para la lista completa ver el anexo I), con excepción del ambiente Subhúmedo, en donde la parcela que registró mayor número de especies es la de Borde. El número de especies encontrado en la parcela Borde del ambiente Seco es bajo comparado a las otras Parcelas de Borde (fig. 5).

Parámetros Estructurales: Los valores de densidad más altos corresponden a la Selva baja inundable y los más bajos a los de la selva circundante (Fig. 6); en el ambiente Húmedo la densidad en la parcela Borde fue mayor que en los demás ambientes. El ANOVA indica que existen diferencias significativas entre las parcelas muestreadas ($F_{11,84}$=21.2897, p<0.00001), lo que sugiere que existen diferencias significativas entre las parcelas de Borde de los tres ambientes. En el ambiente Seco la parcela de Borde se parece a la selva circundante en densidad. En el Subhúmedo, la parcela Selva es diferente a las otras tres parcelas, y en el ambiente Húmedo todas las parcelas son diferentes (Cuadro 2).

Cuadro 1. Riqueza de especies, géneros y familias por ambiente y parcela de muestreo.

AMBIENTE	PARCELA	ESPECIES	GÉNEROS	FAMILIAS
HUMEDO	Centro	27	26	19
	Intermedio	39	35	20
	Borde	28	27	21
	Selva	27	24	22
SUBHÚMEDO	Centro	30	26	19
	Intermedio	34	29	19
	Borde	39	35	23
	Selva	32	30	19
SECO	Centro	29	28	17
	Intermedio	32	29	20
	Borde	14	12	9
	Selva	28	24	18

Los valores de área basal muestran que las parcelas de Centro e Intermedio de los tres ambientes presentan valores similares (Fig. 7). Aunque el área basal de la parcela Borde y la de Selva en el ambiente Húmedo parecen mayor que en todas las demás parcelas, el ANOVA sugiere que las diferencias no son significativas ($F_{11,84}$ = 1.3973, p =0.189).

Cuadro 2. Valores promedio de densidad y su desviación estándar. Se realizó la Prueba LSD de Fisher (Error: Entre MS=33.912, df=84) para comparar los valores de Densidad promedio entre los ambientes (*) y entre parcelas (letras) de muestreo.

	SELVA	BORDE	INTERMEDIO	CENTRO
SECO	13.75±4.46 a	13.75±4.46* a	25.86± 4.36 b	20.0±5.07* b
SUBHÚMEDO	14.75±3.41 a	32.13±5.82* b	33.63± 8.6* b	35.75±5.95 b
HÚMEDO	17± 3.81 a	41.0± 9.25* b	23.25± 7.42 c	31.75±5.1 d

- Difieren significativamente entre el mismo tipo de parcela; letras diferentes, difieren significativamente entre las parcelas del mismo ambiente.

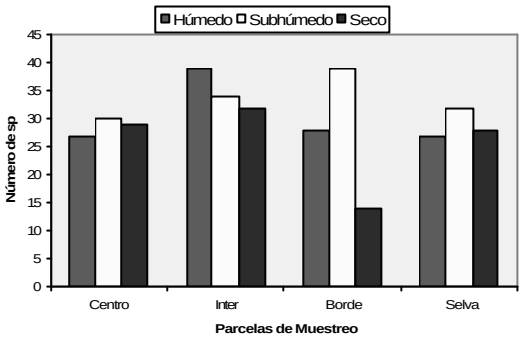

Figura 5. Número de especies por ambiente y parcela de muestreo.

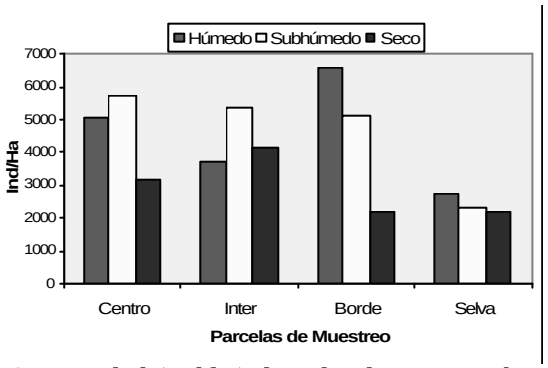

Figura 6. Densidad (Ind/ha) de individuos por ambiente y parcela de muestreo.

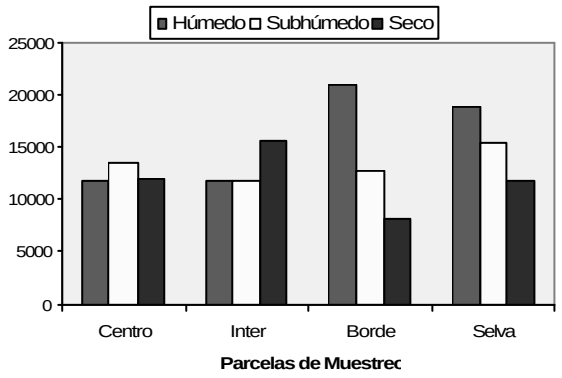

Figura 7. Valores de área basal ($cm^2/500m^2$) por ambiente y parcela de muestreo.

Valores de Diversidad: La diversidad de las parcelas de SBI fue mayor que el de las de Selva en el ambiente Húmedo y en el Seco (Cuadro 3). El ambiente Subhúmedo presenta mayor diversidad en la Selva que en las parcelas de SBI. La parcela de Borde del ambiente Subhúmedo tiene mayor diversidad que las otras dos parcelas de Borde.

Los valores de diversidad máxima obtenido sugiere que la parcela de Selva que más se acerca a su valor máximo de diversidad es la del ambiente Subhúmedo, para las parcelas de Selva baja inundable el sitio más cercano a su máxima diversidad sería la del ambiente Seco; asimismo, el ambiente que presenta mayor equitabilidad en las parcelas de selva baja inundable es el Seco.

Cuadro 3. Valores de diversidad obtenidos mediante la fórmula de Margalef (Dmg), y Shannon-Wiener (H'). Se reporta la diversida máxima (H'max) y la equitabilidad (E).

AMBIENTE	PARCELA	D_{mg}	H'	H'max	E
HUMEDO	SELVA	5.292	2.536	3.296	0.769
	BORDE	4.661	1.761	3.332	0.529
	INTERMEDIO	7.272	3.138	3.664	0.857
	CENTRO	4.695	2.810	3.296	0.853
SUBHÚMEDO	SELVA	6.498	3.046	3.466	0.879
	BORDE	6.848	2.551	3.664	0.696
	INTERMEDIO	5.898	2.668	3.526	0.756
	CENTRO	5.127	2.865	3.401	0.842
SECO	SELVA	5.744	2.733	3.332	0.820
	BORDE	2.766	1.737	2.639	0.658
	INTERMEDIO	5.813	3.091	3.466	0.892
	CENTRO	5.517	3.042	3.367	0.903

Valores de Importancia Relativa: Las especies con mayor valor de importancia registrados son: *Croton nitens*, *Haematoxylum campechianum*, *Cameraria latifolia*, *Eugenia winzerlingii*, *Metopium brownei*, *Bucida buceras*, *Diospyros anisandra*, *Coccoloba cozumelensis* y *Manilkara zapota* (Cuadro 4-6).

Las especies que dominan en la SBI son *Croton nitens*, *H. campechianum* y *E. winzerlingii* en los ambientes Húmedo y Subhúmedo, y *H. campechianum*, *Myrcianthes fragans* y *Cameraria latifolia* para el ambiente Seco. En la parcela de Borde de los ambientes Húmedo y Subhúmedo dominan *Croton nitens*, *Bucida buceras*, *Calophyllum braziliense* y *Myrcianthes fragans*, y en el ambiente Seco *H. campechianum* y *M. fragans*. Las parcelas de Selva no comparten las especies con mayor valor de importancia en cada una, debido a las condiciones contrastantes de los diferentes ambientes en los que se desarrollan.

Cuadro 4. Valores de Importancia (V.I.R.) de las cinco especies de mayor contribución para el ambiente Húmedo, obtenidos mediante los datos de densidad, frecuencia y área basal relativos. El V.I.R. está expresado a un valor máximo de 300.

CENTRO (4)		INTERMEDIO (3)		BORDE (2)		SELVA (1)	
ESPECIE	**V.I.R.**	**ESPECIE**	**V.I.R.**	**ESPECIE**	**V.I.R.**	**ESPECIE**	**V.I.R.**
Croton nitens	32.646	Eugenia winzerlingii	33.240	Croton nitens	70.683	Cryosophila stauracantha	43.097
Eugenia winzerlingii	26.643	Haematoxylum campechianum	25.366	Calophyllum braziliense	68.043	Pseudolmedia oxyphyllaria	33.229
Bucida buceras	24.669	Metopium brownei	25.277	Bucida buceras	32.714	Pouteria reticulata	32.767
Haematoxylum campechianum	24.199	Croton nitens	21.517	Calyptranthes sp.	29.291	Ampelocera hottlei	26.379
Coccoloba spicata	19.578	Manilkara zapota	18.068	Swietenia macrophylla	13.419	Drypetes lateriflora	20.069

Cuadro 5. Valores de Importancia (V.I.R.) de las cinco especies de mayor contribución para el ambiente Subhúmedo, obtenidos mediante los datos de densidad, frecuencia y área basal relativos. El V.I.R. está expresado a un valor máximo de 300.

CENTRO (4)		INTERMEDIO (3)		BORDE (2)		SELVA (1)	
ESPECIE	**V.I.R.**	**ESPECIE**	**V.I.R.**	**ESPECIE**	**V.I.R.**	**ESPECIE**	**V.I.R.**
Croton nitens	35.996	Croton nitens	51.560	Myrcianthes fragrans	57.431	Brosimum alicastrum	55.901
Haematoxylum campechianum	35.026	Haematoxylum campechianum	39.496	Gymnanthes lucida	29.767	Pouteria unilocularis	32.867
Diospyros anisandra	28.303	Eugenia winzerlingii	30.531	Bucida buceras	25.006	Malmea depressa	14.702
Eugenia winzerlingii	22.006	Calyptranthes pallens	19.441	Croton nitens	23.325	Talisia olivaeformis	14.339
Coccoloba cozumelensis	15.956	Myrcianthes fragrans	19.140	Hyperbaena winzerlingii	17.365	Manilkara zapota	14.322

Cuadro 6. Valores de Importancia (V.I.R.) de las cinco especies de mayor contribución para el ambiente de Seco, obtenidos mediante los datos de densidad, frecuencia y área basal relativos. El V.I.R. está expresado a un valor máximo de 300.

CENTRO (4)		INTERMEDIO (3)		BORDE (2)		SELVA (1)	
ESPECIE	**V.I.R.**	**ESPECIE**	**V.I.R.**	**ESPECIE**	**V.I.R.**	**ESPECIE**	**V.I.R.**
Haematoxylum campechianum	54.963	Haematoxylum campechianum	56.828	Myrcianthes fragrans	83.410	Thouinia paucidentata	43.035
Cameraria latifolia	29.412	Coccoloba diversifolia	25.444	Haematoxylum campechianum	70.738	Erythroxylum rotundifolium	29.636
Syderoxylon celastrinum	18.642	Myrcianthes fragrans	18.986	Syderoxylon celastrinum	39.360	Malpighia lundellii	26.516
Hyperbaena winzerlingii	18.484	Manilkara zapota	18.221	Bucidabuceras	26.342	Piscidia piscipula	25.650
Myrcianthes fragrans	15.037	Acacia gaumeri	14.863	Lonchocarpus yucatanensis	24.547	Vitex gaumeri	23.496

Similaridad: En los tres ambientes analizados las parcelas de Selva tienen menos del 13% de similitud con las de Selva baja inundable, incluyendo a las parcelas de Borde; las parcelas de Borde tienen una similitud cercana al 40% con las de SBI; se encontró menor similitud del Borde con la de Selva que entre el Borde y la SBI. La similitud entre las parcelas de Selva baja inundable en los tres ambientes es alta, registrando valores cercanos al 70%.

Las parcelas de la SBI del ambiente Húmedo tiene alrededor del 60% de similaridad entre si y cerca del 50% con las parcelas de la SBI del Subhúmedo, siendo menor con la SBI del ambiente Seco. La similaridad entre las parcelas de Borde de los tres ambientes es baja. La parcela de Selva del ambiente Húmedo tiene solo un 23% de afinidad con la del Subhúmedo, pero nula con la parcela de Selva del ambiente Seco.

El dendrograma (Fig. 8) muestra que existe afinidad entre las parcelas de Selva del ambiente Húmedo y Subhúmedo pero no con la Selva del Seco. Las parcelas de Selva baja inundable del ambiente Seco muestran afinidad con el Borde de los ambientes Seco y Subhúmedo, y las parcelas de SBI del ambiente Húmedo, incluido la de Borde, con las de las zonas Intermedia y Centro del Subhúmedo. Se forman cuatro grupos a un nivel de similaridad del 20-30%: 1) SBI del seco con el borde del Subhúmedo; 2) Borde y SBI del Húmedo con la SBI del Subhúmedo; 3) Selva del Húmedo y Subhúmedo, y 4) la selva del ambiente Seco sin relación a ninguna parcela. Estos resultados sugieren que las parcelas de Borde de los tres ambientes tienen mayor afinidad con las parcelas de Selva baja inundable que con la selva circundante.

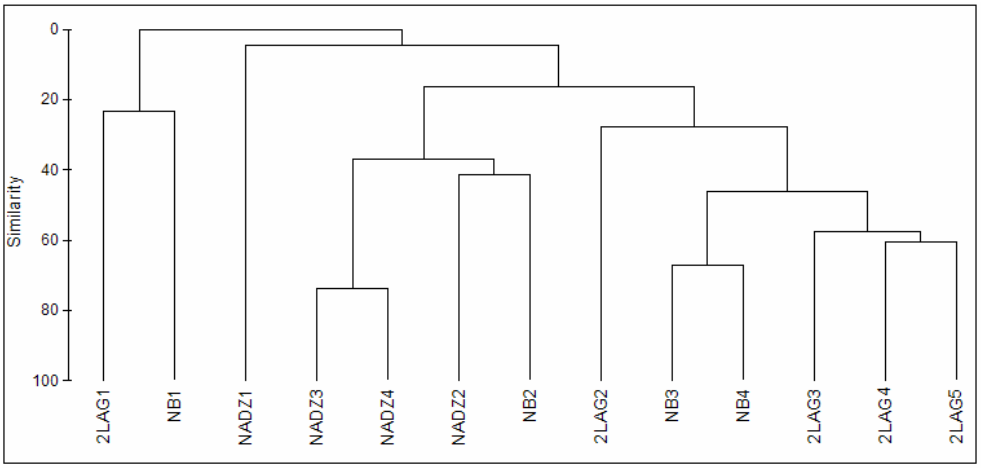

Figura 8. Dendrograma de las trece parcelas de muestreo, utilizando un cluster o agrupamiento por medio de los valores de similaridad de Bray-Curtis mediante la transformación de las

abundancias usando la raíz cuadrada. 2LAG= Húmedo, NB=Subhúmedo y NADZ=Seco. 1=Selva, 2=Borde, 3=Inter, y 4=Centro.

Ordenación de la Vegetación: El MDS (Fig. 9) muestra la separación de las parcelas de selva circundante con las de Selva baja inundable. La relación entre las parcelas de Selva es cercana entre los ambientes Húmedo y Subhúmedo; el ambiente Seco se ubica alejado de los otros dos. Las parcelas Intermedio y Centro se agrupan en los tres ambientes, las selvas circundantes están separadas a un lado de las parcelas de SBI; las parcelas de Borde están más cercanas a las de la SBI, pero con un desplazamiento a la izquierda de una línea entre la SBI y la selva circundante, este desplazamiento del Borde en el ambiente húmedo lo ubica al lado contrario y no entre la SBI y la selva circundante.

La distribución de la vegetación de Selva baja inundable al interior del parche de SBI muestra que las parcelas denominadas Borde de los tres ambientes no se mezclan con las parcelas Intermedio y Centro pero si se encuentran cercanas. Las parcelas Intermedio y Centro de los ambientes Subhúmedo y Seco se agrupan y forman un cúmulo en cada ambiente pero no con los otros; las tres parcelas de SBI del ambiente Húmedo no se agrupan entre si y están más asociadas al ambiente Subhúmedo (Fig. 10).

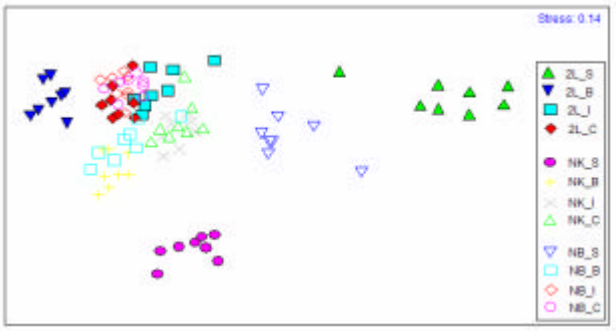

Figura 9. Ordenación MDS de los tres ambientes estudiados, basado en la transformación de las abundancias utilizando la raíz cuadrada (estrés = 0.14). 2L= Dos Lagunas, NK= Nadz Ka'an, NB= Nuevo Becal, S=Selva, B=Borde, I=Intermedio y C=Centro.

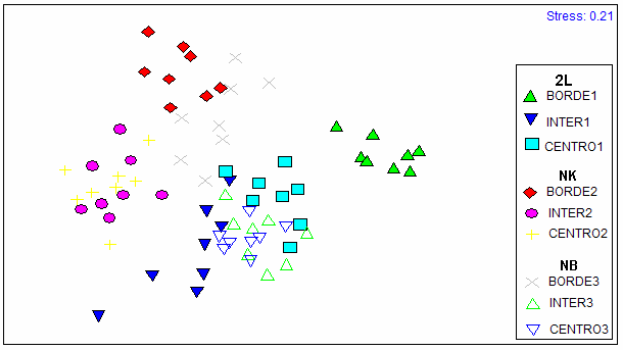

Figura 10. Ordenación MDS de las parcelas de muestreo correspondientes a los sitios de SBI, basado en la transformación de las abundancias utilizando la raíz cuadrada (estréss = 0.21). 2L= Dos Lagunas, NK= Nadz Ka'an, NB= Nuevo Becal, S=Selva, B=Borde, I=Intermedio y C=Centro.

Observaciones de campo: La cobertura del dosel en el periodo de secas fue inferior a la registrada en lluvias y nortes (Fig. 11). En las tres épocas del año la cobertura es menor en el centro del área de SBI, aumentando conforme nos aproximamos a la selva circundante. En el ambiente Seco, la parcela de Selva presenta valores bajos de cobertura durante el periodo de secas. La cobertura de suelo en los tres ambientes fue mayor en la SBI que en la selva circundante (Fig. 12), la cobertura aumenta al interior de la SBI conforme nos alejamos de la parcela de Selva.

La inundación sólo se observó en los ambientes Húmedo y Subhúmedo y durante la temporada de lluvias y nortes (Fig. 13). En el ambiente Seco no hubo agua por encima del suelo durante todo el año. En los tres ambientes, el suelo se mantuvo completamente seco en la época de secas; el mayor porcentaje de suelo inundado se obtuvo en la época de lluvias, disminuyendo durante la temporada de nortes.

En la zona de estudio, según datos de la CNA, se presentan más años con escasa precipitación, con algunos años intermedios con picos de precipitación mayor que el promedio, con un comportamiento constante en Zoh Laguna, desde 1989 hasta el año 2000, en donde la precipitación fue escasa, caracterizándose éste como un periodo seco para esta zona (ver fig. 2). Silvituc muestra una tendencia similar y en Nicolás Bravo se observa una mayor oscilación de años secos y húmedos.

En el comportamiento de la precipitación por temporadas (fig. 14) se observa, para las tres estaciones, que en la época de secas y nortes la precipitación es baja, aunque ligeramente mayor en nortes. En algunos años se presentan picos de precipitación en la época de nortes. La precipitación en la época de lluvias es mayor en Nicolás Bravo, pero en las otras dos zonas la precipitación es más constante durante unos años, aunque registraron cantidades más bajas. Palacio *et al.* (2002) menciona que durante la temporada seca del año se genera un estrés hídrico en la región, pero las zonas bajas inundables mantienen la cantidad de agua suficiente para dar refugio a las especies animales, aún en condiciones de extrema.

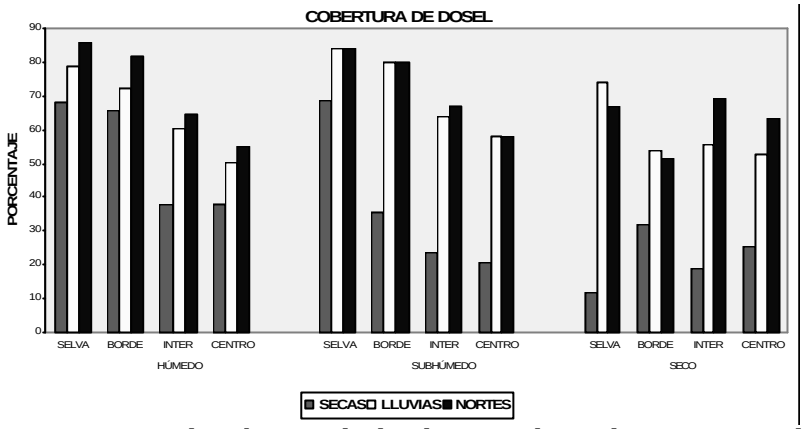

Figura 11. Porcentajes de cobertura de dosel registrados en las cuatro parcelas en los tres ambientes de muestreo durante las temporadas de secas, nortes y lluvias.

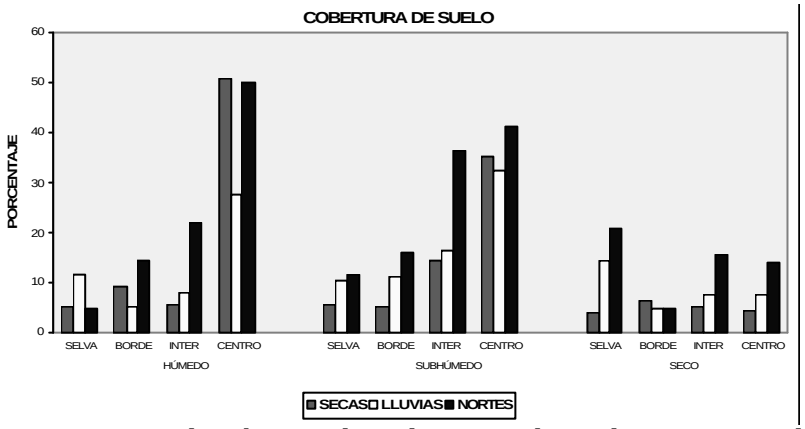

Figura 12. Porcentajes de cobertura de suelo registrados en las cuatro parcelas en los tres ambientes de muestreo durante las temporadas de secas, nortes y lluvias.

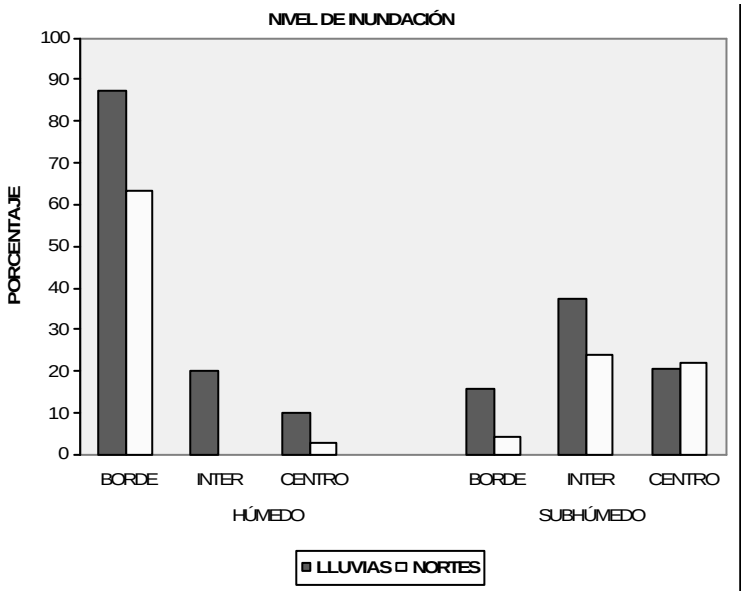

Figura 13. Porcentaje de suelo inundado registrados en las cuatro parcelas en los sitios de muestreo durante las temporadas de secas, nortes y lluvias.

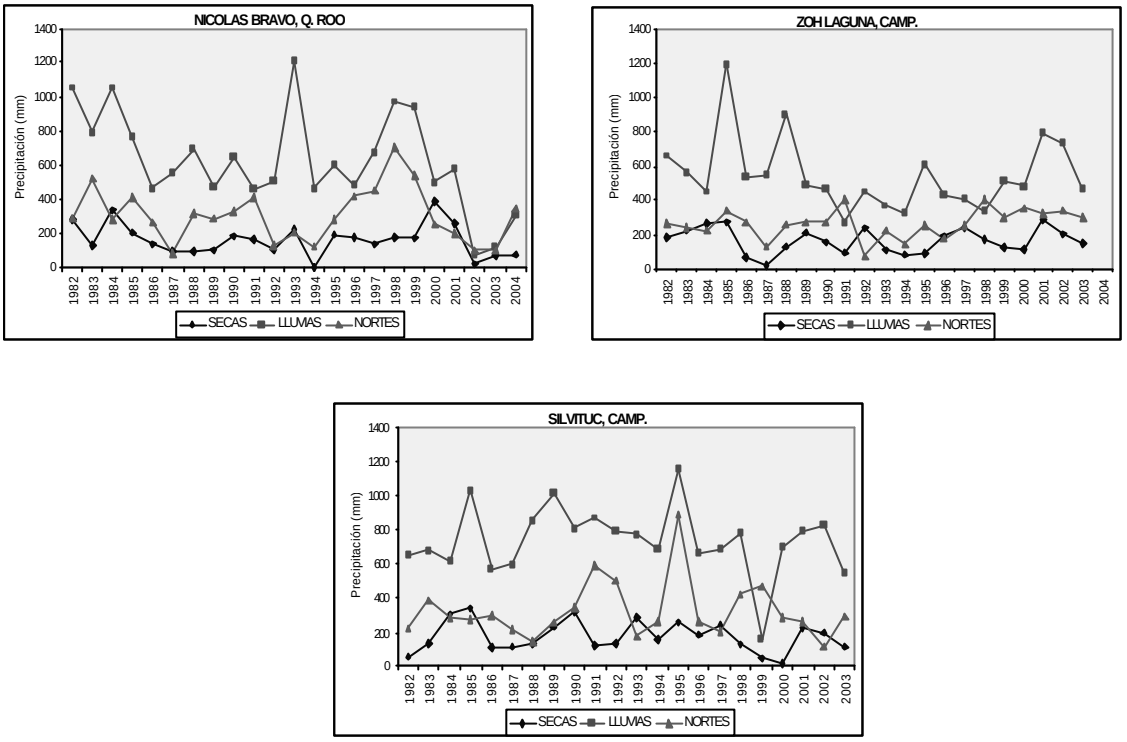

Fig. 14. Gráficas de precipitación de las tres estaciones climatológicas del área de estudio. Se presenta la precipitación total anual por temporadas para el periodo de 1982 a 2003. Secas: Febrero-Mayo; Lluvias: Junio-Septiembre, y Nortes: Octubre-Enero

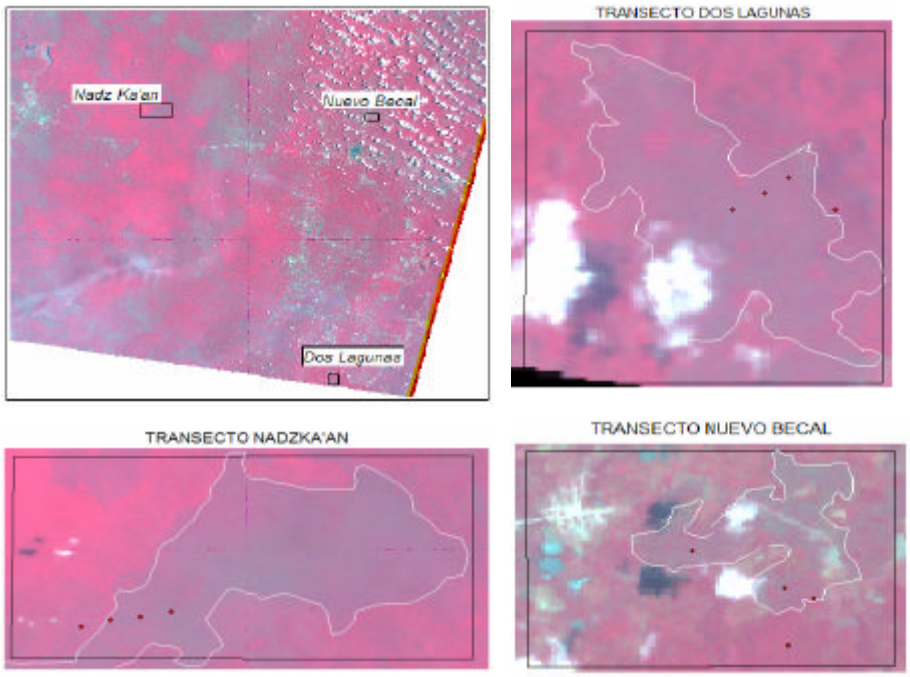

Figura 15. Imagen en falso color correspondiente a la imagen Landsat ETM 2003. Se señalan los tres sitios de estudio y el polígono correspondiente a cada sitio de SBI estudiado, el cual indica el margen de la SBI obtenido por la diferencia en señal de reflección para esta imagen en particular. Los puntos indican las parcelas de muestreo de vegetación en el gradiente del centro de la SBI hacia la selva circundante. Dos Lagunas=Húmedo, Nuevo Becal=Subhúmedo y Nadz Ka'an=Seco.

ANÁLISIS ESPECTRAL.

Clasificación de la Imagen. Los sitios de estudio se definieron tomando como base la imagen Landsat ETM (mayo de 2003, Fig. 15). Se realizó la clasificación de la superficie de toda el área de Selva baja inundable y su vegetación circundante.

Ambiente Húmedo. El análisis proporcionó un parche claramente identificable de SBI (colores rojo y naranja en la Fig. 16), con diferencias en respuestas espectrales del centro de la SBI hacia la selva alta circundante. En color verde se representan las áreas de acahual identificados en los recorridos de campo, aunque una parte dentro de esta clase corresponde a partes difusas por efecto de una nube.

Ambiente Subhúmedo. La Selva baja inundable no presenta una superficie continua pero tiene parches de selva inmerso dentro de la SBI debido a las condiciones topográficas del sitio; se observa un comportamiento en parches en donde fue posible identificar dos tipos de SBI además de la SMSP, acahual, urbano, nubes y sombras (Fig. 17).

Ambiente Seco. El análisis muestra un parche claramente identificable de SBI (colores amarillo y rojo en la Fig. 18), con diferencias en respuestas espectrales del centro de la zona baja inundable hacia la selva mediana circundante (colores verde y naranja). La separación entre la Selva baja inundable y la selva circundante es fraccionada con pixeles de SBI (amarillo) dentro de la selva (verde) y viceversa.

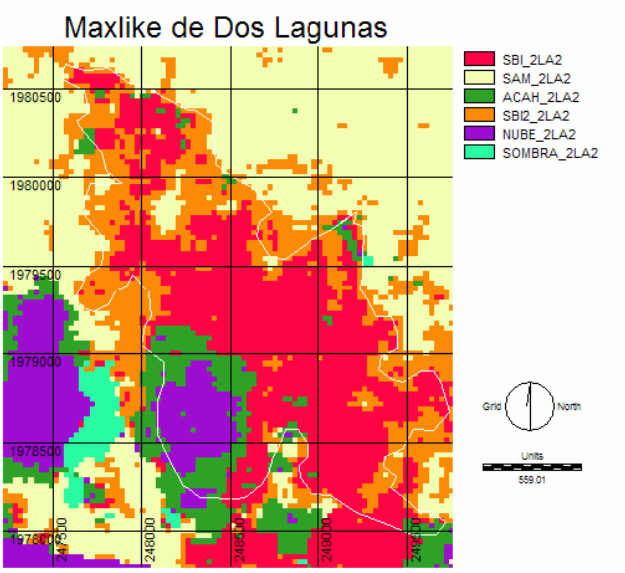

Figura 16. Ambiente Húmedo. Clasificación supervisada mediante el algoritmo Maxlike, utilizando firmas espectrales de 6 clases de cobertura: SBI, SA, Acahual, SMSP, Nubes y Sombras, aplicado a tres bandas (2,3 y 4) de la imagen landsat.

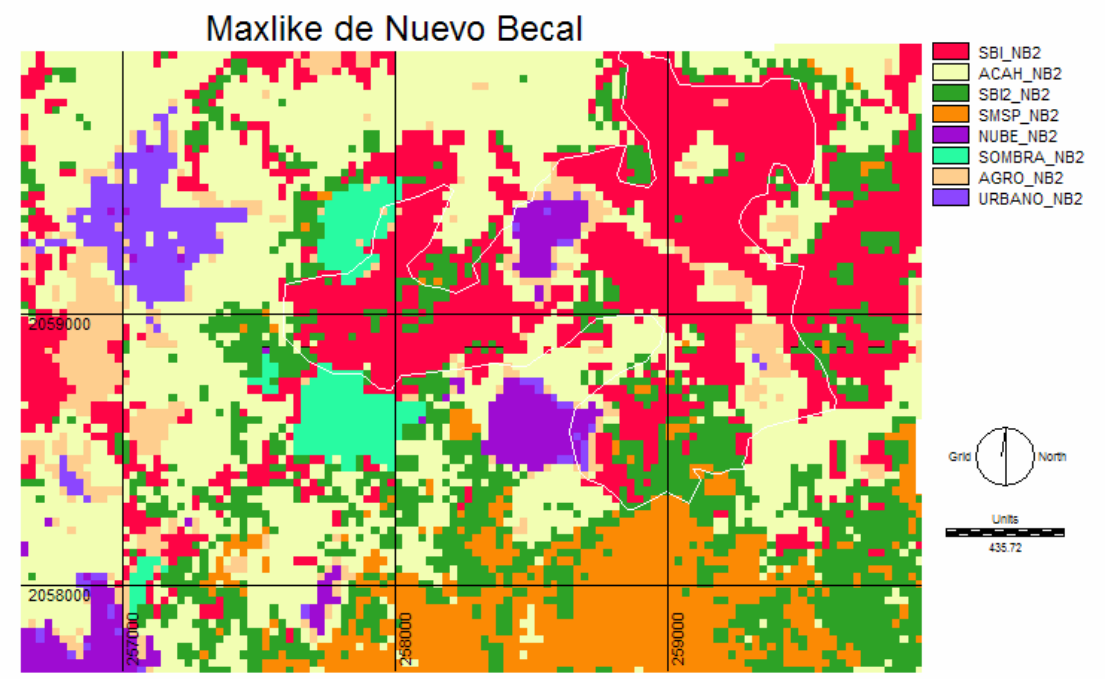

Figura 17. Ambiente Seco. Clasificación supervisada mediante el algoritmo Maxlike, utilizando firmas espectrales de 8 clases de cobertura: SBI, SBI2, Acahual, SMSP, Nubes, Sombras, Agropecuario y Urbano, aplicado a tres bandas (2,3 y 4) de la imagen landsat.

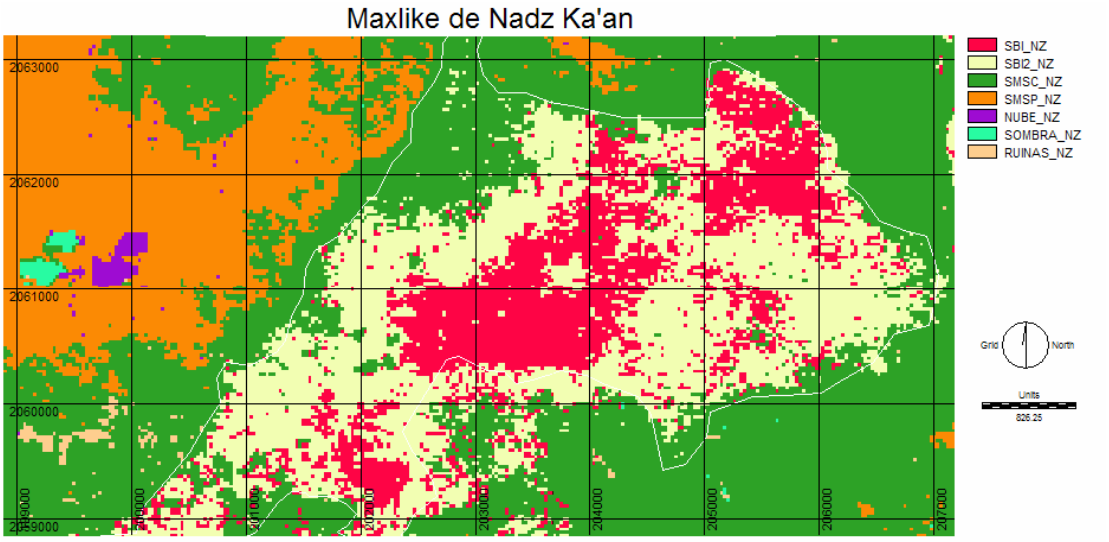

Figura 18. Ambiente Seco. Clasificación supervisada mediante el algoritmo Maxlike, utilizando firmas espectrales de 7 clases de cobertura: SBI1, SBI2, SMSC, SMSP, Nubes, Sombras y Ruinas, aplicado a tres bandas (2,3 y 4) de la imagen landsat.

COMPORTAMIENTO FENOLÓGICO.

Ambiente Húmedo. La clasificación indica un gradiente del vigor de la vegetación desde el interior de la Selva baja inundable hacia la selva alta perennifolia(Fig. 19). Los valores de NDVI para la SBI van del 0.02 hasta 0.16 y los de la selva circundante alcanzan 0.32. El valor NDVI de la selva alta no es muy diferente al de la SBI.

Ambiente Subhúmedo. No se observa un gradiente del vigor de la vegetación debido a que no es una Selva baja inundable bien delimitado en su forma sino que se presenta a manera de parches de SBI, pero si se registran diferencias en vigor entre la SBI y la selva circundante (Fig. 20). Los valores de NDVI para la SBI van del 0.03 hasta 0.09, los de la selva circundante alcanzan valores de 0.28.

Ambiente Seco. La clasificación (Fig. 21) señala un gradiente del vigor de la vegetación. Los valores de NDVI para la SBI van del 0.10 hasta 0.15 y los de la selva circundante alcanzan valores de hasta 0.41.

Aún y cuando la gráfica de mínimos y máximos (Fig. 22) muestra que los valores máximos de NDVI para la Selva baja inundable no muestran diferencias con los valores mínimos de la selva circundante, el ANOVA no paramétrico ($H_{(11,\ N=108)} = 98.79884$, $p= 0.0000$), sugiere que si existen diferencias significativas en la respuesta del NDVI entre las parcelas de muestreo de los tres ambientes estudiados.

La prueba estadística (Cuadro 7) sugiere que existen diferencias significativas entre ambientes y entre parcelas del mismo sitio. La parcela de selva mediana subcaducifolia difiere de la selva alta y de la selva mediana subperenifolia pero entre estas dos últimas no existen diferencias significativas; las parcelas de Borde son diferentes en los tres ambientes analizados; la parcela Intermedia del ambiente Subhúmedo difiere de los otros dos ambientes, misma situación que presenta la parcela del Centro del ambiente Húmedo.

El análisis sobre el gradiente del mismo ambiente indica que si existe una respuesta diferencial en el vigor de la vegetación, para esta época en particular, situación claramente identificable en el ambiente Seco (selva mediana subcaducifolia). En el ambiente Subhúmedo hay diferencias entre la Selva y Borde pero no al interior de la SBI, y en el Húmedo solamente el Borde y el Intermedio se parecen.

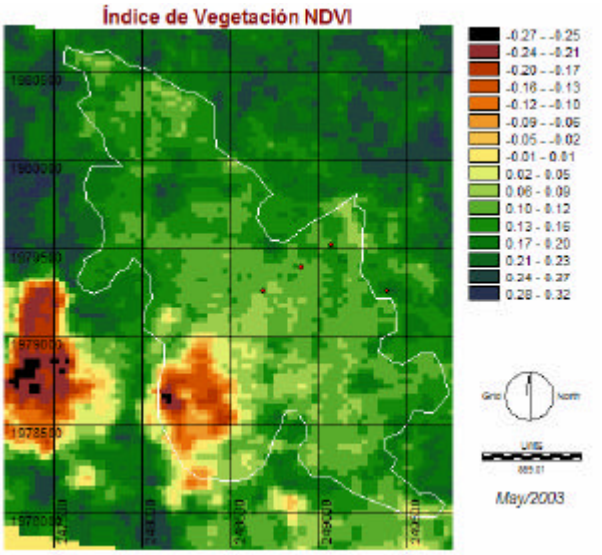

Figura 19. Ambiente Húmedo. Resultado del índice de vegetación NDVI, escalado a 16 intervalos en el valor del NDVI obtenido.

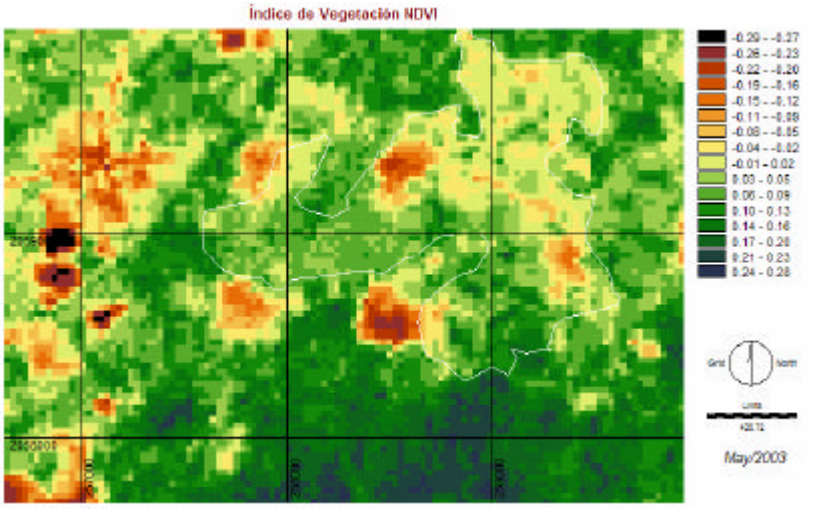

Figura 20. Ambiente Sub-húmedo. Resultado del índice de vegetación NDVI, escalado a 16 intervalos en el valor del NDVI obtenido.

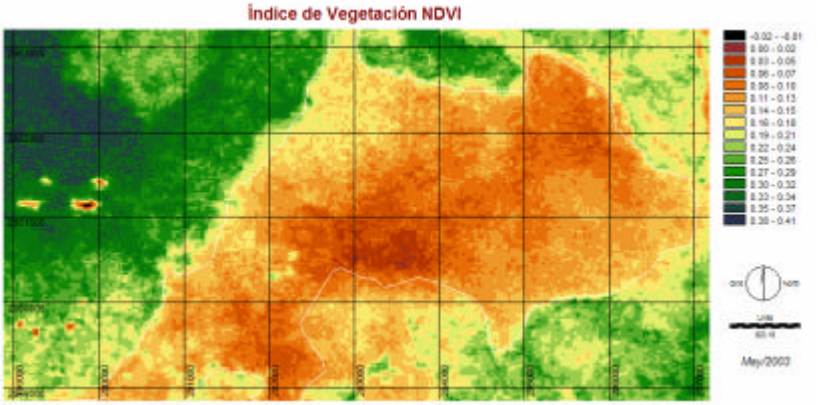

Figura 21. Ambiente Seco. Resultado del índice de vegetación NDVI, escalado a 16 intervalos en el valor del NDVI obtenido.

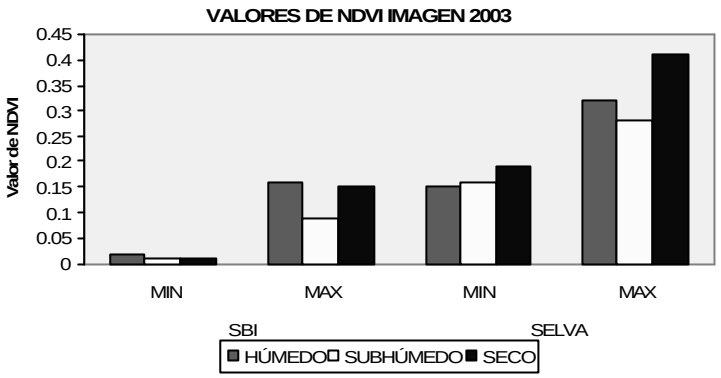

Figura 22. Valores mínimos y máximos de SBI y selva circundante, correspondientes a la imagen Landsat ETM del 2003.

Cuadro 7. Prueba Newman-Keul (Error: entre MS=0.00021, df=96) para los datos de valor de NDVI en cada parcela de los tres sitios de muestreo.

	SELVA	**BORDE**	**INTERMEDIO**	**CENTRO**
HÚMEDO	0.194±0.020 a	0.132±0.008* b	0.120±0.008 b	0.101±0.007* c
SUBHÚMEDO	0.197±0.013 a	0.150±0.014* b	0.083±0.031* c	0.071±0.011 c
SECO	0.212±0.012* a	0.164±0.014* b	0.117±0.005 c	0.082±0.009 d

* Difieren significativamente entre el mismo tipo de parcela en los tres ambientes; letras diferentes indican que difieren significativamente entre las parcelas del mismo ambiente.

Análisis temporal: Se presenta el comportamiento de los valores máximos y mínimos del NDVI para cada ambiente estudiado (Ver imágenes en el anexo II).

Ambiente Húmedo: Para la Selva baja inundable, la menor diferencia entre el valor mínimo y máximo del NDVI se presentó en la época de secas (mayo, valor de 0.09). La mayor diferencia se presentó en octubre (0.15). El vigor de la vegetación es alto en lluvias y en nortes (0.65 y .60) y bajo en secas (0.16, Fig. 23). La selva circundante registra mayor vigor que la SBI en la temporada de secas pero en lluvias el valor de NDVI es similar.

Ambiente Subhúmedo: La diferencia entre el valor mínimo y máximo del NDVI en el interior de la Selva baja inundable es mayor en secas (mayo, valor de 0.14). La selva circundante presenta valores de NDVI mayores que la SBI. El vigor de la vegetación es alto en lluvias y nortes (0.62 y 0.57) y bajo en secas (0.17, Fig. 24). En los meses húmedos los valores máximos de la SBI son similares a los mínimos de la selva circundante.

Ambiente Seco: La diferencia entre el mínimo y el máximo del valor del NDVI fue mayor en época de secas (mayo, valor de 0.13). El valor del NDVI es alto en lluvias y nortes (0.65 y 0.57) y bajo en secas (0.15, Fig. 25). Los valores de NDVI acentúan el tipo de selva subcaducifolia presente alrededor de la SBI ya que en la época seca la respuesta del vigor de la vegetación es mayor en la SBI y en los meses húmedos se observa mayor respuesta por parte de la selva circundante.

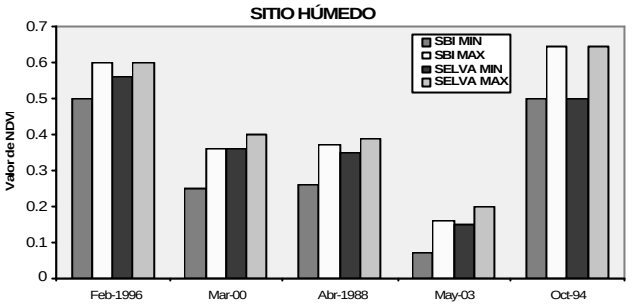

Figura 23. Valores mínimos y máximos de SBI y selva circundante del ambiente Húmedo, correspondientes a las imágenes Landsat ETM analizadas en el periodo de estudio.

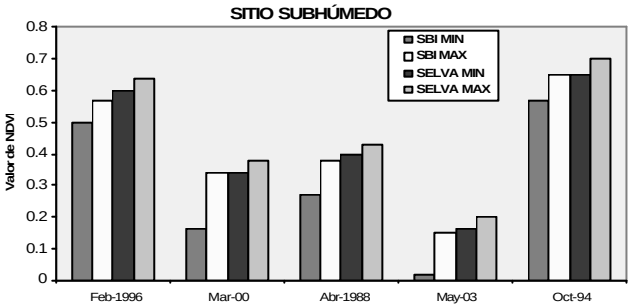

Figura 24. Valores mínimos y máximos de SBI y selva circundante del ambiente Sub-húmedo, correspondientes a las imágenes Landsat ETM en el periodo de estudio.

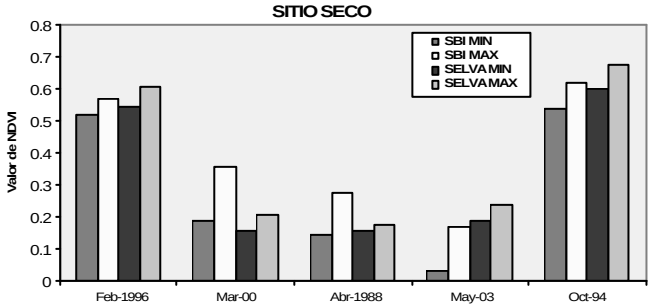

Figura 25. Valores mínimos y máximos de SBI y selva circundante del ambiente Seco, correspondientes a las imágenes Landsat ETM analizadas en el periodo de estudio.

El análisis estadístico realizado para identificar las diferencias del NDVI en cada parche de SBI nos permite señalar que se presentaron las mismas tendencias en los tres ambientes. La prueba no paramétrica sugiere que existen diferencias significativas en la respuesta del NDVI a lo largo del tiempo entre las parcelas de muestreo. La prueba Post Hocindica que existen fuertes diferencias significativas entre las diferentes imágenes analizadas (cuadro 8).

Se presentaron diferencias significativas en la respuesta del NDVI de las cuatro parcelas en las tres temporadas de análisis para cada ambiente. Esto es, la respuesta del NDVI es diferente a lo largo del año.

El análisis por parcelas nos permite señalar que en la temporada de secas (mayo) existen diferencias significativas entre las parcelas Selva, Borde y SBI por lo que se observa un gradiente en la respuesta espectral a lo largo del transecto en cada uno de los tres ambientes analizados. Sin embargo, en los ambientes Subhúmedo y Seco no existen diferencias entre las parcelas de Intermedio y Centro.

En la temporada de lluvias, para los ambientes húmedo y seco, se observaron diferencias significativas entre las parcelas Selva y las parcelas Intermedio y Centro, pero no entre Selva y Borde, por lo que sería difícil delimitarlo ya que presenta respuestas espectrales que pueden ser identificadas como selva circundante o SBI. En el ambiente Subhúmedo, la parcela de Selva tiene un comportamiento espectral diferente a la de Borde y a las Intermedio y Centro.

Para la temporada de nortes, en los ambientes Húmedo y Subhúmedo, se observaron diferencias significativas entre las parcelas de Selva y Borde y entre Borde, Centro e Intermedio, por lo que es posible identificar el gradiente de vegetación a lo largo del transecto. En el caso del ambiente Seco, no se observaron diferencias significativas entre las parcelas Selva y Borde, pero si con las parcelas Intermedio y Centro, por lo que podemos separar la selva circundante de la Selva baja inundable pero no podemos identificar el borde.

Cuadro 8. Prueba Post Hoc. Prueba Newman-Keul (Húmedo: MS=0.00045, df=152; Subhúmedo: MS=0.00041, df=160; Seco: MS=0.00032, df=160) para los datos de valor de NDVI para cada parcela de los tres ambientes de muestreo correspondiente a las imágenes Landsat ETM utilizadas para el periodo de estudio.

AMBIENTE	PARCELA	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	OCTUBRE
		1996	2000	1988	2003	1994
HUMEDO						
	SELVA	0.551±0.056 Ac	0.375±0.025 Aa	0.362±0.011 Aa	0.194±0.020 Ad	0.660±0.016 Ab
	BORDE	0.596±0.017 Bc	0.352±0.020 Aa	0.355±0.015 ACa	0.132±0.008 BEd	0.640±0.029 ADb
	INTER	0.552±0.014 Ac	0.351±0.013 Aa	0.340±0.016 ACa	0.120±0.008 CEd	0.640±0.018 BDb
	CENTRO		0.298±0.019 Bd	0.332±0.022 BCa	0.101±0.007 DEe	0.583±0.017 Cb
SUBHUMEDO						
	SELVA	0.632±0.017 Ac	0.370±0.019 Ad	0.414±0.014 Aa	0.197±0.013 Ae	0.691±0.020 Ab
	BORDE	0.552±0.020 Bc	0.342±0.020 Bd	0.388±0.005 Ba	0.150±0.014 Be	0.648±0.026 Bb
	INTER	0.587±0.022 Cc	0.246±0.012 Cd	0.356±0.019 Ca	0.083±0.031 Ce	0.629±0.021 BDb
	CENTRO	0.575±0.024 Cc	0.242±0.010 Cd	0.275±0.038 Da	0.071±0.011 Ce	0.616±0.024 CDb
SECO						
	SELVA	0.573±0.025 Ac	0.198±0.040 Aad	0.192±0.012 Aa	0.212±0.012 Aae	0.640±0.022 Ab
	BORDE	0.589±0.025 Ac	0.263±0.018 Bd	0.171±0.020 Ba	0.164±0.014 Ba	0.627±0.010 Ab
	INTER	0.528±0.008 Bc	0.269±0.018 Bd	0.195±0.009 Aa	0.117±0.005 Ce	0.604±0.011 Bb
	CENTRO	0.524±0.012 Cc	0.235±0.021 Cd	0.198±0.013 Aa	0.082±0.009 De	0.599±0.019 Cb

Mayúsculas: difieren significativamente entre parcelas del mismo año.
Minúsculas: difieren significativamente a lo largo del tiempo para el mismo tipo de parcela

DISCUSIÓN

Aunque el número de especie registrados en este estudio es alto en comparación con otros estudios de la selva baja inundable (Cortés, 2000; Olmsted y Durán, 1986; Díaz Gallegos, 2002) esta selva es relativamente pobre en especies de plantas en comparación con otros tipos de selva en la región (Martínez y Galindo, 2002, Palacio *et al.*, 2002) con excepción de las selvas caducifolias y subcaducifolias (González *et al.*, 2002; White y Hood, 2004).

Las comunidades de SBI estudiadas presentaron especies características de este tipo de vegetación (Lundell, 1934, Miranda y Hernández, 1963, Orozco y Lot, 1976; Rico-Gray, 1982; Lot, 1983; Olmsted y Durán, 1986) tales como *Haematoxylum campechianum*, *Cameraria latifolia*, *Sebastiana adenophora*, *Bucida buceras*, *Byrsonima bucidaefolia*, *Eugenia winzerlingii* y *Myrcianthes fragans*. De estas especies, *H. campechianum*, *C. latifolia*, *C. nitens*, *E. winzerlingii*, *B. buceras* y *M. fragans* fueron los de mayor valor de importancia encontradas en el presente estudio. Otras especies que tuvieron altos valores de importancia fueron: *Coccoloba cozumelensis*, *Diospyros anisandra*, *Metopium brownei*, y *Manilkara zapota*. Todas estas especies fueron también registradas por Martínez y Galindo (2002) y por Díaz-Gallegos (2002) como las especies más importantes en la SBI.

Las parcelas de Selva baja inundable de los tres ambientes comparten 17 especies, entre las cuales están *Acacia gaumeri*, *Bucida buceras*, *Coccoloba cozumelensis* y *C. diversifolia*, *Croton nitens*, *Erythroxylum rotundifolium*, *Eugenia winzerlingii*, *Haematoxylum campechianum*, *Metopium brownei* y *Myrcianthes fragans*. Si consideramos las especies que se encontraron en las dos comunidades (SBI y selva circundante), pero que son comunes en las zonas bajas inundables, las especies compartidas representa más del 70% de todas las registradas en cada sitio, por lo que la composición de la SBI es similar en los tres ambientes.

En el ambiente Húmedo hay siete especies compartidas entre la selva circundante y la SBI (Borde, Intermedio y Centro), ocho en el Subhúmedo y 11 en el ambiente Seco; entre estas especies están *Calophyllum brazilienze*, *Coccoloba diversifolia*, *Croton nitens*, *Hippocratea excelsa*, *Krugiodendron ferreum*, *Manilkara zapota* y *Swietenia macrophylla*, las cuales aparentemente se adaptan a ambas condiciones.

La composición florística en los tres ambientes es muy variable, pero en general, en el presente trabajo, los sitios estudiados presentaron mayor composición de especies que otros

estudios realizados en Selva baja inundable (Olmsted y Durán, 1986; Cortés, 2000; Díaz-Gallegos, 2002; Palacio et al., 2002; Martínez y Galindo, 2002).

La alta densidad de árboles obtenida en la SBI confirma que esta es una característica importante de este tipo de selva (Palacio et al., 2002), esta mayor densidad se manifiesta en más árboles con pequeños diámetros. Es de resaltar que las condiciones al interior de la SBI del ambiente Húmedo son similares al Subhúmedo en cuanto a la distribución de los individuos y su disposición, caso contrario con el ambiente Seco, que aunque presentaron similitud en especies, la disposición, aperturas, altura de los individuos y lo abierto del sotobosque son diferentes.

Por otra parte, los valores de diversidad encontrados en la SBI en el presente estudio se pueden considerar altos (2.67 - 3.14) en comparación a otras selvas medianas como las estudiadas por White y Hood (2004), y menores a otras selvas bajas como las reportadas por Trejo y Dirzo (2002) y González-Iturbe et al. (2002). Asimismo, presentan valores similares a selvas bajas subperennifolias del sur de la Península de Yucatán como la reportada por Díaz-Gallegos et al. (2002) con valor de diversidad de 3.1 en la selva baja subperennifolia de el ejido La Guadalupe, en Calakmul, Camp, y la de González-Iturbe et al. (en prep) quienes encontraron valores similares en parcelas de SBI en los ejidos de Morocoy (2.61), Nachí Cocom (3.10) y González Ortega (3.28) en Quintana Roo.

En las parcelas de selva circundante los valores de diversidad fueron menores a los de SBI, esto podría deberse en parte a que los tamaños de parcelas muestreadas no fueron los adecuados para registrar la diversidad de la selva, puesto que en ella los individuos son más grandes y con mayor cobertura, lo que requiere una mayor superficie de muestreo. Pese a lo anterior, los valores obtenidos en las parcelas de selva están por arriba de los reportados por White y Hood (2004) para sitios de selvas caducifolias, subcaducifolias y subperennifolia (entre 1.76 a 2.25).

La transición de la selva mediana hacia la Selva baja inundable está formado por las parcelas de borde, en ellas se esperaba que se diera una mezcla de especies de ambos tipos de vegetación; sin embargo, en los ambientes Húmedo y Seco se presentaron valores bajos de diversidad confirmando su condición de ecotono con fluctuaciones ambientales fuertes, el primero a pesar de contar con una mayor densidad de individuos pero con dominancia de unas cuantas especies, y el segundo ya que presentó señales de haber sido una pequeña aguada en

el pasado, con presencia de pocos individuos de *Haematoxylum campechianum* de tamaños considerables. En el sitio Subhúmedo el borde registró un mayor valor de diversidad presentando una mezcla de especies de ambos tipos de vegetación, y comportándose como una zona correspondiente a un ecoclina, en donde se presenta una zona de transición relativamente heterogénea pero ambientalmente más estable.

Hernández y Ponce (2004) señalan que la diversidad de plantas del paisaje depende en gran medida de la diversidad contenida en la clase más madura del bosque; si asumimos esto, la parcela de Selva baja inundable más madura para los sitios estudiados correspondería a la parcela Intermedia en los ambientes Húmedo y Seco, y la de Centro para el sitio subhúmedo, aunque esto hay que tomarlo con reservas ya que la densidad de individuos en las parcelas de centro fue menor y los espacios abiertos fue mayor, lo que la hace ver como una comunidad madura, con árboles de fustes más desarrollados.

Los sitios de borde tienen algunas especies características; *Bucida buceras*, reportada como especie dominante del "bajo de pukté" (Olmsted y Durán, 1986, Martínez y Galindo, 2002), fue encontrada entre las especies con mayor valor de importancia en el Borde de los tres ambientes. En las parcelas de Borde se pudo observar, aunque no se midió, que presentaron condiciones de suelo y topográficas diferentes a las parcelas de SBI, lo que explica la presencia de *Bucida buceras* en un sitio de transición entre la SBI y la selva circundante, además de que presentaron individuos con mayor altura que los registrados en la SBI.

Otras especies de tallas mayores encontradas en los sitios de borde son *Byrsonima bucidaefolia*, *C. diversifolia* y *C. spicata*, *Erythroxylum rotundifolium*, *H. campechianum*, *Croton nitens*, *Hyperbaena winzerlingii*, *Manilkara zapota*, *Metopium brownei* y *Swietenia macrophylla*, esta última reportada por Miranda (1958) como una especie que se encuentra en la zona de transición entre la SBI y la SMSP.

El resultado de la ordenación MDS muestra que las parcelas de Borde no son intermedios entre la selva circundante y la SBI sino que se acercan más a las parcelas de Selva baja inundable, siendo más claro este comportamiento en los ambientes Subhúmedo y Seco; esto se relaciona bien con las especies encontradas, caracterizándose como sitios que comparte mayor número de especies con la SBI y poca afinidad de especies con la selva circundante.

En los ambientes Seco y Húmedo las parcelas Intermedias y Centro comparten muchas especies y abundancias y se mezclan entre si, no permitiendo observar diferencias que comprueben el gradiente al interior de la Selva baja inundable. Con respecto a las parcelas de Selva, estas se ven claramente separadas entre sí, siendo mayor la diferencia entre las parcelas de Selva de los ambientes Húmedo y Subhúmedo con la parcela del ambiente Seco, lo que confirma las diferencias en tipos de selva circundante a los tres ambientes.

El resultado de la ordenación ayuda a caracterizar el tipo de gradiente de vegetación del centro de la Selva baja inundable hacia la selva circundante. El Borde presenta características que nos permiten señalar su condición de zona de transición de ecotono en los ambientes Húmedo y seco, y de ecoclina en el Subhúmedo, basándonos en los resultados de riqueza, densidad y diversidad obtenidos en el presente estudio.

ANÁLISIS ESPECTRAL.

La clasificación supervisada permitió delimitar bastante bien la SBI de los tres ambientes estudiados. Esta clasificación permitió identificar en los tres ambientes dos respuestas espectrales diferentes que corresponden a SBI, además de una mezcla de pixeles entre las clases identificadas.

Este comportamiento en la respuesta espectral está asociado a los resultados del trabajo de estructura obtenidos, en donde se observó una diferencia en composición de especies registradas en las parcelas de Selva baja inundable, ya que en las Intermedias se presentaron un mayor número de especies que en las de Borde y de Centro y se registraron valores de diversidad ligeramente mayores que en las de Centro; sin embargo, los datos de densidad y área basal, indican un mayor desarrollo estructural de las parcelas de Centro (Cuadro 9).

Aunque la clasificación muestra dos tipos de SBI en cada uno de los ambientes, el NDVI muestra un gradiente del Borde hacia el Centro que no coincide claramente con los tipos clasificados. Los valores de vigor de la vegetación de la imagen del 2003, sugieren que para los tres sitios existe un gradiente en la respuesta del NDVI que va de valores más bajos al interior de la SBI a valores intermedios hacia el borde y mayores hacia la selva. El ambiente Seco es el que mejor representa este comportamiento a lo largo del transecto ya que se observa claramente el gradiente en el valor del NDVI (Cuadro 9).

Los resultados indican diferencias al interior de la SBI con respuestas diferenciales de acuerdo a las condiciones propias de cada parcela a lo largo del transecto, relacionado con el hecho de que se ha observado que existe una pendiente que permite diferencias de inundación desde el Centro hacia el Borde de la SBI, lo que incide en la respuesta fenológica de las especies y en la composición y estructura de las mismas a lo largo del gradiente.

Análisis temporal: En la temporada de secas la SBI, incluido el Borde, del ambiente Húmedo se delimita mejor con respecto a la selva mediana que en otras épocas, debido a que durante esta temporada los árboles de la SBI tiran más del 60% de sus hojas (Cuadro 9). En las temporadas de lluvias y nortes el valor del vigor del Borde de la SBI es similar al de la Selva circundante lo que hace que la identificación del límite entre las comunidades sea difícil de establecer.

Para el sitio Subhúmedo, en la temporada de secas podemos diferenciar el comportamiento espectral de la SBI y la selva mediana subperennifolia circundante, y también dentro de la Selva baja inundable, ya que existen diferencias significativas a lo largo de todo el transecto. En lluvias y nortes se puede identificar la diferencia entre la SBI, incluyendo al Borde, y la selva de alrededor, pero no se distinguen zonas al interior del parche de SBI.

Geomorfológicamente este sitio se encuentra en el límite entre una meseta nivelada y una de desarrollo cárstico fluvial (García-Gil y Padilla, 2000), lo que causa diferencias muy pequeñas en altura entre la selva circundante y la SBI, y por ende una confusión entre las dos. Los otros dos ambientes se encuentran en un valle cárstico acumulativo temporalmente inundado con diferencias más grandes a nivel de suelo.

En el ambiente Seco, en la temporada de secas, se puede observar el parche de SBI bien delimitado con respecto a la selva mediana subcaducifolia de alrededor. Por el contrario, durante lluvias y nortes el valor del NDVI de la parcela de Selva es similar a la de Borde de la SBI lo que lleva a confundir a las dos parcelas al momento de la interpretación. Los valores del vigor de la vegetación obtenidos son menores en la temporada de secas debido a la comportamiento caducifolio de las especies, lo que acentúa la importancia de la fenología de las especies de SBI para su adecuada interpretación.

Con los resultados del NDVI obtenido, podemos señalar que las imágenes pertenecientes a las fechas de secas y lluvias (mayo y octubre) nos permitirían hacer un mejor trabajo de

clasificación de la SBI aunque en octubre el Borde puede tener respuestas espectrales cercanas a la de la selva circundante, causando una subestimación de la superficie de SBI (Cuadro 9). En el análisis de los sitios para cada una de las tres temporadas, se observa que si hay diferencias en el valor de NDVI para secas, lluvias y nortes. Este comportamiento está relacionado con la cobertura del dosel, suelo e inundación registrados en los tres sitios.

La cobertura del dosel observado en campo a lo largo de las temporadas tiene relación directa con la fenología (caída de hojas) de las especies y ésta a su vez con el comportamiento de la respuesta del NDVI (Hoare y Frost, 2004, Feeley, et al. 2005); en la SBI encontramos entonces un aumento en caída de hojas durante la temporada de secas y su recuperación conforme transcurre la temporada de lluvias, mientras que en la selva circundante la caducifoliedad es menor y más constante a lo largo del año, con excepción del ambiente Seco, donde la selva es subcaducifolia.

Aunque en la época de secas la presencia de especies herbáceas, como Cladium jamaicense característica del estrato herbáceo de la Selva baja inundable, cobra importancia, la respuesta del NDVI no se ve influenciada. De igual manera, la inundación en si no influye en la respuesta espectral del NDVI ya que los valores obtenidos están por arriba de cero, lo que indica que se refleja el vigor de la vegetación y no el agua de la superficie, apoyado además en el hecho de que la cobertura del dosel es alta en estas temporadas y no permite que la reflectancia de la superficie sea captada.

Sin embargo, la inundación cobra importancia en la composición de especies en la Selva baja inundable y en la determinación de los límites que ocupa el parche de SBI, ya que se pudo observar que en las parcelas al interior de la SBI la inundación tuvo un patrón en el cual sobresalían mogotes de suelo con herbáceas (microrelieve tipo gilgai) rodeado por agua y en donde las especies presentes eran similares.

En el ambiente Seco no hubo agua por encima del suelo durante todo el año, aún y cuando la parcela de borde presentó características propias de un tipo de aguada. Esta situación coincide con lo señalado por Martínez y Galindo (2002) en el sentido de la tendencia en la disminución de la precipitación que sugiere que la región está sufriendo un proceso gradual de aridez, aunque con las evidencias encontradas en el presente trabajo es difícil asegurar este evento ya que se tendría que tener registros históricos más completos de tal manera que se pueda describir este proceso.

Cuadro 9. Resumen comparativo de los tres sitios estudiados y sus parcelas respectivas. Se presentan los datos de estructura y composición, clasificación espectral y valores de NDVI en las tres temporadas de muestreo para cada parcela estudiada.

SITIO	PARCELA	SPP	DEN	AREA BASAL	DIV.	CLASE ESP.	COB. DOSEL (%PROM)			NDVI (VALOR PROM)		
		No.	Ind/Ha	$cm^2/500m^2$	H'	Cla. Sup.	SEC	LLUV	NOR	SEC	LLUV	NOR
HUMEDO	SELVA	27	2720	18736.52	2.536	SAP	68.13	78.75	85.63	0.194	0.660	0.551
	BORDE	28	6550	20987.31	1.761	SBI2	65.63	72.50	81.88	0.132	0.640	0.596
	INTER	39	3720	11811.97	3.138	SBI	37.50	60.31	64.38	0.120	0.640	0.552
	CENTRO	27	5080	11759.50	2.810	SBI	38.13	50.31	55.00	0.101	0.583	
SUBHU-MEDO	SELVA	32	2360	15555.42	3.046	SMSP	68.44	83.75	83.75	0.197	0.691	0.632
	BORDE	39	5140	12575.01	2.551	SBI2	35.94	80.00	80.00	0.150	0.648	0.552
	INTER	34	5380	11844.75	2.668	SBI	23.75	63.75	66.88	0.083	0.629	0.587
	CENTRO	30	5720	13595.29	2.865	SBI	20.63	58.13	57.81	0.071	0.616	0.575
SECO	SELVA	28	2200	11877.06	2.733	SMSC	11.88	74.38	66.67	0.212	0.640	0.573
	BORDE	14	2200	8123.62	1.737	SMSC	31.75	53.75	51.25	0.164	0.627	0.589
	INTER	32	4140	15599.72	3.091	SBI2	19.06	55.63	69.38	0.117	0.604	0.528
	CENTRO	29	3200	11916.97	3.042	SBI	25.56	52.81	63.13	0.082	0.599	0.524

CONCLUSIONES

El resultado de la clasificación espectral permitió identificar con bastante exactitud la Selva baja inundable pero no fue óptima para identificar la zona límite entre la SBI y la selva circundante, la clasificación obtenida tiene relación con los resultados de estructura y composición de la vegetación medidos en el presente trabajo, tanto en los datos de composición como de densidad, área basal y diversidad registrados.

Los valores de NDVI muestran un gradiente de menor a mayor desde el interior de la SBI hacia la selva circundante. La respuesta del NDVI varió a lo largo del año, presentando valores de NDVI menores en la época de secas y aumentando su valor de respuesta hacia la temporada de lluvias. Este comportamiento estuvo en relación directa con la cobertura del dosel a lo largo de las temporadas; las diferencias observadas se deben al comportamiento fenológico de las especies debida a las condiciones climáticas, no teniendo influencia la composición de la comunidad.

La inundación tiene influencia en la estructura y composición de la comunidad pero no sobre la reflectancia de las imágenes; permite el establecimiento de especies adaptadas a inundación y que son características de la SBI, pero no influye en la respuesta en los valores del NDVI.

El estudio se enfocó en el comportamiento estacional de las especies vegetales que componen este tipo de selva, los resultados obtenidos nos permiten realizar una identificación más precisa de este tipo de vegetación. El presente trabajo nos permite recomendar la utilización de imágenes de épocas de secas y la valoración del vigor de la vegetación mediante el NDVI para mejorar la interpretación de las imágenes de satélite y así hacer una evaluación más cercana a la realidad del estado de conservación y la extensión actual de la Selva baja inundable en el sur de la península.

LITERATURA CITADA.

Agrawal, S., P. Joshi y P. Roy. 2003. Spot-Vegetation multi temporal data for classifying vegetation in South Central Asia. Communicated to Current Science Journal, 2003. Indian Institute of Remote Sensing.

Barrera, M.A., A. Barrera y R.M. López. 1976. Nomenclatura Etnobotánica Maya. Colección Científica, Instituto Nacional de Antropología e Historia. México, D.F. 536 pp.

Begon, M., J. Harper y C. Townsend. 1989. Ecology: Individuals, Populations and Communities. Sinauer, E.E.U.U.

Brondizio, E.,E. Morán, P. Mausel y Y. Wu. 1996. Land cover in the amazon estuary: Linking of the thematic mapper with botanical and historical data. Photogrametry, Engineering and Remote Sensing, 62 (8):921-929

Brower, J. E. y J.H. Zar. 1977. Field and Laboratory Methods for General Ecology. WMC Brown Company Pub. Iowa, E.U.A. 237 pp.

Clarke, K.R. y R.M. Warwick. 2001. Change in Marine Communities: An approach to statistical analysis and interpretation. 2a ed. Primer-E Ltd, Plymouth.

Clarke, K.R. y R.N. Gorley. 2002. Primer-E Ltd 5 v.5.2.9. User manual: Plymouth Routines in Multivariate Ecological Research. Plymouth Marine Laboratory, Plymouth, UK..

Cortés, J.C. 2000. Selvas Tropicales en el Sureste de México: ¿Como los Factores Ambientales Influyen en la Distribución de las Especies Vegetales. Tesis de Maestría. El Colegio de la Frontera Sur, Chetumal, Q. Roo. 22 pp.

Cortés, J. y G. Islebe. 2005. Influencia de factores ambientales en la distribución de especies arbóreas en las selvas del sureste de México. Rev. Biol. Trop., 53 (1-2) 115-133.

Chuvieco, E. 1990. Fundamentos de Teledeteccion Espacial. Ediciones Rialp, Madrid, 450pp.

Daniel, W. 1987. Bioestadística. 3a. edición. Editorial Limusa. México, D.F. 667 pp.

Díaz-Gallegos., J. 2000. Uso del Suelo y Transformación de Selvas en un Ejido de la Reserva de la Biosfera Calakmul, Campeche, México. Tesis de Maestría. El colegio de la Frontera Sur, Q. Roo, Mex. 57 pp.

Díaz-Gallegos, J., O. Castillo y G. García-Gil. 2002. Distribución espacial y estructura arbórea de la selva baja subperennifolia en un ejido de la reserva de la Biosfera Calakmul, Campeche, México. Universidad y Ciencia, 18 (35): 11-28.

Duch, G. 1989. Los Bajos Inundables (ak'alche') de la Península de Yucatán. Universidad Autónoma de Chapingo, México.

Durán, R. 1987. Descripción y análisis de la estructura y composición de la vegetación de los petenes del noroeste de Campeche, Mex. Biótica, 12 (3): 181-198.

Eastman, R. 2003. IDRISI Kilimanjaro: Guide to GIS and Image Processing. Clark University, E.U.A. 306 pp.

Feeley, K.J., T. Gillespie y J. Terborgh. 2005. The utility of spectral indices from landsat ETM+ for measuring the structure and composition of tropical dry forests. Biotrópica, 37 (4): 508-519.

Ferrusquía-Villafranca, I. 1993. Geology of México: A synopsis. En: Biological Diversity of Mexico: Origins and Distribution. T.P. Ramamoorthy, R. Bye, A. Lot y J. Fa (Eds.). Oxford University Press, Oxford. pp. 3-108.

Fortin, M.J., R. Olson, S. Ferson, L. Iverson, C. Hunsaker, G. Edwards, d. Levine, K. Butera y V. Klemas. 2000. Issues related to the detection of boundaries. Landscape Ecology, 15: 453-466.

García-Gil, G. y J. Padilla, 2000. Geomorfología del Estado de Quintana Roo. Carta Preliminar, ECOSUR, Q. Roo, México.

García-Gil, G., I. March y M. Castillo. 2001. Transformación de la vegetación de la reserva de la Biosfera de Calakmul, Campeche. Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM, 46: 45-57.

Gilabert, M.A., J. González-Piqueras y J. García-Haro. 1997. Acerca de los índices de vegetación. Revista de Teledetección, 8: 35-45.

González, J.A., I. Olmsted y F. Tun-Dzul. 2002. Tropical dry forest recovery after long term henequen (sisal, Agave furcroydes Lem.) plantation in northern Yucatan, Mexico. Journal of Forest Ecology and Management. 167: 67-82.

González, J.A. 2004. Estudio de la Selva Baja Caducifolia y Vegetación Secundaria Derivada en la Zona Henequenera del Noroeste de Yucatán por Medio de Percepción Remota y Sistemas de Información Geográfica. Tesis Doctoral. Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C. 103 pp.

Hernández, J.L. y R. Ponce. 2004. Mapping the spatial distribution of plant diversity indices in a tropical forest using multi-spectral satellite image classification and field measurements. Biodiversity and Conservation, 13: 2599-2621.

Hoare, D. y P. Frost. 2004. Phenological description of natural vegetation in southern África using remotely-sensed vegetation data. Applied Vegetation Science, 7: 19-28.

Hori, M. 1998. Variabilidad de las Respuestas Espectrales de Acuerdo a los Cambios Fenológicos de la Vegetación del Anticlinorio de Arteaga, Coahuila y Nuevo león, México. Tesis de maestría, ITES campus Monterrey, Nuevo León, Mex. 138 pp.

INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática) 1984. Carta Edafológica , Chetumal E-16-4-7, escala 1:250,000. 1ª. Ed. México, D.F.

Klepeis, P. y B.L. turner II. 2001. Integrated land history and global change science: The example of the southern Yucatán Peninsular region project. Land Use Policy, 27-39.

Lawrence, d., H. Vester, D. Pérez-Salicrup, J. Eastman, B. L. Turner II y J. Geoghegan 2004. Integrated analysis of ecosystem interactions with land-use change: The southern Yucatán Peninsular region. Geophysical Monograph Series 153: 277-292.

Lot, A. 1983. La vegetación acuática del sureste de México. Ciencia y Desarrollo 53: 115-117.

Lugo, J. y M. García. 1999. Geomorfología. In: García de Fuentes, A., J. Córdoba y P. Chico Ponce de León (Eds.) Atlas de Procesos Territoriales de Yucatán. Universidad Autónoma de Yucatán. Mérida. 155-162.

Lundell, C. 1934. Preliminary sketch of the phytogeography of the Yucatan Peninsula. Carn. Inst. Wash. Publ. 436: 257-321.

Macario, P., S. Torres y E. Cabrera. 1998. Estructura y composición de una comunidad con *Pinus caribaea* var. *hondurensis* (Sénecl.) Barr. y Golf., en el Estado de Quintana Roo, Méx. Caribbean Journal of Science, 34 (1-2): 50-57.

Magurran, A.E. 1989. Diversidad Ecológica y su Medición. Ed. Vera, Barcelona, España. 200pp.

Martínez, E. y C. Galindo. 2002. La vegetación de Calakmul, Campeche, México: Clasificación, descripción y distribución. Bol. Soc. Bot. Mex. 71: 7-32.

Miranda, F. 1958. Estudios acerca de la vegetación. In: Beltrán, E. (editor). Los Recursos Naturales del Sureste y su Aprovechamiento. Tomo II. Instituto Mexicano de Recursos Naturales no Renovables, México D. F. pp 215-271.

Miranda, F. y E. Hernández. 1963. Los tipos de vegetación de México y su clasificación. Boletín de la Sociedad Botánica de México 28:29-179.

Mueller-Dombois, D. y Ellenberg, H. 1974. Aims and Methods of Vegetation Ecology. John Wiley y Sons. Nueva York, E.E.U.U.. 547 pp.

Olmsted, I. y R. Durán. 1986. Aspectos ecológicos de la selva baja inundable de la Reserva de Sian Ka'an, Quintana Roo, México. Biótica, 11(3):151-179.

Olmsted, I., J. A. González-Iturbe, R. Durán, J. Granados y F. Tun. 1999. Vegetación. In: García de Fuentes, A., J. Córdoba y P. Chico Ponce de León (Eds.) Atlas de Procesos Territoriales de Yucatán. Universidad Autónoma de Yucatán. Mérida. 184-194.

Orellana, R., M. Balam, I. Bañuelos, E. García, J. González-Iturbe, F. Herrera y J. vidal. 1999. Evaluación Climática. In: García de Fuentes, A., J. Córdoba y P. Chico Ponce

de León (Eds.) Atlas de Procesos Territoriales de Yucatán. Universidad Autónoma de Yucatán. Mérida. 163-182.

Orozco, A.S. y A. Lot. 1976. La vegetación de las zonas inundables del sureste de Veracruz. Publicaciones del Instituto de Investigaciones sobre Recursos Bióticos 1 (1):1-44.

Palacio, G., R. Noriega y P. Zamora. 2002. Caracterización físico-geográfica del paisaje conocido como "Bajos Inundables". El caso del área natural protegida Balamkín, Camp. Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM. 49:57-73.

Rico-Gray, V. 1982. Estudio de la vegetación de la zona costera inundable del noroeste de Campeche, México: Los Petenes. Biótica 7(2):171-190.

Rzedowski, J. 1978. Vegetación de México. Editorial. Limusa. México. 432 pp.

Sanchez-Azofeifa, G. A., K. Castro, B. Rivard, M. Kalascka, y R. C. Harris. 2003. Remote sensing priorities in tropical dry forest environments. Biotropica 35:134–142.

Sokal, R. y F. Rohlf. 1995. Biometry: the principles and practice of statistics in biological research. 3ª. Ed. W. H. Freeman and Co.: Nueva York. 887 pp.

Trejo-Torres, J.C. 1993. Vegetación suelo e hidrodinámica de dos Petenes de la Reserva de Dzilam, Yucatán. Tesis profesional. Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad Autónoma de Yucatán. 137 pp.

Tun-Dzul, F. 1996. Producción de Hojarasca, su Aporte Mineral y la Estructura de la Vegetación de dos Petenes del Estado de Campeche. Tesis profesional. Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad Autónoma de Yucatán. 75 pp.

Tun-Dzul, F., J. González-Iturbe y C. Espadas. 2000. Mapa de vegetación Corredor Sian Ka'an-Calakmul. CICY, Yuc., Mex.

Turner, B. L., II. 1986. Mystery of the Maya Revealed. The Agricultural Base of a Tropical Civilization. The American Geographical Society´s Focus 36(2): 1-7.

Turner, B. L., II, R. E. Kasperson, W. B. Meyer, K. M. Dow, D. Golding, J. X. Kasperson, R. C. Mitchell, and S. J. Ratick. 1990. Two Types of Global Environmental Change: Definitional and Spatial Scale Issues in their Human Dimensions. Global Environmental Change 1 (10): 14-22.

Turner II, B. L., S. Cortina Villar, D. Foster, J. Geoghegan, E. Keys, P. Klepeis, D. Lawrence, P. Macario Mendoza, S. Manson, Y. Ogneva-Himmelberger, A. B. Plotkin, D. Pérez Salicrup, R. Roy Chowdhury, B. Savitsky, L. Schneider, B. Schmook, C. Vance. 2001 Deforestation in the Southern Yucatán Peninsular Region: An Integrative Approach, Forest Ecol. Mgt., 154, 343–370..

Turner,W., S. Spector, N. Gardiner, M. Flodeland, E. Sterling, y M. Steininger. 2003. Remote sensing for biodiversity science and conservation. TREE 18: 306–314.

Turner II, B.L., Geohehan, J. and Foster, D.R. 2004. Integrated Land Change Science and tropical deforestation in the Southern Yucatán. Oxford University Press. 320 pp.

Van Der Maarel, E. 1990. Ecotones and ecoclines are different. Journal of Vegetation Science, 1: 135-138.

White, D. y C. Hood, 2004. Vegetation patterns and environmental gradients in tropical dry forests of the northern Yucatan Peninsula. Journal of Vegetation Science 15:151-160.

Anexo III. Articulo enviado para publicación a la revista Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM, como resultado de la investigación realizada en la presente tesis.

VARIABILIDAD TEMPORAL DE LA SUPERFICIE DE SELVA BAJA INUNDABLE: SU ANÁLISIS MEDIANTE PERCEPCIÓN REMOTA

Fernando Jesús Tun-Dzul[1], Hans Vester, Rafael Durán García y Birgit Schmook.

El Colegio de la Frontera Sur, Unidad Chetumal

Av. del Centenario Km. 5.5

Chetumal, Quintana Roo, México. C.P. 77000

Teléfono Conmutador: +52 (01983) 8350440 Fax. (01983) 8350454

Dirección Actual:

Centro de Investigación Científica de Yucatán, A. C.

Unidad de Recursos Naturales

Calle 43 No 130, Colonia Chuburná de Hidalgo

C. P. 97200, Mérida, Yucatán

Teléfonos: (999) 9813914, 9813921, 981 3943

Fax: (999) 9813900

1: Autor de correspondencia. Correo electrónico: fjtun@cicy.mx

VARIABILIDAD TEMPORAL DE LA SUPERFICIE DE SELVA BAJA INUNDABLE: SU ANÁLISIS MEDIANTE PERCEPCIÓN REMOTA

RESUMEN.

Con el objetivo de conocer el comportamiento estacional de la zona de transición entre la Selva baja inundable y la selva circundante, estudiamos la respuesta espectral de la vegetación en un gradiente de humedad en tres temporadas del año y la fenología foliar en el vigor de la vegetación captado en imágenes de satélite. Se utilizaron imágenes Landsat ETM de diferentes fechas para explicar la estacionalidad y el vigor de la vegetación. Se realizó clasificación no supervisada y supervisada; se calculó el NDVI para conocer el comportamiento fenológico; se determinó la composición, fenología e inundación de las comunidades para explicar la variabilidad de las respuestas espectrales de la vegetación sobre transectos ubicados desde la Selva circundante hacia el centro de la SBI. Las parcelas de SBI presentaron mayor riqueza específica y mayor densidad que la selva circundante; los valores de NDVI indican un gradiente que aumenta desde el interior de la SBI hacia la selva circundante. La imagen de época de secas proporcionó una clasificación que se apega más a las características de SBI observadas en campo, en la época de lluvias la respuesta espectral tiende a incorporar el Borde de la SBI a la selva circundante.

Palabras clave: Península de Yucatán, fenología, imágenes Landsat, respuesta espectral, gradiente ambiental, Composición y estructura.

ABSTRACT

In order to know the temporal behaviour of the transition between low inundated forest and the surrounding vegetation, we studied the spectral reflectance of the vegetation on a humidity gradient and through the year, and the phenology by means of the vigor of the vegetation as reflected in the images. We used landsat ETM images of different dates to explain seasonality and changes in vigor in time. Supervised and unsupervised classification of images was done; NDVI was used as a measure for phenology; we determined composition, phenology and inundation in the field to relate to the spectral changes of vegetation in transects from the surrounding forest to the center of the bajo, the bajo plots presented most species richness and are clearly distinguished by higher stem density then the surrounding forest; the NDVI shows an increment of vigor from the Centre of the bajo to the surrounding Forest. The image of the dry season yields a classification which coincides the most with the observation in the field, the interpretation of the wet season tends to include the Transition in the surrounding forest.

Key words: Peninsula of Yucatan, Landsat ETM images, spectral reflectance, environmental gradient, Structure and composition.

INTRODUCCIÓN.

La selva baja inundable (SBI) es un tipo de vegetación característica de la Península de Yucatán. Es conocida como Ak'alche en la terminología maya, proveniente de las palabras akal, pantano, estanque o aguada, y che, árbol o vegetación, refiriéndose a depresiones del terreno

inundadas temporal o permanentemente, más o menos amplias y arboladas (Barrera et al., 1976, Duch, 1989).

Diversos autores han descrito a la Selva baja inundable con diferentes nombres, definiendo como característica particular que la vegetación se desarrolla sobre suelos profundos con escaso drenaje y que predominan especies típicas como el palo de tinte (Haematoxylum campechianum), chechem negro (Metopium brownei), chechem blanco (Cameraria latifolia), pucté (Bucida buceras), "muk" (Dalberghia glabra) y Bucida spinosa (Lundell, 1934; Miranda, 1958; Miranda y Hernández, 1963; Rzedowski, 1978; Orozco y Lot, 1976; Rico-Gray, 1982; Lot, 1983; Olmsted y Durán, 1986; Palacio et al., 2002; Díaz-Gallegos et al., 2002; Cortés e Islebe, 2005).

Es una comunidad vegetal constituida por árboles y arbustos capaces de crecer en terrenos inundados buena parte del año y resistir periodos de extrema sequía durante varios meses; están constituidas por árboles que en su mayoría no sobrepasan los 10 m de altura, presentan troncos sumamente retorcidos y muchos de ellos presentan espinas (Orozco y Lot, 1976; Rico-Gray, 1982; Lot, 1983; Olmsted y Durán, 1986, Martínez y Galindo, 2002).

Las selvas bajas inundables fueron poco aprovechadas para la extracción de madera en el pasado y tampoco fueron convertidas en gran escala a usos agrícolas, ya que su manejo era difícil y poco redituable, con excepción de los tintales, que representaron un importante valor económico ya que durante la época colonial se aprovechó la madera del palo de tinte (Haematoxylum campechianum) como tinte natural. Sin embargo, en fechas recientes, las SBI se han usado con varios fines, tanto para el cultivo de arroz y caña de azúcar, así como para su uso pecuario a través del drenado del agua.

Palacio et al. (2002) analizando estudios sobre la agricultura prehispánica encontraron evidencias de uso agrícola de la Selva baja inundable. Sin embargo, este aprovechamiento agrícola se interrumpió antes de la llegada de los españoles por razones aún no aclaradas, y se ha reactivado de forma intermitente desde la época colonial hasta la actualidad (Turner, II, 1986; Turner, II et al., 1990).

Por otra parte, la mayoría de los estudios ecológicos sobre vegetación se han centrado en caracterizar y entender los procesos ecológicos de regiones homogéneas y se tiende a evitar las áreas heterogéneas entre los ecosistemas (Fortin et al., 2000). Las zonas de transición, en muchos estudios, son ignoradas y a menudo reducidas a líneas en los mapas de vegetación. La detección de límites entre una comunidad vegetal y otra es un tema que se aborda desde el concepto de Ecotono.

Holland (1988, en Fortin et al., 2000) definió el concepto de Ecotono como "una zona de transición entre los sistemas ecológicos adyacentes, con una serie de características dadas por la intensidad de la interacción entre los sistemas ecológicos adyacentes y definidas por una escala de tiempo y espacio". Por otra parte, Van Der Maarel (1990) señala que las zonas de transición se deben definir por los factores ecológicos variables o estables más que por una mezcla en la composición de especies entre dos zonas adyacentes, ya sea de flora o fauna, lo que daría como resultado la presencia de un ecotono o un ecoclina.

En el contexto de los ecosistemas de selva baja inundable, los ecotonos son zonas de transición que sirven de interfase entre las condiciones ambientales típicas de los Ak'alches (terrenos pantanosos, inundados temporalmente y con suelo fuertemente arcilloso), y las condiciones de la selva mediana que les rodea, de formación cársticos en donde domina el suelo leptosol-réndzico, seco, poco profundo y con mayor desarrollo de los árboles.

Trabajos previos sobre clasificación de la vegetación de la Península de Yucatán, particularmente sobre la cobertura de Selva baja inundable en el sur de la península (Olmsted et al., 1999, Tun- Dzul et al., 2000, Inventario Forestal Nacional 2000, Turner II et al., 2001; Lawrence et al., 2004), han reportado diferencias significativas de superficie entre años en este tipo de vegetación.

La idea central es explicar que estas diferencias se deben al comportamiento espectral de esta vegetación bajo diferentes condiciones climáticas, enfocándonos a las diferencias debido al comportamiento caducifolio de las especies presentes en la SBI a lo largo del año debido a condiciones de precipitación, y explicar que la fenología foliar es la que está determinando la respuesta espectral, la cual probablemente está relacionada con el comportamiento de la zona de transición entre una comunidad y otra, como respuesta a los cambios ambientales que se presentan a lo largo del año y a la reflectancia captada por el sensor en una época determinada. El objetivo de este trabajo es dar a conocer el comportamiento de esta zona de transición tanto en el campo como en términos de reflectancia obtenida mediante las imágenes de satélite.

ÁREA DE ESTUDIO

Las Selvas bajas inundables estudiadas se localizan en el sur de la Península de Yucatán, en el área comprendida dentro del proyecto Cambios en el Uso del Suelo en el Sur de la Península de Yucatán, en cooperación interinstitucional entre varias universidades y centros de investigación1 (Land-Cover and Land-Use Change (LCLUC) in The Southern Yucatan Peninsular Region -SYPR) (Turner II, et al., 2004). La SYPR es una unidad de estudio definida al norte y al sur por los límites de la Reserva de la Biosfera de Calakmul y al este y

oeste por la cota de altitud de 100 msnm (Fig. 1) (Klepeis y Turner II, 2001). La región ocupa la altiplanicie cárstica que forma la espina dorsal de la península, formada por grandes depresiones u hondonadas características que se inundan temporalmente.

La precipitación anual presente está en el rango de 900 mm en el norte-noroeste a 1400 mm en el sur (Lawrence et al.,2004). El área comprende parte del municipio de Othón P. Blanco, Q. Roo y el municipio de Calakmul, Campeche; se encuentra entre la latitud 17^0 50' y 19^0 10' N y longitud 88^0 50' y 90^0 15' W (Fig. 1).

Los suelos sobre los cuales se desarrolla la Selva baja inundable corresponde al tipo gleysol (INEGI, 1984). El terreno presenta una topografía plana, con un microrelieve tipo gilgai, formado por pequeños montículos causados por el repetido secar y humedecer de las arcillas (Macario et al.,1998).

Desde el punto de vista geomorfológico y fisiográfico, el área abarca zonas de planicies con lomeríos y planicies altas con lomeríos suaves (Lugo y García, 1999). La geología superficial está constituida por cuerpos de caliza, dolomita y evaporitas, dispuestos horizontalmente, indicando sedimentación calcárea marina del Cretácico al Cenozoico, que revela la emergencia gradual de la plataforma con dirección Sur-Norte durante el Cenozoico (Ferrusquía-Villafranca, 1993).

El clima es Ax'(w_1) (i_1)gw'', cálido subhúmedo, con temperatura media del mes más frío mayor de 18^0 C, con un régimen de lluvias de verano- intermedio y un alto porcentaje de lluvia invernal y presencia de sequía intraestival, con poca oscilación térmica (Orellana et al., 1999). La temperatura promedio mensual es superior a los 21^0 C y las oscilaciones térmicas anuales no son mayores a los 6^0 C.

MATERIALES Y MÉTODOS

Este trabajo se abordó desde dos enfoques complementarios. Por una parte, se realizó la descripción de la estructura y composición de la vegetación y el comportamiento temporal de las coberturas de dosel, suelo e inundación; por otra, y para explicar la variabilidad en superficie reportada de SBI en trabajos previos, se evaluó el comportamiento espectral de este tipo de selva utilizando la respuesta del vigor de la vegetación y como parámetro de medida los resultados del NDVI. Se seleccionaron tres comunidades de SBI en la región correspondientes a tres ambientes contrastantes en cuanto al tipo de vegetación circundante y el régimen de precipitación de la región: Húmedo, al sur de la región e inmerso en una mezcla de Selva mediana subperennifolia y alta perennifolia; Subhúmedo, en el centro, con Selva mediana subperennifolia a su alrededor, y Seco, al oeste y bordeado por una Selva mediana subcaducifolia.

Para el muestreo de vegetación en campo se definió un transecto sobre el gradiente de tierra alta al centro de cada uno de las comunidades de SBI seleccionadas, de manera que se registraran las diferencias en composición de especies a lo largo de la pendiente. En cada transecto se establecieron cuatro parcelas de muestreo de 500m^2 cada una, tres de ellas correspondientes al gradiente dentro de la SBI, desde el centro hasta su borde, y una más en la selva con la que limita.

A las parcelas se les denominó como Selva, Borde, Intermedio y Centro, tomando como base la pendiente desde la selva circundante hacia el centro de la SBI. El esquema de muestreo corresponde a un diseño de dos vías anidado fijo, en donde se tienen tres ambientes (fijos) con cuatro parcelas (fijas) cada uno y ocho subparcelas como unidades de frecuencia. Estas mismas parcelas sirvieron para obtener los datos de observación para cobertura del dosel (fenología) y suelo, así como para el nivel de inundación a lo largo del año.

Descripción de la vegetación. Para describir la vegetación y determinar las diferencias en composición de especies entre la vegetación de SBI y la de la selva circundante, así como observar las diferencias entre distintas épocas del año, se obtuvieron los valores de densidad, de diversidad mediante el índice de Shannon-Wienner (Magurran, 1989) y la ordenación de la vegetación mediante la prueba MDS (Multi-Dimensional Scaling, Kruskal, 1964, in Clarke y Warwick, 2001).

Para determinar si los factores (nivel de inundación, cobertura del suelo y del dosel) están influyendo en la respuesta espectral de la vegetación, se realizaron tres censos en cada uno de los ambientes seleccionados, de acuerdo a las temporadas de secas, lluvias y nortes, con el fin de obtener datos sobre el porcentaje de caducifoliedad del follaje de las especies en la comunidad, el nivel de inundación y la cobertura del suelo en cada ambiente.

Análisis de Imágenes. Las imágenes de satélites Landsat son las que se han utilizado con mayor frecuencia para la clasificación y generación de mapas de vegetación, tanto a nivel local como regional, debido al nivel de detalle que ofrecen. Para conocer los tipos de cobertura presentes en cada ambiente seleccionado se clasificó la imagen de satélite (Landsat ETM 2003, west path20/row 47) mediante un enfoque híbrido, el cual consiste en utilizar técnicas de clasificación no supervisada y supervisada (Brondizio et al., 1996, Hori, 1998, González, 2004) mediante una clasificación de máxima verosimilitud.

Análisis del comportamiento fenológico: Para lograr la discriminación de la reflectancia entre el efecto del suelo y la vegetación, se ha desarrollado metodologías en donde el objetivo es crear bandas artificiales, a partir de bandas originales, mediante un cálculo de valores entre dos o más bandas de la misma imagen (Hori, 1998). Una banda artificial de uso frecuente es el llamado Índice de Vegetación de la Diferencia Normalizada (Normalized

Difference Vegetation Index, NDVI) que refleja la respuesta espectral característica de la vegetación sana, con alto contenido de humedad.

Se utiliza una combinación de la banda roja y la del infrarrojo cercano, debido a que mientras los pigmentos de la hoja absorben la mayor parte de la luz que reciben para realizar la función fotosintética en la región visible, en el infrarrojo cercano son bastante transparentes, lo que hace que la vegetación vigorosa presente baja reflectividad en la banda roja del espectro y alta en el infrarrojo cercano (Hori, 1998). Mientras mayor sea el contraste entre ambas bandas, mayor vigor vegetal se expresa en los valores del NDVI.

Las diferencias en las respuestas del vigor de la vegetación a lo largo del transecto, se analizaron estadísticamente utilizando el valor del NDVI de un conjunto de 9 píxeles alrededor de cada parcela de muestreo (Oza, 1996, en Feeley *et al.*, 2005).

Análisis temporal: El análisis temporal se realizó con imágenes Landsat ETM, correspondientes a tres épocas del año. Se hace una comparación entre los promedios de NDVI para nueve pixeles correspondientes a cada parcela con su alrededor, analizando el comportamiento temporal entre estaciones, usando el mes de febrero como representativo para la temporada de nortes (imagen de 5/Feb/1996), mayo para la temporada de secas (imagen de 7/may/2003) y octubre para la temporada de lluvias (imagen de 29/oct/1994).

Análisis Estadístico: Se realizó un Análisis de Varianza (ANOVA) de una vía para determinar si las diferencias en los resultados de densidad y valores de NDVI son estadísticamente significativas. Cuando no se cumplieron los supuestos del ANOVA, se realizó una prueba no paramétrica para determinar si existen diferencias significativas o no. La prueba no paramétrica utilizada fue el ANOVA de rangos de Kruskal-Wallis.

RESULTADOS

Análisis de Vegetación: El ambiente Subhúmedo es el que presenta mayor riqueza de especies en todas las parcelas con excepción de la parcela Intermedia. La riqueza específica registrada por parcelas en los tres ambientes analizados parece ser mayor en las parcelas Intermedias, con excepción del ambiente Subhúmedo, en donde la parcela que registró mayor número de especies es la de Borde. El número de especies encontrado en la parcela Borde del ambiente Seco es bajo comparado a las otras Parcelas de Borde (Tabla 1).

Los valores de densidad más altos corresponden a la Selva baja inundable y los más bajos a los de la selva circundante (Fig. 2); en el ambiente Húmedo la densidad en la parcela Borde fue mayor que en los demás ambientes. El ANOVA indica que existen diferencias significativas entre las parcelas muestreadas ($F_{11,84}$=21.2897, p<0.00001), el análisis sugiere que existen diferencias significativas entre las parcelas de Borde de los tres ambientes. En el ambiente Seco la parcela de Borde se parece a la selva circundante en densidad. En el Subhúmedo, la parcela Selva es diferente a las otras tres parcelas, y en el ambiente Húmedo todas las parcelas son diferentes (Tabla 2).

La diversidad de las parcelas de SBI fue mayor que el de las de Selva en el ambiente Húmedo y en el Seco (Tabla 1). El ambiente Subhúmedo presenta mayor diversidad en la Selva que en las parcelas de SBI. La parcela de Borde del ambiente Subhúmedo tiene mayor diversidad que las otras dos parcelas de Borde.

La ordenación MDS (Fig. 3) muestra la separación de las parcelas de Selva con las de SBI. La relación entre las parcelas de Selva es cercana entre los ambientes Húmedo y Subhúmedo; el ambiente Seco se ubica alejado de los otros dos. Las selvas circundantes claramente están separadas a un lado de las parcelas de SBI; las parcelas de Borde están más cercanas a las de

la SBI, pero con un desplazamiento a la izquierda de una línea entre la SBI y la selva circundante.

La distribución de la vegetación de Selva baja inundable al interior del parche muestra que las parcelas denominadas Borde de los tres ambientes no se mezclan con las parcelas Intermedio y Centro pero si se encuentran cercanas. Las parcelas Intermedio y Centro de los ambientes Subhúmedo y Seco se agrupan y forman un cúmulo en cada ambiente pero no con los otros; las tres parcelas de SBI del ambiente Húmedo no se agrupan entre sí y están más asociadas al ambiente Subhúmedo (Fig. 4).

La cobertura del dosel en el periodo de secas fue inferior a la registrada en lluvias y nortes (Fig. 5). En las tres épocas del año la cobertura vegetal es menor en el centro de la SBI, aumentando conforme se aproxima a la selva circundante. En el ambiente Seco, la parcela de Selva presenta valores bajos de cobertura durante el periodo de secas. La cobertura de suelo en los tres ambientes fue mayor en la SBI que en la selva circundante (Fig. 6), y al interior de la Selva baja inundable ésta aumenta conforme se aleja de la parcela de Selva circundante. La inundación sólo se observó en los ambientes Húmedo y Subhúmedo y durante la temporada de lluvias y nortes (Fig. 7). El suelo se mantuvo completamente seco en la época de secas en los tres ambientes; el mayor porcentaje de suelo inundado se obtuvo en la época de lluvias, disminuyendo durante la temporada de nortes.

Según datos de la Comisión Nacional del Agua (CNA), en la zona de estudio se presenta escasa precipitación la mayor parte de los años, algunos años en cantidades intermedias y pocos con picos de precipitación mayor que el promedio, con un comportamiento constante en la región de Zoh Laguna, desde 1989 hasta el año 2000, en donde la precipitación fue escasa, caracterizándose éste como un periodo seco para esta zona (fig. 8).

Análisis Espectral: El análisis de la imagen del mes de mayo proporcionó un parche claramente identificable de SBI en el ambiente Húmedo (Fig. 9), con diferencias en respuestas espectrales del centro de la SBI hacia la selva alta circundante. En el ambiente Subhúmedo, la Selva baja inundable no presenta una superficie continua pero tiene parches de selva inmersa dentro de la SBI debido a las condiciones topográficas del sitio; se observa parches de dos tipos de SBI (Fig. 10). Por su parte, en el ambiente Seco el análisis muestra un parche claramente identificable de SBI (Fig. 11), con diferencias en respuestas espectrales del centro de la SBI hacia la selva mediana circundante.

Comportamiento Fenológico. El cálculo de los valores del NDVI para el ambiente Húmedo indica un gradiente del vigor de la vegetación desde el interior de la SBI hacia la selva circundante (Fig. 12). Los valores de NDVI para la SBI van del 0.02 hasta 0.16 y los de la selva circundante alcanzan 0.32. En el Subhúmedo no se observa un gradiente del vigor de la vegetación sino que se presenta a manera de parches de SBI, pero si se registran diferencias en vigor entre la SBI y la selva circundante (Fig. 13). Los valores de NDVI para la SBI van del 0.03 hasta 0.09, los de la selva circundante alcanzan valores de 0.28. Para el ambiente Seco (Fig. 14) el cálculo del NDVI señala un gradiente del vigor de la vegetación. Los valores para la SBI van del 0.10 hasta 0.15 y los de la selva circundante alcanzan valores de 0.41.

A pesar de que los valores máximos de NDVI para la Selva baja inundable no parecen mostrar diferencias con los valores mínimos de la selva circundante, el ANOVA no paramétrico ($H_{(11,\ N=108)} = 98.79884$, $p= 0.0000$), sugiere que si existen diferencias significativas en la respuesta del NDVI entre las parcelas de muestreo de los tres ambientes estudiados. La prueba estadística (Tabla 3) sugiere que existen diferencias significativas entre ambientes y entre parcelas del mismo sitio.

El análisis sobre el gradiente del mismo ambiente indica que si existe una respuesta diferencial en el vigor de la vegetación, para esta época en particular (secas), situación claramente identificable en el ambiente Seco (selva mediana subcaducifolia). En el ambiente Subhúmedo se presentan diferencias entre la Selva y el Borde pero no al interior de la SBI, y en el Húmedo solamente las parcelas del Borde y la zona Intermedia son similares.

El análisis estadístico realizado para detectar las diferencias a nivel de temporadas sugiere que se presentaron las mismas tendencias en los tres ambientes. La prueba no paramétrica sugiere que existen diferencias significativas en la respuesta del NDVI a lo largo del tiempo entre las parcelas de muestreo. La prueba Post Hocindica que existen fuertes diferencias significativas entre las diferentes imágenes analizadas (Tabla 4). Se presentaron diferencias significativas en la respuesta del NDVI de las cuatro parcelas en las tres temporadas de análisis para cada ambiente. La respuesta del NDVI es diferente a lo largo del año.

DISCUSIÓN

Como se había mencionado, trabajos previos sobre clasificación de la vegetación de Selva baja inundable reportan diferencias significativas de superficie entre años en este tipo de vegetación (Olmsted et al. 1999, Tun- Dzul et al., 2000, Inventario Forestal Nacional 2000, Turner II et al., 2001; Lawrence et al., 2004), estas diferencias están relacionadas al comportamiento espectral de las especies vegetales presentes y muy estrechamente ligado con su comportamiento fenológico. Para explicar esta variabilidad, se evaluó el comportamiento espectral de este tipo de selva utilizando la respuesta del vigor de la vegetación como parámetro de medida.

Con la clasificación supervisada se pudo identificar en los tres ambientes dos respuestas espectrales diferentes que corresponden a Selva baja inundable, además de una mezcla de

pixeles entre las clases identificadas. Este comportamiento en la respuesta espectral está asociado a los resultados del trabajo de estructura obtenidos, en donde se observó una diferencia en composición de especies registradas en las parcelas de SBI; además los datos de densidad indican un mayor desarrollo estructural de las parcelas de Centro (Tabla 5).

La composición de especies registrada en este estudio es alta en comparación con otros estudios de la selva baja inundable (Cortés, 2005; Olmsted y Durán, 1986; Díaz Gallegos, 2002) pero esta selva es relativamente pobre en especies de plantas en comparación con otros tipos de selvas en la región (Martínez y Galindo, 2002, Palacio et al., 2002) con excepción de las selvas caducifolias y subcaducifolias (González et al., 2002; White y Hood, 2004). La composición florística en los tres ambientes fue diferente, pero los sitios estudiados presentaron mayor riqueza específica, que otros estudios realizados en Selva baja inundable (Olmsted y Durán, 1986; Cortés, 2005; Díaz-Gallegos et a., ,2002; Palacio et al., 2002; Martínez y Galindo-Leal, 2002).

Los valores de diversidad encontrados en la SBI en este estudio se pueden considerar altos si los comparamos a otras selvas medianas como las estudiadas por White y Hood (2004), y menores a otras selvas bajas como las reportadas por Trejo y Dirzo (2002) y González-Iturbe et al. (2002). Asimismo, presentan valores similares a selvas bajas inundables del sur de la Península de Yucatán como la reportada por Díaz-Gallegos et al. (2002), de la selva baja subperennifolia de el ejido La Guadalupe, en Calakmul, Camp, y la de González-Iturbe et al. (en prep) en los ejidos de Morocoy Nachí Cocom y González Ortega en Q. Roo.

En la zona de transición entre la selva circundante y la Selva baja inundable (Borde) se esperaba que se diera una mezcla de especies de ambos tipos de vegetación; este comportamiento si se registró en el sitio Subhúmedo, donde se obtuvo un mayor valor de

diversidad, presentando una mezcla de especies de ambos tipos de vegetación; sin embargo, en los ambientes Húmedo y Seco se presentaron valores bajos de diversidad.

Los valores de vigor de la vegetación detectados a partir de la imagen del 2003, correspondiente a la época de secas, indican que para los tres sitios existe un gradiente en la respuesta del NDVI que va de valores más bajos al interior de la Selva baja inundable a valores intermedios en el borde y mayores hacia la selva circundante. El ambiente Seco es el que mejor representa este comportamiento a lo largo del transecto ya que se observa claramente el gradiente en el valor del NDVI (Tabla 5).

Los resultados indican diferencias al interior de la Selva baja inundable con respuestas diferenciales de acuerdo a las condiciones propias de cada parcela a lo largo del transecto, relacionado con el hecho de que se ha observado que existe una pendiente que permite diferencias de inundación desde el Centro hacia el Borde de la SBI, lo que incide en la respuesta fenológica de las especies y en la composición y estructura de las mismas a lo largo del gradiente.

El resultado de la ordenación MDS (Multi-Dimensional Scaling) confirman estas diferencias, ya que muestra que las parcelas de Borde no se distribuyen de manera intermedia entre la selva circundante y la SBI sino que tienden a presentar mayor acercamiento a las parcelas de Selva baja inundable, siendo más claro este comportamiento en los ambientes Subhúmedo y Seco; esto se relaciona bien con las especies encontradas, caracterizándose como sitios que comparten mayor número de especies con la SBI y poca afinidad de especies con la selva circundante. El resultado de la ordenación ayuda a caracterizar el tipo de gradiente de vegetación del centro de la SBI hacia la selva circundante.

El análisis temporal nos indica que en la temporada de secas la Selva baja inundable, incluido el Borde, del ambiente Húmedo se delimita mejor con respecto a la selva mediana que en otras épocas, debido a que durante esta temporada el dosel de la SBI está 60% más abierto por tirar gran parte de sus hojas (Tabla 5). En las temporadas de lluvias y nortes el valor del vigor del Borde de la SBI es similar al de la Selva circundante lo que hace que la identificación del límite entre ambas comunidades sea difícil de establecer.

Para el sitio Subhúmedo, en la temporada de secas podemos diferenciar el comportamiento espectral de la Selva baja inundable y la selva mediana subperennifolia circundante, y también al interior de la SBI, ya que existen diferencias significativas a lo largo del transecto. En lluvias y nortes se puede identificar la diferencia entre la SBI, incluyendo al Borde, y la selva de alrededor, pero no se distinguen zonas dentro de la SBI.

Geomorfológicamente el sitio Subhúmedo se encuentra en el límite entre una meseta nivelada y una de desarrollo cárstico fluvial (García-Gil y Padilla, 2000), lo que causa diferencias muy pequeñas en altura entre la selva circundante y la Selva baja inundable, y por ende una confusión entre las dos. Los otros dos ambientes se encuentran en un valle cárstico acumulativo temporalmente inundado con diferencias más grandes a nivel de suelo.

En el ambiente Seco, en la temporada de secas, se puede observar la SBI bien delimitada con respecto a la selva mediana subcaducifolia de alrededor. Por el contrario, durante lluvias y nortes el valor del NDVI de la parcela de Selva es similar a la de Borde lo que lleva a confundir a las dos parcelas al momento de la interpretación. Los valores del vigor de la vegetación obtenidos son menores en la temporada de secas debido al comportamiento caducifolio de las especies, lo que acentúa la importancia de la fenología foliar de las especies de SBI para su adecuada interpretación.

La cobertura del dosel observada en campo a lo largo de las temporadas tiene relación directa con la fenología foliar de las especies y ésta a su vez con el comportamiento de la respuesta del NDVI (Hoare y Frost, 2004, Feeley, et al. 2005); en la Selva baja inundable encontramos un aumento en caída de hojas durante la temporada de secas y su recuperación conforme transcurre la temporada de lluvias, mientras que en la selva circundante la caducifoliedad es menor y más constante a lo largo del año, con excepción del ambiente Seco, donde la selva es subcaducifolia.

Aunque en la época de secas la presencia de especies herbáceas, como Cladium jamaicense característica del estrato herbáceo de la Selva baja inundable, cobra importancia, la respuesta del NDVI no se ve influenciada. De igual manera, la inundación en si no influye en la respuesta espectral del NDVI ya que los valores obtenidos están por arriba del valor de uno, lo que indica que se refleja el vigor de la vegetación y no el agua de la superficie, apoyado además en el hecho de que la cobertura del dosel es alta en estas temporadas y no permite que la reflectancia de la superficie sea captada.

Con los resultados del NDVI, se puede señalar que las imágenes pertenecientes a las épocas de secas y lluvias (mayo y octubre) nos permitirían hacer un mejor trabajo de clasificación de la SBI, aunque en octubre el Borde puede tener respuestas espectrales cercanas a la de la selva circundante, causando una subestimación de la Selva baja inundable (Tabla 5).

CONCLUSIONES

La clasificación supervisada de la imagen de secas permitió identificar con bastante exactitud la Selva baja inundable pero no fue óptima para identificar la zona límite entre la Selva baja inundable y la selva circundante. Los valores de NDVI muestran un gradiente de menor a mayor desde el interior de la SBI hacia la selva circundante. La respuesta del NDVI varió a lo

largo del año, siendo menores en la época de secas y aumentando su valor de respuesta hacia la temporada de lluvias. Este comportamiento estuvo en relación directa con la cobertura del dosel a lo largo de las temporadas; las diferencias observadas se deben al comportamiento fenológico de las especies debida a las condiciones climáticas, no teniendo influencia la composición de la comunidad.

La inundación tiene influencia en la estructura y composición de la comunidad pero no sobre la reflectancia de las imágenes; permite el establecimiento de especies adaptadas a inundación y que son características de la SBI, pero no influye en la respuesta en los valores del NDVI.

El estudio se enfocó en el comportamiento estacional de las especies vegetales que componen este tipo de selva, los resultados obtenidos nos permiten realizar una identificación más precisa de este tipo de vegetación. El presente trabajo nos permite recomendar la utilización de imágenes de épocas de secas y la valoración del vigor de la vegetación mediante el NDVI para mejorar la interpretación de las imágenes de satélite y así hacer una evaluación más cercana a la realidad del estado de conservación y la extensión actual de la Selva baja inundable en el sur de la península.

REFERENCIAS.

Brondizio, E.,E. Morán, P. Mausel y Y. Wu. 1996. Land cover in the amazon estuary: Linking of the thematic mapper with botanical and historical data. Photogrametry, Engineering and Remote Sensing, 62 (8):921-929

Clarke, K.R. y Warwick, R.M. 2001. Change in Marine Communities: An approach to statistical analysis and interpretation. 2a ed. Primer-E Ltd, Plymouth.

Cortés, J.C. y G. Islebe. 2005. Influencia de factores ambientales en la distribución de especies arbóreas en las selvas del sureste de México. Rev. Biol. Trop., 53 (1-2) 115-133.

Díaz-Gallegos, J., O. Castillo y G. García-Gil. 2002. Distribución espacial y estructura arbórea de la selva baja subperennifolia en un ejido de la reserva de la Biosfera Calakmul, Campeche, México. Universidad y Ciencia, 18 (35): 11-28.

Duch, G. 1989. Los Bajos Inundables (ak'alche') de la Península de Yucatán. Universidad Autónoma de Chapingo, México.

Feeley, K.J., T. Gillespie y J. Terborgh. 2005. The utility of spectral indices from landsat ETM+ for measuring the structure and composition of tropical dry forests. Biotrópica, 37 (4): 508-519.

Ferrusquía-Villafranca, I. 1993. Geology of México: A synopsis. En: Biological Diversity of Mexico: Origins and Distribution. T.P. Ramamoorthy, R. Bye, A. Lot y J. Fa (Eds.). Oxford University Press, Oxford. pp. 3-108.

Fortin, M.J., R. Olson, S. Ferson, L. Iverson, C. Hunsaker, G. Edwards, d. Levine, K. Butera y V. Klemas. 2000. Issues related to the detection of boundaries. Landscape Ecology, 15: 453-466.

García-Gil, G. y J. Padilla, 2000. Geomorfología del Estado de Quintana Roo. Carta Preliminar, ECOSUR, Q. Roo, México.

González, J.A., I. Olmsted y F. Tun-Dzul. 2002. Tropical dry forest recovery after long term henequen (sisal, Agave furcroydes Lem.) plantation in northern Yucatan, Mexico. Journal of Forest Ecology and Management. 167: 67-82.

González, J.A. 2004. Estudio de la Selva Baja Caducifolia y Vegetación Secundaria Derivada en la Zona Henequenera del Noroeste de Yucatán por Medio de Percepción Remota y Sistemas de Información Geográfica. Tesis Doctoral. Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C. 103 pp.

Hoare, D. y P. frost. 2004. Phenological description of natural vegetation in southern África using remotely-sensed vegetation data. Applied Vegetation Science, 7: 19-28.

Hori, M. 1998. Variabilidad de las Respuestas Espectrales de Acuerdo a los Cambios Fenológicos de la Vegetación del Anticlinorio de Arteaga, Coahuila y Nuevo león, México. Tesis de maestría, ITES campus Monterrey, Nuevo León, Mex. 138 pp.

INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática) 1984. Carta Edafológica , Chetumal E-16-4-7, escala 1:250,000. 1ª. Ed. México, D.F.

Klepeis, P. y B.L. turner II. 2001. Integrated land history and global change science: The example of the southern Yucatán Peninsular region project. Land Use Policy, 27-39.

Lawrence, d., H. Vester, D. Pérez-Salicrup, J. Eastman, B. L. Turner II y J. Geoghegan 2004. Integrated analysis of ecosystem interactions with land-use change: The southern Yucatán Peninsular region. Geophysical Monograph Series 153: 277-292.

Lot, A. 1983. La vegetación acuática del sureste de México. Ciencia y Desarrollo 53:115-117.

Lugo, J. y M. García. 1999. Geomorfología. In: García de Fuentes, A., J. Córdoba y P. Chico Ponce de León (Eds.) Atlas de Procesos Territoriales de Yucatán. Universidad Autónoma de Yucatán. Mérida. 155-162.

Lundell, C. 1934. Preliminary sketch of the phytogeography of the Yucatan Peninsula. Carn. Inst. Wash. Publ. 436: 257-321.

Macario, P., S. Torres y E. Cabrera. 1998. Estructura y composición de una comunidad con Pinus caribaea var. hondurensis (Sénecl.) Barr. y Golf., en el Estado de Quintana Roo, Méx. Caribbean Journal of Science, 34 (1-2): 50-57.

Magurran, A.1989. Diversidad Ecológica y su Medición. Ed. Vera, Barcelona, España. 200pp.

Martínez, E. y C. Galindo. 2002. La vegetación de Calakmul, Campeche, México: Clasificación, descripción y distribución. Bol. Soc. Bot. Mex. 71: 7-32.

Miranda, F. 1958. Estudios acerca de la vegetación. In: Beltrán, E. (editor). Los recursos naturales del sureste y su aprovechamiento. Tomo II. Instituto Mexicano de Recursos Naturales no Renovables, México D. F. pp 215-271.

Miranda, F. y E. Hernández. 1963. Los tipos de vegetación de México y su clasificación. Boletín de la Sociedad Botánica de México 28:29-179.

Olmsted, I. y R. Durán. 1986. Aspectos ecológicos de la selva baja inundable de la Reserva de Sian Ka'an, Quintana Roo, México. Biótica, 11(3):151-179.

Olmsted, I., J.A. González-Iturbe, R. Durán, J. Granados y F. Tun-Dzul. 1999.Vegetación. In: García Fuentes, A. J. Córdova y P. Chico Ponce de León (Eds). Atlas de Procesos Territoriales de Yucatán. Universidad Autónoma de Yucatán, Mérida. pp. 184-194.

Orellana, R., M. Balam, I. Bañuelos, E. García, J. González-Iturbe, F. Herrera y J. vidal. 1999. Evaluación Climática. In: García de Fuentes, A., J. Córdoba y P. Chico Ponce de León

(Eds.) Atlas de Procesos Territoriales de Yucatán. Universidad Autónoma de Yucatán. Mérida. 163-182.

Orozco, A.S. y A. Lot. 1976. La vegetación de las zonas inundables del sureste de Veracruz. Publicaciones del Instituto de Investigaciones sobre Recursos Bióticos 1 (1):1-44.

Palacio, J.L., G. Bocco, A. Velázquez, J.F. Mas, F. Takaki, A. Victoria, L. Luna, G. Gómez, J. López, M. Palma, I. Trejo, A. Peralta, J. Prado, A. Rodríguez, R. Mayorga y F. González. (2000). La condición actual de los recursos forestales en México: Resultados del Inventario Forestal Nacional 2000. Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM, 43: 183-202

Palacio, G., R. Noriega y P. Zamora. 2002. Caracterización físico-geográfica del paisaje conocido como "Bajos Inundables". El caso del área natural protegida Balamkín, Campeche. Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM. 49:57-73.

Rico-Gray, V. 1982. Estudio de la vegetación de la zona costera inundable del noroeste de Campeche, México: Los Petenes. Biótica 7(2):171-190.

Rzedowski, J. 1978. Vegetación de México. Editorial. Limusa. México. 432 pp.

Trejo, I. y R. Dirzo. 2002. Floristic diversity of Mexican seasonally dry tropical forest. Biodiversity and Conservation 11: 2063-2048.

Tun-Dzul, F., J. González-Iturbe y C. Espadas. 2000. Mapa de vegetación Corredor Sian Ka'an-Calakmul. CICY, Yuc., Mex.

Turner, B. L., II. 1986. Mystery of the Maya Revealed. The Agricultural Base of a Tropical Civilization. The American Geographical Society´s Focus 36(2): 1-7.

Turner, B. L., II, R. E. Kasperson, W. B. Meyer, K. M. Dow, D. Golding, J. X. Kasperson, R. C. Mitchell, and S. J. Ratick. 1990. Two Types of Global Environmental Change: Definitional and Spatial Scale Issues in their Human Dimensions. Global Environmental Change 1 (10): 14-22.

Turner II, B.L., Geohehan, J. and Foster, D.R. 2004. Integrated Land Change Sceince and tropical deforestation in the Southern Yucatán. Oxford University Press. 320 pp.

Van Der Maarel, E. 1990. Ecotones and Ecoclines are Different. Journal of Vegetation Science, 1: 135-138.

White, D. y C. Hood, 2004. Vegetation patterns and environmental gradients in tropical dry forests of the northern Yucatan Peninsula. Journal of Vegetation Science 15: 151-160.

ANEXO I. FIGURAS Y CUADROS CON REFERENCIA EN EL TEXTO.

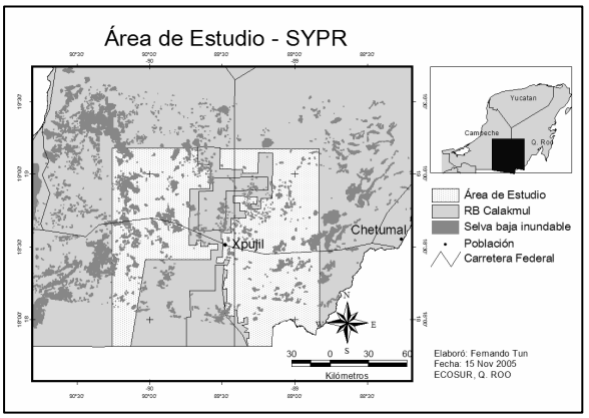

Fig. 1. Área de estudio. Región sur de la Península de Yucatán.

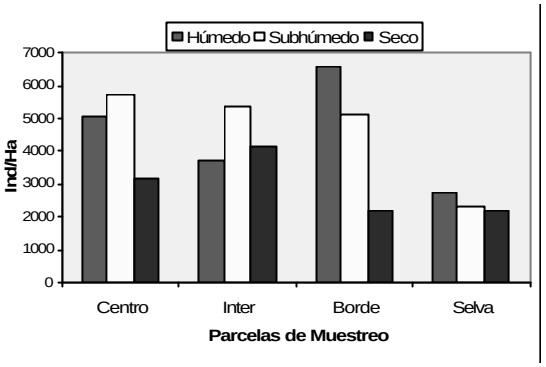

Figura 2. Densidad (Ind/ha) de individuos por ambiente y parcela de muestreo.

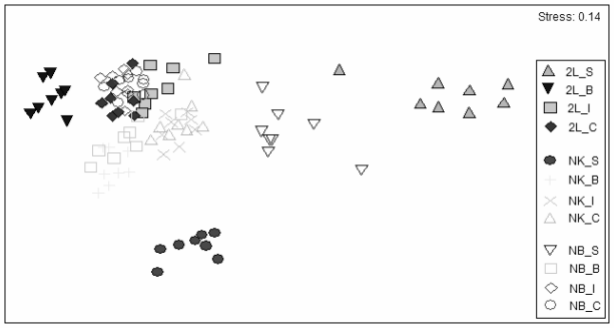

Figura 3. Ordenación MDS de los tres ambientes estudiados, basado en la transformación de las abundancias utilizando la raíz cuadrada (estrés = 0.14).

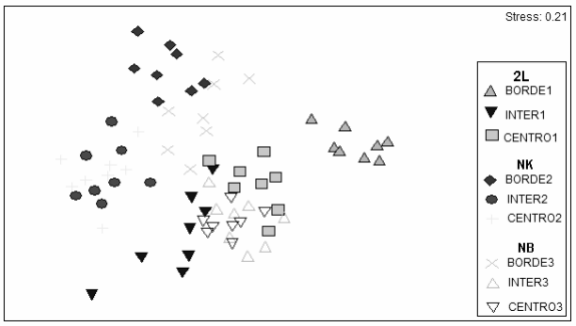

Figura 4. Ordenación MDS de las parcelas de muestreo correspondientes a los sitios de SBI, basado en la transformación de las abundancias utilizando la raíz cuadrada (estréss = 0.21).

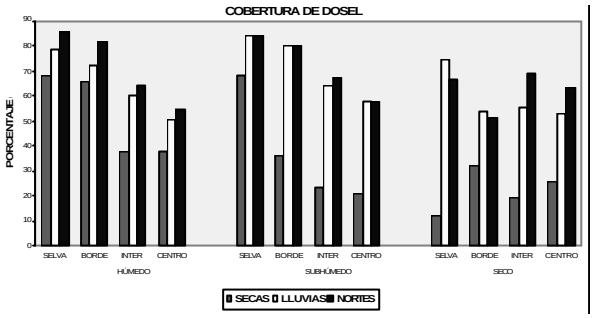

Figura 5. Porcentajes de cobertura de dosel registrados en las cuatro parcelas en los tres ambientes de muestreo durante las temporadas de secas, nortes y lluvias.

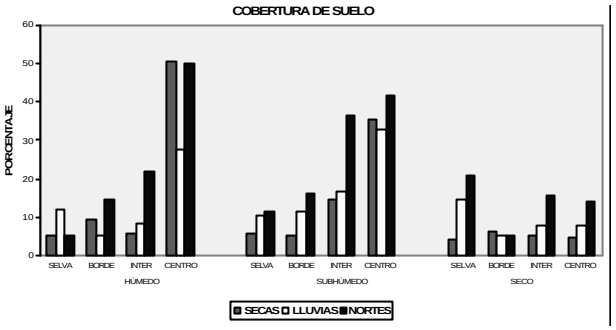

Figura 6. Porcentajes de cobertura de suelo registrados en las cuatro parcelas en los tres ambientes de muestreo durante las temporadas de secas, nortes y lluvias.

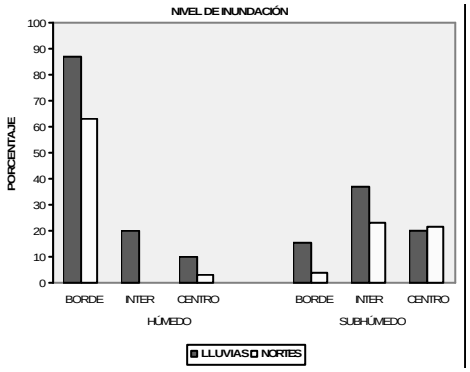

Figura 7. Porcentaje de suelo inundado registrados en las cuatro parcelas en los sitios de muestreo durante las temporadas de secas, nortes y lluvias.

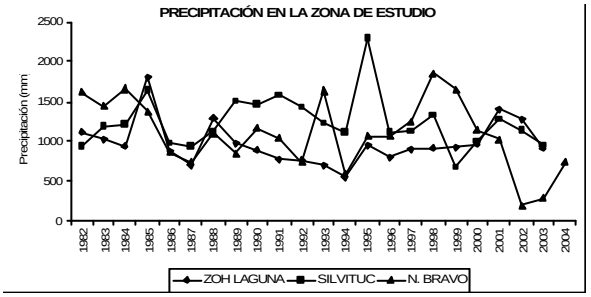

Fig. 8. Gráfica de precipitación de las tres estaciones climatológicas del área de estudio. Se presenta la precipitación total anual para el periodo de 1982 a 2003.

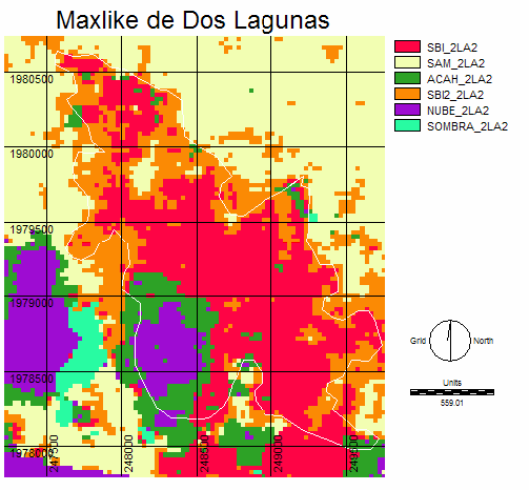

Figura 9. Ambiente Húmedo. Se muestra la clasificación supervisada mediante el algoritmo Maxlike: SBI, SA, Acahual, SMSP, Nubes y Sombras, aplicado a tres bandas (2,3 y 4) de la imagen landsat.

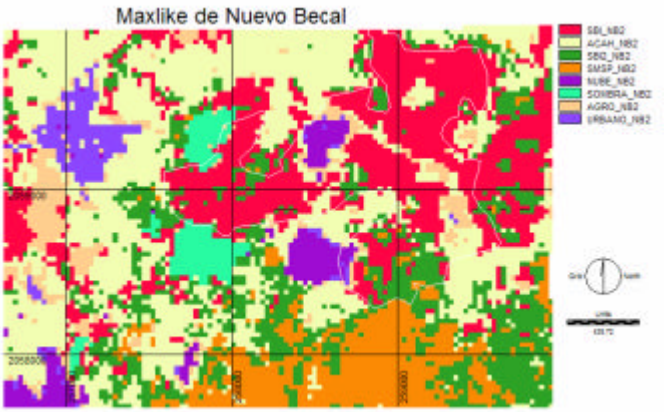

Figura 10. Ambiente Seco. Clasificación supervisada mediante el algoritmo Maxlike,: SBI, SBI2, Acahual, SMSP, Nubes, Sombras, Agropecuario y Urbano, aplicado a tres bandas (2,3 y 4) de la imagen landsat.

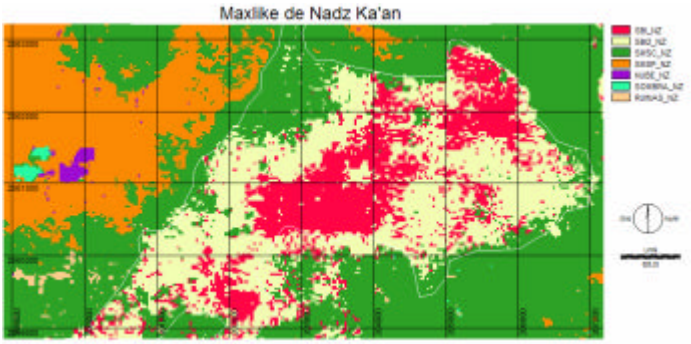

Figura 11. Ambiente Seco. Se muestra una clasificación supervisada mediante el algoritmo Maxlike, utilizando firmas espectrales de 7 clases de cobertura: SBI1, SBI2, SMSC, SMSP, Nubes, Sombras y Ruinas, aplicado a tres bandas (2,3 y 4) de la imagen landsat.

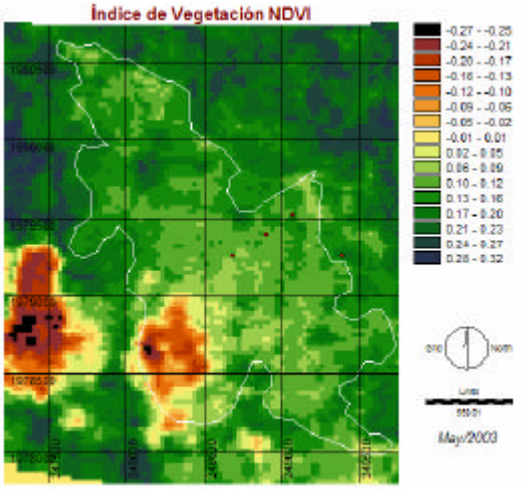

Figura 12. Ambiente Húmedo. Resultado del índice de vegetación NDVI, escalado a 16 intervalos en el valor del NDVI

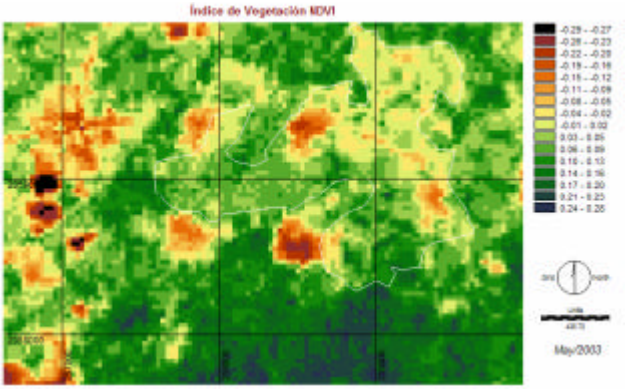

Figura 13. Ambiente Sub-húmedo. Resultado del índice de vegetación NDVI, escalado a 16 intervalos en el valor del NDVI obtenido.

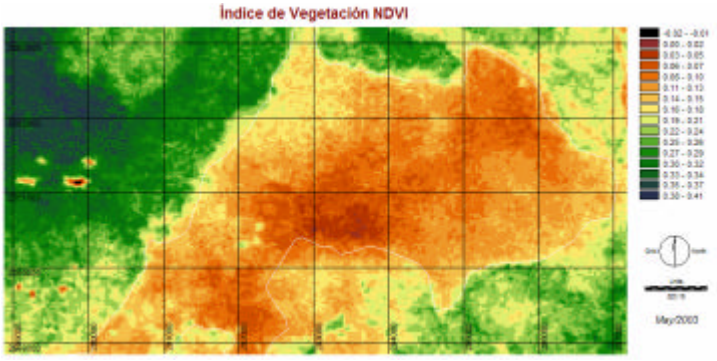

Figura 14. Ambiente Seco. Resultado del índice de vegetación NDVI, escalado a 16 intervalos en el valor del NDVI obtenido.

Tabla 1. Riqueza de especies y valores de diversidad de Shannon-Wiener ($H' = = -\Sigma p_i \ln p_i$) por ambiente y parcela de muestreo. Se reporta la diversidad máxima ($H'max = \ln S$).

AMBIENTE	PARCELA	SPP	H'	H'max
HUMEDO	Centro	27	2.810	3.296
	Intermedio	39	3.138	3.664
	Borde	28	1.761	3.332
	Selva	27	2.536	3.296
SUBHÚ-MEDO	Centro	30	2.865	3.401
	Intermedio	34	2.668	3.526
	Borde	39	2.551	3.664
	Selva	32	3.046	3.466
SECO	Centro	29	3.042	3.367
	Intermedio	32	3.091	3.466
	Borde	14	1.737	2.639
	Selva	28	2.733	3.332

Tabla 2. Valores promedio de densidad y su desviación estándar. Se realizó la Prueba MDS (Error: Entre MS=33.912, df=84) para comparar los valores de Densidad promedio entre los ambientes (*) y entre parcelas (letras) de muestreo.

	SELVA	BORDE	INTERMEDIO	CENTRO
SECO	13.75±4.46 a	13.75±4.46* a	25.86± 4.36 b	20.0±5.07* b
SUBHÚMEDO	14.75±3.41 a	32.13±5.82* b	33.63± 8.6* b	35.75±5.95 b
HÚMEDO	17± 3.81 a	41.0± 9.25* b	23.25± 7.42 c	31.75±5.1 d

* Difieren significativamente entre el mismo tipo de parcela; letras diferentes, difieren significativamente entre las parcelas del mismo ambiente.

Tabla 3. Prueba Newman-Keul (Error: entre MS=0.00021, df=96) para los datos de valor de NDVI en cada parcela de los tres sitios de muestreo.

	SELVA	BORDE	INTERMEDIO	CENTRO
HÚMEDO	0.194±0.020 a	0.132±0.008* b	0.120±0.008 b	0.101±0.007* c
SUBHÚMEDO	0.197±0.013 a	0.150±0.014* b	0.083±0.031* c	0.071±0.011 c
SECO	0.212±0.012* a	0.164±0.014* b	0.117±0.005 c	0.082±0.009 d

* Difieren significativamente entre el mismo tipo de parcela en los tres ambientes; letras diferentes indican que difieren significativamente entre las parcelas del mismo ambiente.

Tabla 4. Prueba Newman-Keul (Húmedo: MS=0.00045, df=152; Subhúmedo: MS=0.00041, df=160; Seco: MS=0.00032, df=160) para los datos de valor de NDVI para cada parcela de los tres ambientes de muestreo para las épocas de secas, lluvias y nortes.

AMBIENTE	PARCELA	FEBRERO (1996)	MAYO (2003)	OCTUBRE (1994)
HUMEDO	SELVA	0.551±0.056 Ac	0.194±0.020 Ad	0.660±0.016 Ab
	BORDE	0.596±0.017 Bc	0.132±0.008 BEd	0.640±0.029 ADb
	INTER	0.552±0.014 Ac	0.120±0.008 CEd	0.640±0.018 BDb
	CENTRO		0.101±0.007 DEe	0.583±0.017 Cb
SUBHUMEDO	SELVA	0.632±0.017 Ac	0.197±0.013 Ae	0.691±0.020 Ab
	BORDE	0.552±0.020 Bc	0.150±0.014 Be	0.648±0.026 Bb
	INTER	0.587±0.022 Cc	0.083±0.031 Ce	0.629±0.021 BDb
	CENTRO	0.575±0.024 Cc	0.071±0.011 Ce	0.616±0.024 CDb
SECO	SELVA	0.573±0.025 Ac	0.212±0.012 Aae	0.640±0.022 Ab
	BORDE	0.589±0.025 Ac	0.164±0.014 Ba	0.627±0.010 Ab
	INTER	0.528±0.008 Bc	0.117±0.005 Ce	0.604±0.011 Bb
	CENTRO	0.524±0.012 Cc	0.082±0.009 De	0.599±0.019 Cb

Mayúsculas: difieren significativamente entre parcelas del mismo año.
Minúsculas: difieren significativamente a lo largo del tiempo para el mismo tipo de parcela

Tabla 5. Resumen comparativo de los tres sitios estudiados y sus parcelas respectivas. Se presentan los datos de estructura y composición, clasificación espectral y valores de NDVI en las tres temporadas de muestreo para cada parcela estudiada.

SITIO	PARCELA	SPP	DEN	DIV.	COB. DOSEL (%PROM)			NDVI (VALOR PROM)		
		No.	Ind/Ha	H'	SEC	LLUV	NOR	SEC	LLUV	NOR
HUMEDO	SELVA	27	2720	2.536	68.13	78.75	85.63	0.194	0.660	0.551
	BORDE	28	6550	1.761	65.63	72.50	81.88	0.132	0.640	0.596
	INTER	39	3720	3.138	37.50	60.31	64.38	0.120	0.640	0.552
	CENTRO	27	5080	2.810	38.13	50.31	55.00	0.101	0.583	
SUBHU-MEDO	SELVA	32	2360	3.046	68.44	83.75	83.75	0.197	0.691	0.632
	BORDE	39	5140	2.551	35.94	80.00	80.00	0.150	0.648	0.552
	INTER	34	5380	2.668	23.75	63.75	66.88	0.083	0.629	0.587
	CENTRO	30	5720	2.865	20.63	58.13	57.81	0.071	0.616	0.575
SECO	SELVA	28	2200	2.733	11.88	74.38	66.67	0.212	0.640	0.573
	BORDE	14	2200	1.737	31.75	53.75	51.25	0.164	0.627	0.589
	INTER	32	4140	3.091	19.06	55.63	69.38	0.117	0.604	0.528
	CENTRO	29	3200	3.042	25.56	52.81	63.13	0.082	0.599	0.524