



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO EN HIDROCIENCIAS

**ESTIMACION DE VARIABLES BIOFISICAS EN
VEGETACION HERBACEA USANDO SENSORES
REMOTOS**

ADAN VILLA HERRERA

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA
OBTENER EL GRADO DE:

DOCTOR EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO

2015

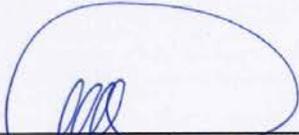
La presente tesis titulada: **Estimación de variables biofísicas en vegetación herbácea usando sensores remotos**, realizada por el alumno: **Adán Villa Herrera**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

DOCTOR EN CIENCIAS

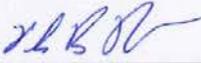
HIDROCIENCIAS

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO:


DR. MARIO R. MARTÍNEZ MENES

DIRECTOR


DR. FERNANDO PAZ PELLAT

ASESOR


DR. MARTÍN A. BOLAÑOS GONZÁLEZ

ASESOR


DR. JOSÉ LUIS ZARAGOZA RAMÍREZ

ASESOR


DR. PEDRO A. MARTÍNEZ HERNÁNDEZ

ASESOR


DR. ABEL QUEVEDO NOLASCO

Montecillo, Texcoco, México, 06 de Junio de 2015

ESTIMACION DE VARIABLES BIOFISICAS EN VEGETACION HERBACEA USANDO SENSORES REMOTOS

Adán Villa Herrera, Dr.

Colegio de Postgraduados, 2011

RESUMEN

El presente trabajo realizó una revisión y análisis de la importancia del uso de sensores remotos en la estimación de variables biofísicas para caracterizar el desarrollo de la vegetación; particularmente con la Biomasa aérea (Bm), el índice de área foliar (IAF) y la cobertura aérea (fv) usando sensores remotos, tanto de espectroscopia de campo como de plataformas satelitales. Se plantearon las bases que describen el desarrollo de un monitoreo básico de vegetación herbácea para algunas variables biofísicas (Bm, IAF y fv). Posteriormente, se abordó el estudio de la variable cobertura aérea bajo una perspectiva de estimación para la distribución del follaje en un pixel o parcela, revisando datos espectrales y la relación entre IAF y la fv; se analizó el diseño de índices de vegetación en espacios normalizados y estandarizados (IV_PELANA), lo cual cumple con el objetivo de tener una relación única con la vegetación, durante todo el ciclo completo del crecimiento. Se planteó una metodología de monitoreo de estratos de vegetación empleando sensores remotos en tres esquemas diferentes de interés en ganadería: red básica, red complementaria y red de helicóptero a radio control, donde obtuvo espectroscopia de campo, para calcular índices de vegetación y estimar biomasa aérea (y otras variables). Se validó la metodología en sitios permanentes de muestreo para el Estado de Coahuila, México, donde se obtuvieron datos de espectroscopia, fotografías digitales y muestreos de peso de biomasa (fresca y seca) para el cálculo de coeficiente de agostadero. Los resultados obtenidos, permiten inferir que los sensores remotos sirven para realizar estimaciones confiables de la curva de crecimiento de la vegetación para la estimación de la carga animal en los sistemas de producción pecuarios en términos dinámicos. Finalmente, se concluye que los desarrollos planteados son susceptibles de aplicar de manera extensiva en el país para obtener actualizaciones confiables, en series temporales de diferente resolución, sobre los usos de la vegetación forrajera en ganadería y mejorar la planeación.

Palabras Clave: Variables Biofísicas, Estimación de Biomasa y Cobertura Aérea. Índices de Vegetación, Espacios Normalizados y Estandarizados.

ESTIMATION OF BIOPHYSICAL VARIABLES IN HERBACEOUS VEGETATION USING REMOTE SENSING

Adán Villa Herrera, Dr.
Colegio de Postgraduados, 2015

RESUMEN

This paper studied the importance of using remote sensing to estimate biophysical variables to characterize the development of vegetation; it is emphasized is the relationships of aboveground biomass (Bm), leaf area index (LAI) and canopy cover (CC) regarding with both field spectroscopy as the satellite platforms sensors. Bases describing the development of a basic monitoring of herbaceous vegetation for some biophysical variables (Bm, IAF and CC) were raised. Subsequently, we studied the canopy cover under a perspective for estimate the distribution of foliage was addressed in a pixel or plot, spectral data and reviewing the relationship between IAF and fv; We design normalized vegetation indices and standardized spaces (IV PELANA) which meets the objective of having a unique relationship with vegetation throughout the entire growth cycle was analyzed. Core network, network and network complementary helicopter radio control: a monitoring methodology strata of vegetation using remote sensing in three different schemes of interest in livestock was raised. In these campaigns vegetation monitoring, field spectroscopy was obtained to calculate vegetation indices and to estimate biomass. The methodology was validated sampling at permanent sites for the State of Coahuila, Mexico, where spectroscopy data, digital photographs and samples of biomass weight coefficient for the calculation of rangeland were obtained. The results obtained allow us to infer that the remote sensors are used to make reliable estimates of the growth curve characterization of vegetation for stocking in livestock production systems in dynamic terms. Finally, it is concluded that developments raised are likely to apply extensively in the country to obtain reliable updates, time series of different resolution, on the uses of livestock forage vegetation and improve planning.

Keywords: Biophysical Variables, Estimation of Biomass. Vegetation Index. Canopy Cover. Normalized and Standardized Spaces

RECONOCIMIENTO

El Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por su contribución en la realización de este trabajo a partir de la beca otorgada para la realización de los estudios de doctorado en el Postgrado de Hidrociencias del Colegio de Postgraduados.

Al Colegio de Postgraduados y su cuerpo académico por los conocimientos y habilidades adquiridos dentro de la formación académica.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por concederme la gracia de la vida y mantenerme aún de pie.

A mis padres, Olimpia Herrera Villar y Noé Villa Castellanos por todo el tiempo que han dedicado a mi persona, y que hoy en día con sus oraciones continúan pendiente de mí.

A mis hermanos, Oscar, Efraín, Héctor, Consuelo, Elvia, Susana por su apoyo para continuar en este camino del conocimiento.

A los Doctores Fernando Paz, Mario Martínez, Martín Bolaños, Abel Quevedo, José Luis Zaragoza y Pedro A. Martínez por haber aceptado en formar parte de mi consejo doctoral y su apoyo para culminar el presente trabajo.

Al personal administrativo Patricia Ibarra, Laura, Mariela, Salustia del programa de Hidrociencias por el apoyo recibido para la culminación de la presente investigación.

A amigos compañeros de trabajo, Isabel, Fermín, Ernesto por su amistad y apoyo.

A todos los compañeros de trabajo (GRENASER) que directamente o indirectamente contribuyeron a la realización de este proyecto.

Finalmente a una persona muy especial en mi vida a Janneth Judit S. H. y familia Sr. Cruz y Esposa Juana e hijos Oscar y Yeny por su apoyo incondicional.

CONTENIDO

CONTENIDO.....	vii
ÍNDICE DE CUADROSxi
ÍNDICE DE FIGURAS	xii
INTRODUCCIÓN	1
LITERATURA CITADA.....	4
CAPITULO 1. PLANTEO DEL PROBLEMA Y REVISION DE LITERATURA	5
1.1 GENERALIDADES.....	5
1.2 ESTRATEGIA DE ESTIMACION INDIRECTA DE VARIABLES BIOFISICAS DE VEGETACION EN LAS IMÁGENES REMOTAS	9
1.3 METODOS EMPIRICOS	10
1.3.1 Análisis multiespectral: combinación de bandas	10
1.4 APLICACIÓN DE MODELOS.....	10
1.4.1 Reflectancia y BRDF	10
1.4.2 Modelos de cobertura y modelos de hoja	11
1.4.3 Inversión de modelos	11
1.5 REDES REURONALES	12
1.6 LITERATURA CITADA.....	14
1.7 OBJETIVOS	19

1.7.1 OBJETIVO GENERAL	19
1.7.2 OBJETIVOS PARTICULARES.....	19
1.8 HIPOTESIS	20
CAPITULO 2: BASES PARA EL DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITOREO DE LA VEGETACION USANDO SENSORES REMOTOS	
2.1 INTRODUCCION	21
2.2 INDICES ESPECTRALES DE LA VEGETACION	22
2.3 Estandarización de los efectos de la geometría sol-sensor	27
2.4 Minimización de los efectos atmosféricos en el IVg	30
2.5 Geometría sol-sensor y diseño de índices de vegetación	38
2.6 Modelación de los patrones temporales de IVISn	47
2.7 SISTEMA DE MONITOREO SATELITAL BASICO	51
2.8 LITRATURA CITADA	54
CAPITULO 3 ESTIMACIÓN DE LA COBERTURA AEREA DE LA VEGETACIÓN HERBACEA USANDO SENSORES REMOTOS	
3.1 INTRODUCCIÓN	56
3.2 POSICIONAMIENTO DEL PROBLEMA DE ESTIMACIÓN	58
3.2.1 Patrones espectrales del crecimiento de la vegetación	58
3.2.2 Desarrollo de índices espectrales de la vegetación	61

3.3 DISEÑO DE INDICES DE VEGETACIÓN EN ESPACIOS NORMALIZADOS Y ESTANDARIZADOS	68
3.4 VALIDACION DE LA RELACIÓN DEL IV_PELANA CON f_v USANDO DATOS EXPERIMENTALES.....	72
3.4.1 Experimentos de cultivos agrícolas con diferentes suelos	72
3.4.2 Experimento de reflectancia en pasto con mediciones multi-angulares	80
3.4.3 Maqueta experimental.....	81
3.5 Efectos de la distribución angular y propiedades ópticas de las hojas.....	84
3.6 CONCLUSIONES	85
3.7 LITERATURA CITADA.....	86
CAPITULO 4: MUESTREO DEL SISTEMA DE MONITOREO TERRESTRE ORIENTADO A LA GANADERIA EN MEXICO (Red básica, Red complementaria, Red-helicóptero-radio control).....	94
4.1 GENERALIDADES.....	94
4.2 Red básica de monitoreo.	94
4.2.1 Diseño básico: muestreo sistemático.....	96
4.2.2 Diseño alternativo: muestreo no sistemático.....	97
4.2.3 Imágenes panorámicas.....	100
4.2.4 Fotografías de coordenadas en GPS de puntos centrales y extremos y puntos de biomasa	101
4.3 Red complementaria de monitoreo.	102

4.4 Red de monitoreo por helicóptero de radio control	107
4.4.1 Mediciones en campo	109
CAPITULO 5: ESTIMACIÓN DE LA CAPACIDAD DE CARGA ANIMAL EN AGOSTADEROS POR MEDIO DE UN INDICE DE VEGETACIÓN DE PENDIENTES NORMALIZADAS.....	111
5.1 INTRODUCCIÓN	111
5.2 MARCO CONCEPTUAL	112
5.2.1 Índices espectrales de la vegetación	112
5.2.2 Validación del IVPN	119
5.2.3 Estimación de la capacidad de carga animal	120
5.2.4 Campaña de muestreo en el estado de Coahuila, México.....	121
5.3 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	123
5.3.1 Relaciones entre las biomásas de los SPM	124
5.3.2 Patrones entre a_0 y b_0 en las SPM.....	124
5.3.3 Relación entre el IVPN y el peso fresco total del estrato herbáceo en los SPM	126
5.4 CONCLUSIONES	129
5.5 LITERATURA CITADA.....	130
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	134

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 3.1. Resultados del ajuste de la relación IV_PELANA con fv en Valle del Yaqui	77
Cuadro 4.1 Puntos de muestreo en cada Estado.....	105
Cuadro 5.1. Promedios y desviaciones estándares de las variables medidas por SPM	128

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Métodos de extracción de variables biofísicas mediante teledetección	9
Figura 2.1. Patrones espectrales del crecimiento de un cultivo en el espacio del R-IRC.	22
Figura 2.2. Relación entre el IVg y el IAF para un suelo claro y uno oscuro usando simulaciones radiativas	24
Figura 2.3. Patrones espectrales del crecimiento del maíz para un suelo oscuro y uno claro, bajo dos condiciones de humedad del suelo (seco y húmedo).	25
Figura 2.4. Patrones espectrales del crecimiento del algodón para tres suelos secos. 25	
Figura 2.5. Relación entre el IAF y el IVg para el experimento del maíz.....	26
Figura 2.6. Relación entre el IAF y el IVg para el experimento del algodón.....	26
Figura 2.7. Geometría sol-sensor de iluminación y visión.....	27
Figura 2.8. Relación entre bR y bIRC para simulaciones atmosféricas radiativas.	32
Figura 2.9. Relación entre bR/bIRC y τ_{550} para una atmósfera tropical y un aerosol genérico.	33
Figura 2.10. Relación entre bR/bIRC y τ_{550} para varios modelos atmosféricos y un aerosol genérico.....	34
Figura 2.11. Relación entre b0 y T para varias visibilidades atmosféricas.....	34
Figura 2.12. Relación entre el IAF y a0 y b0 de las simulaciones radiativas de la Figura 2.	35

Figura 2.13. Patrón temporal del IVg para el uso de varios satélites (2008), datos originales.....	36
Figura 2.14. Patrón temporal del IVg para el uso de varios satélites (2008), algoritmo aplicado.....	36
Figura 2.15. Patrón temporal del IVg para el uso de varios satélites (1988), datos originales.....	37
Figura 2.16. Patrón temporal del IVg para el uso de varios satélites (1988), algoritmo aplicado.....	37
Figura 2.17. Ajuste del modelo de la geometría sol-sensor en pastizales de México. ...	38
Figura 2.18. Espacio normal (R) del ajuste del modelo geometría sol-sensor para los datos mostrados en la Figura 2.17.....	39
Figura 2.19. Simulaciones radiativas para el caso de efecto de escala (a y b) y sin él (c y d).....	40
Figura 2.20. Mediciones en campo para el caso de efecto de escala (a y b) y sin él (c y d).....	41
Figura 2.21. Relación entre el IAF e IVISn para las simulaciones radiativas.	42
Figura 2.22. Relación entre $\ln(\text{IAF}+1)$ e IVISn para las simulaciones radiativas.....	43
Figura 2.23. Relaciones IAF-IVISn y $\ln(\text{IAF}+1)$ -IVISn en suelos en la condición seco y húmedo en cultivo de algodón.	44
Figura 2.24. Relación Bm-IVISn en suelos en la condición seco y húmedo en cultivo de algodón.	45

Figura 2.25. Relaciones IAF-IVISn y $\ln(\text{IAF}+1)$ -IVISn para dos suelos debajo del cultivo de maíz, cada uno en la condición seco y húmedo.....	46
Figura 2.26. Modelo logístico para el cultivo de algodón, suelo 2 y 4.	48
Figura 2.27. Modelo logístico para el cultivo de maíz, suelo claro y oscuro.....	48
Figura 2.28. Evolución temporal de IVISnt para cinco cultivos agrícolas.	49
Figura 2.29. Evolución temporal de IVISnt para los cultivos: garbanzo y trigo en la etapa de senescencia.	50
Figura 2.30. Marco Nacional para la integración de la base geoespacial de USV para consultas satelitales.	51
Figura 2.31. Marco Estatal para la integración de la base geoespacial de USV para consultas satelitales.	52
Figura 2.32. Patrón típico de una curva de crecimiento unimodal de la vegetación.....	53
Figura 2.33 Sistema de avance (cada 20 días) en relación al histórico anual.....	53
Figura 3.1. Línea del suelo en seis suelos con propiedades ópticas diferentes.....	58
Figura 3.2. Patrones espectrales de las reflectancias de un cultivo de algodón en campo (adaptado de Huete <i>et al.</i> , 1985).....	60
Figura 3.3. Relación de los índices dIRC y dR.....	64
Figura 3.4. Relación entre el IVIS y el IAF para suelo oscuro (a) y suelo claro (b).	65
Figura 3.5. Patrón temporal del IAF de un cultivo.	67
Figura 3.6. Patrón espectral en el espacio R-IRC del crecimiento de un cultivo.....	68
Figura 3.7. Patrones del crecimiento de la vegetación en el espacio Rn-IRCn.....	69

Figura 3.8. Relación entre el IAF e IVISn para las simulaciones radiativas (IAF de 0 a 5).	70
Figura 3.9. Relación entre $\ln(\text{IAF}+1)$ e IVISn para las simulaciones radiativas (IAF de 0 a 5).	70
Figura 3.10. Relación entre el Índice de vegetación de proporciones estandarizadas y fv para suelo oscuro (a) y claro (b), con IAF de (0 a 8).	71
Figura 3.11. Evolución temporal de fv: (a) algodón y (b) maíz.	72
La Figura 3.12 muestra la relación IV_PELANA con el fv para el algodón, con distintos tipos de suelos (oscuros y claros), considerando cambios de humedad en cada uno de ellos: (a) Oscuro 1 ($R_s = 2.9$ a 6.2), (b) Oscuro 2 ($R_s = 12.6$ a 15.8), (c) Claro 1 ($R_s = 10.7$ a 18.8) y (d) Claro 2 ($R_s = 18.7$ a 33.7).	72
Figura 3.12. Relación entre el IV_PELANA y fv para el cultivo de algodón con distintos tipos de suelos.	73
Figura 3.13. Relación entre el IV_PELANA y fv para el cultivo de maíz con distintos tipos de suelos debajo del cultivo: (a) Oscuro ($R_s = 6.0$ a 12.0), (b) Claro ($R_s = 16.0$ a 30.1)	73
Figura 3.14. Diseño experimental de muestreo en las parcelas homogéneas de la campaña del Valle del Yaqui, Sonora, México.	74
Figura 3.15. Patrones típicos de la evolución temporal del fv de los cultivos agrícolas de la campaña del Valle del Yaqui, Sonora, México: (a) sorgo, (b) trigo, (c) frijol, (d) garbanzo y (e) cártamo.	76
Figura 3.16. Relación IV_PELANA con fv, cultivo sorgo.	79

Figura 3.17. Relación IV_PELANA con fv, cultivo trigo.	79
Figura 3.18. Relación IV_PELANA con fv, cultivo frijol.....	79
.....	80
Figura 3.19. Relación IV_PELANA con fv, cultivo garbanzo.	80
Figura 3.20. Relación IV_PELANA con fv, cultivo cártamo.	80
Figura 3.21. Evolución temporal de la biomasa total y viva del experimento de Walnut Gulch, Arizona.....	81
Figura 3.22. Relación entre IV_PELANA y fv para el experimento de Walnut Gulch. ...	81
Figura 3.23. Relación entre el IVIS y el IAF para el pasto, con diferentes suelos.	82
Figura 3.24. Relación entre el IV_PELANA y el fv para el pasto, con diferentes suelos: (a) Oscuro (Rs = 9.0) y (b) Claro (Rs = 31.0).	82
Figura 3.25. Relación entre el IV_PELANA y el fv para otro pasto, con diferentes suelos.: (a) Oscuro (Rs = 8.1, (b) Medio (Rs = 15.5) y (c) Claro (Rs = 37.5).	83
Figura 3.26. Efecto del cambio de las propiedades ópticas de las hojas, con una distribución angular erectófila.....	84
Figura 3.27. Efecto de cambio de la distribución de las hojas en maíz al mantener las propiedades ópticas.	85
Figura 4.1. Distribución de los sitios permanentes de muestreo en la República Mexicana.	95
Figura 4.2. Representación esquemática de un SPM, del SIMTOG.	96

Figura 4.3. Distribución de las estaciones de muestreo en un sistema permanente de muestreo.	97
Figura 4.4. Estaciones de muestreo en un SPM con diseño alternativo.	98
Figura 4.5. Radiómetro multi-espectral y cámara digital para toma de datos en muestreos en campo	99
Figura 4.6. Equipo de muestreo: a) Lap Top/PC, b) Cable convertidor de serial a USB(Manhatan), c) Cable serial machihembrado, d) Baterías, e) Datalogger MEX-V1.0, f) Cable Serial Puerto Paralelo, g) Radiómetro CropScan ®	99
Figura 4.7. Proceso de medición de reflectancia, colecta y pesado de forraje en los puntos de muestreo de biomasa.....	100
Figura 4.8. Secuencia de toma de fotografías panorámicas en una EM.....	101
Figura 4.9. Registro de coordenadas de los puntos centrales y extremas de cada estación de muestreo	102
Figura 4.10. Visualización de rutas por medio de Google Earth®.....	103
Figura 4.11. Sitio representativo para la toma de datos de red complementaria.	104
Figura 4.12. Planeación de ruta para tomar puntos de la red complementaria.....	104
Figura 4.13. Puntos muestreados para red complementaria.....	107
Figura 4.14. Fotografía aérea tomada con Helicóptero Radio Control.	108
Figura 4.15. Equipo de muestreo en la toma de datos con helicóptero.....	108
Figura 4.16. Dirección y vuelos correspondientes para casa estación de muestreo...	109
Figura 5.1. Simulaciones radiativas del crecimiento (IAF) de un cultivo.	113

Datos de los experimentos de maíz y algodón.....	115
Figura 5.2. Patrones entre a_0 y $1/b_0$ de las líneas iso-IAF.....	115
Figura 5.3. Patrón del crecimiento de la biomasa aérea viva en matorrales y pastizales con crecimiento unimodal.....	116
Figura 5.4. Relación entre el IAF y los parámetros a_0 y b_0 de las líneas iso-IAF	117
Figura 5.5. Relación entre el IVPN y el IAF en los cultivos de maíz y algodón.	119
Figura 5.6. Relación entre el IVPN y la Bm verde en los.....	120
Figura 5.7. Distribución de los sitios permanentes de muestreo en el Estado de Coahuila.	121
Figura 5.8. Representación esquemática de un SPM y la distribución de las EM.....	122
Figura 5.9. Distribución de los puntos de muestreo en una EM de un SPM	122
Figura 5.10. Relación entre las diferentes fracciones de la biomasa promedio de las SPM.	124
Figura 5.11. Relación entre a_0 y $1/b_0$ para SPM muestreados durante la etapa vegetativa del crecimiento del estrato herbáceo.....	125
Figura 5.12. Relación entre el IVPN y la Bm fresca total del estrato herbáceo en los SPM.	126

INTRODUCCIÓN

Uno de los principales retos en la actualidad sobre el estudio de los ecosistemas terrestres es comprender el papel que juegan estos ecosistemas dentro del sistema completo que forma la tierra, prestando especial atención a sus relaciones con el resto de elementos, principalmente con la atmósfera. Para conseguir este objetivo es necesario caracterizar los sistemas vegetales a partir de la información que los satélites artificiales nos proporcionan.

La estimación de las variables biofísicas que permiten describir el estado y la evolución en cualquier tipo de vegetación herbácea y usan sensores remotos ha sido objeto de estudio en los últimos años. Estudios que muestran que a partir de datos radiométricos de la cobertura vegetal es posible estimar variables biofísicas o parámetros biofísicos como la fracción de suelo cubierta por la vegetación (f_c), el índice de área foliar (LAI), la fracción de la radiación fotosintéticamente activa absorbida ($fPAR$), el coeficiente de un cultivo basal (K_{cb}), el contenido de clorofila en la hoja, el albedo, entre otras.

Los sensores remotos son sistemas óptico-eléctricos que detectan y registran, en forma de imágenes, el flujo de energía radiante reflejado o emitido por objetos. Dicho flujo de energía, también denominado radiancia, se define como el total de radiación electromagnética de una longitud de onda determinada que llega al sensor por unidad de tiempo y de superficie, y por ángulo sólido de medida.

El uso de la tecnología de sensores remotos, a bordo de plataforma satelitales, cada vez se plantean mayores aplicaciones a diferentes rangos del espectro electromagnético. Uno de los primeros usos, ha sido monitoreo de los recursos naturales, donde se ha usado los contrastes entre la reflectancia espectral del rojo (R) y del Infrarrojo Cercano (IRC), generando así los Índices de Vegetación (IV) (Tucker, 1979).

Una estrategia alternativa al uso de la información de los sensores remotos es por la vía de los modelos biofísicos de la transferencia de la radiación en el follaje de los cultivos (Ross, 1981; Goel, 1988; Myneni *et al.*, 1989). Aunque se han realizado grandes esfuerzos de modelación y de inversión de estos modelos para obtener parámetros

biofísicos de los cultivos, los resultados obtenidos han sido muy limitados (Jacquemoud *et al.*, 1995, 2000; Weiss *et al.*, 2000; Kuusk, 1991); independiente del tiempo y costos de computación requerido, lo cual hace a esta estrategia poco práctica para aplicaciones en el monitoreo continuo de la vegetación.

En este sentido, el trabajo se destinó a caracterizar y conocer el estado de la vegetación y estimación de variables biofísicas para estimar de capacidad de carga animal dentro de una contribución al conocimiento, desarrollo y puesta en operatividad de nuevos enfoques de aplicación de metodologías.

El primer capítulo es una breve revisión sobre la importancia que tiene el uso de sensores remotos para la estimación de variables biofísicas en la caracterización del estado propio que guarda la vegetación en algún tipo de ecosistema terrestre para fines de prácticos de investigación.

Un segundo capítulo se describen las bases para el desarrollo de un monitoreo básico de la vegetación usando la plataforma de sensores remotos para variables biofísicas como cobertura aérea de la vegetación (f_v), índice de área foliar (IAF) o biomasa aérea (B) que son parámetros críticos que se requieren estimar para la evaluación de los servicios hidrológicos, la emisión y remoción del carbono en la vegetación y la biodiversidad. Los sensores remotos, por su capacidad de registrar varias veces el mismo sitio (pixel) de la superficie terrestre permiten caracterizar los patrones temporales del crecimiento de la vegetación, en términos espectrales.

El tercer capítulo hace referencia a la estimación de la cobertura aérea de la vegetación herbácea al usar la plataforma de sensores remotos bajo una perspectiva de la estimación de la variable de la distribución del follaje en un pixel o parcela y que revisa el uso de los datos espectrales multitemporales para este fin. Además de la revisión de la relación entre el IAF y la f_v . Los desarrollos teóricos que fundamentan la estimación de f_v son revisados en función de datos experimentales, para analizar su robustez y estabilidad en el tiempo y espacio.

En el cuarto capítulo se describe la metodología de monitoreo usando sensores remotos con tres esquemas generales de muestreo orientado a la ganadería. La primera red básica de muestreo consiste en el establecimiento de sitios permanentes de muestreo a nivel Nacional con una extensión en el sitio de muestreo de 225 ha, donde se tomaron datos radiométricos, fotográficos y de biomasa. La segunda red complementaria identifica los puntos de rápida ejecución tomados a orillas de caminos y carreteras donde se tiene actividad ganadera con las mismas variables de medición y finalmente la red de helicóptero a radio control para monitorear los tres estratos de vegetación (herbáceo, arbustivo y arbóreo).

Finalmente el capítulo 5 se refiere a una metodología para la estimación de la capacidad de carga animal en agostaderos que usa un índice de la vegetación de pendientes normalizadas para el Estado de Coahuila, con apoyo de las teóricas y prácticas que se presentaron en los capítulos anteriores con el fin de validar dicha metodología.

Es importante enfatizar que varios capítulos están escritos en formato de borrador inicial de artículo para envío a publicación, que será ajustado al número de hojas de la revista científica seleccionada. Así, los capítulos redactados en este formato inevitablemente tienen traslapes de contenidos, donde la repetición de argumentos y teoría fue generada para que los artículos estuvieran con la información necesaria para su comprensión. Esta consideración de repeticiones debe tenerse en cuenta en la lectura de la tesis, analizando los capítulos en forma independiente y con contenido suficiente para su comprensión.

LITERATURA CITADA

- Jacquemoud, S., Baret, F., Andrieu, B., Danson, F.M. y Jaggard, K. 1995. Extraction of vegetation biophysical parameters by inversion of the PROSPECT + SAIL models on sugar beet canopy reflectance data. Application to TM y AVIRIS data. *Remote Sensing of Environment* 52: 163-172.
- Myneni, R.B., Ross, J.K. y Asrar, G. 1989. A review of photon transport in leaf canopies. *Agricultural Forestry Meteorology* 45: 1-153.
- Ross, J. 1981. *The Radiation Regime and Architecture of Plant Stands*. W. Junk, Norwell, MA. 391 p.
- Tucker, C.J. 1979. Red and photographic infrared linear combination for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*. 8:127-150.
- Weiss, M., Baret, F., Myneni, R.B., Pragnere, A. y Knyazikhin, Y. 2000. Investigation of a model inversion technique to estimate canopy biophysical variables from spectral and directional reflectance data. *Agronomie* 20: 3-22
- Kuusik, A. 1991. Determination of vegetation canopy parameters from optical measurements. *Remote Sensing of Environment* 37: 207-218.

CAPITULO 1. PLANTEO DEL PROBLEMA Y REVISION DE LITERATURA

1.1 GENERALIDADES

La cobertura vegetal, se trate de vegetación espontánea o de superficies cultivadas, representa un factor relevante en la estimación de parámetros biofísicos de la superficie terrestre y en la modelización de sistemas hidrológicos o climáticos. Tiene importancia para caracterizar el medio o estudiar procesos dinámicos amplios donde intervengan el suelo, la rugosidad, las precipitaciones, el relieve, la erosión, etc. Así como minimizar o eliminar sus efectos en la determinación de otros factores, como la humedad del suelo.

La caracterización de la vegetación y la estimación de sus parámetros biofísicos, en general, se pueden determinarse de forma directa sobre el terreno, haciendo medidas sobre la planta o la cobertura, o bien de forma indirecta mediante imágenes remotas o fotografías aéreas, con tratamientos derivados de su respuesta espectral.

Existen diversas metodologías capaces de proporcionar información sobre el estado de las plantas a partir de datos obtenidos desde satélites. Algunos de los parámetros más utilizados en la descripción del estado de la vegetación y que se puede obtener actualmente mediante teledetección, es el índice de área foliar o *LAI (Leaf Area Index)*, es decir la superficie foliar por unidad de superficie de suelo ocupado, o su contenido de clorofila. Sin embargo, estudios recientes (Morissette *et al.*, 2006) insisten en afirmar la necesidad de mayores esfuerzos en aumentar la precisión al determinar estos parámetros.

El índice de área foliar es una variable clave para estudiar los procesos fisiológicos en ecosistemas forestales (Asner *et al.*, 2003; Le Maire *et al.*, 2008), tales como pronosticar el crecimiento, la productividad o el intercambio gaseoso (Reichstein *et al.*, 2003). El concepto de LAI hace referencia al conjunto de masa foliar de una cobertura vegetal y, por tanto, a su capacidad de fotosíntesis que se relaciona con el contenido de pigmentos (i.e., clorofila), la transpiración de la planta y el intercambio de CO₂. Estas funciones son importantes para los intercambios entre la vegetación y la atmósfera (Nemani *et al.*, 1993).

Por otro lado la clorofila (Chls; clorofila a y b) es posiblemente el pigmento más importante de las plantas, ya que controla la cantidad de radiación solar que la planta absorbe y, por lo tanto, la capacidad fotosintética y la producción de los sistemas vegetales, suministra un cálculo aproximado del estado nutritivo de la planta o permite evaluar diferentes niveles de estrés (Balckburn, 2007).

Por muchas razones, el LAI y el contenido de clorofila son los parámetros ecofisiológicos que mayor interés han despertado en los estudios de teledetección aplicados a estrés.

En la actualidad, la metodología más extendida para la estimación del LAI mediante teledetección es a través de relaciones empíricas entre ese parámetro e índices de vegetación, calculados con las diferencias existentes entre los valores de la reflectancia de la vegetación medidos en el infrarrojo cercano y en el visible. Muchos estudios han relacionado índices de vegetación como el NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), con el LAI (Turner *et al.*, 1999). Sin embargo una estimación precisa del LAI siguiendo esta metodología requiere una calibración mediante datos de control en el suelo, para considerar las variaciones entre las relaciones LAI-NDVI para diferentes especies vegetales (Green *et al.*, 2000). Estas relaciones pueden incluso cambiar para una misma especie a lo largo de su ciclo de crecimiento (Gutman, 1991). Incluso hay diferencias entre los índices de vegetación calculados al utilizar diferentes satélites, índices que necesitan ser corregidos para poder compararlos (Steven *et al.*, 2003). Todo esto supone un alto reto en la utilización de los índices de vegetación.

La mayoría de los estudios hasta el momento han utilizados índices de vegetación obtenidos a partir de sensores multiespectrales (en particular Landsat TM 5, ETM+, y SPOT) (Peddle *et al.*, 1999; Le Maine *et al.*, 2008; Main *et al.*, 2011), aunque también se han utilizado modelos de reflectancia del dosel (Kuusk, 1998). Los sensores hiperespectrales (CASI, AHS, Hyperion, etc.), que disponen de un elevado número de bandas, tienen el potencial de medir características de la vegetación difíciles de medir, a priori, por los sensores multiespectrales convencionales (Zarco-Tejada *et al.*, 2001; Moorthy *et al.*, 2008; Main *et al.*, 2011; Hernández Clemente *et al.*, 2011). Las ventajas de estos sensores son el mayor número de bandas disponibles, y el ancho de dichas

bandas, ya que la estimación de LAI y de clorofila es más sensible a la reflectancia en las regiones espectrales de bandas más estrechas.

Los datos radiométricos adquiridos por los diferentes sensores se pueden convertir o no en índices espectrales de vegetación (acrónimo en inglés SVI), los cuales son dependientes del sensor, lo que dificulta la capacidad de comparar los resultados entre sensores debido a las diferencias entre sus características espectrales y espaciales (Steven *et al.*, 2003). En este caso, resulta conveniente una normalización entre los índices calculados a partir de sensores homólogos cuando se pretende hacer una comparación de los valores obtenidos. Teillet *et al.* (1997) evaluaron el índice de vegetación normalizado (NDVI Normalized Difference Vegetation Index en su denominación en inglés) para diferentes sensores (Landsat TM, AVHRR, MODIS, MERIS), y observaron que los valores de ese índice estaban significativamente afectados por las diferencias en el ancho de las bandas espectrales, especialmente en el comportamiento de las bandas del *Red Edge* y del infrarrojo cercano.

El desarrollo de modelos de transferencia radiativa en cubierta vegetal (Verhoef, 1984) y en elementos básicos de éstas, como son las hojas (Jacquemoud & Baret, 1990), ha abierto una nueva y prometedora vía en la caracterización de la vegetación mediante teledetección. Estos modelos generan el espectro de reflectancia de la cubierta vegetal a partir de los parámetros que caracterizan la vegetación, como el *LAI* o el contenido de clorofila de las hojas. A diferencia de lo que ocurre con otros índices de vegetación, los parámetros que utilizan estos modelos tienen una interpretación clara y aportan por sí mismos una interesante información.

Algunas aplicaciones y ejemplos de estimaciones indirectas de la vegetación mediante sensores remotos pueden ser en:

1. Cartografía de masas y asociaciones vegetales, naturales o agrícolas (Ehlers *et al.*, 2003; Xiao *et al.*, 2005).
2. Estimación de superficies cultivadas o naturales y tipo de especies (relacionadas con control de ayudas, estimación de cosechas, gestión de infraestructuras, gestión de recursos naturales o artificiales,...). En este caso es relevante la

resolución espacial y espectral, que determinan la precisión con que se puede estimar la superficie (Pekkarinen, 2002) y el grado de discriminación de especies vegetales (Lacar *et al.*, 2001).

3. Agricultura de precisión: seguimiento del desarrollo del cultivo hasta cosecha (Doraiswamy *et al.*, 2002),
4. Seguimiento de la fenología de la planta mediante series multitemporales de datos imagen (Huete *et al.*, 2002) o (Sakamoto *et al.*, 2005); o un seguimiento global de la dinámica de la vegetación, como medio de comprensión de las interacciones entre biosfera, el clima y el intercambio de carbono. También dentro de este grupo se puede considerar la detección de cambios en la cobertura vegetal, especialmente en la vigilancia de fuegos, deforestación, expansión urbanística, etc. (Zhan *et al.*, 2002).
5. Estimación del llamado “factor C” o factor vegetación en la ecuación de evaluación de la erosión y pérdida de suelo, (USLE, Universal Soil Loss Equation) (Haboudane *et al.*, 2002 y Essa, 2004).
6. Estimación de la humedad del suelo (Doraiswamy *et al.*, 2004). La presencia de vegetación (espontánea o cultivada) sobre el suelo produce un efecto pantalla que dificulta la medida de su contenido de humedad.
7. Estimación del balance hídrico y evapotranspiración (Allen *et al.*, 2005; Nagler *et al.*, 2005), en los que la cobertura vegetal, estimada mediante parámetros indirectos de teledetección como el índice de área foliar y los índices de vegetación, es un parámetro del modelo que se utiliza en el balance.
8. Estimación de la biomasa vegetal. Una de las aplicaciones es el estudio del ciclo del carbono y el intercambio de CO₂ con la atmósfera (Hese *et al.*, 2005), pero también el seguimiento de zonas de protección especial, como humedales (Tan *et al.*, 2003), o gestión sostenible de bosques (Luther *et al.*, 2002) y pastos (Moreau and Le Toan, 2003); en cuya evaluación uno de los indicadores importantes es la biomasa vegetal.

1.2 ESTRATEGIA DE ESTIMACION INDIRECTA DE VARIABLES BIOFISICAS DE VEGETACION EN LAS IMÁGENES REMOTAS

Los métodos de extracción de variables biofísicas se identifican en tres grupos (Figura 1.1).

- Métodos empíricos, que estudian la aplicación de medidas y tratamientos de las reflectancias de la imagen para correlacionar con las medidas empíricas del parámetro sobre el terreno.
- Modelos físicos de transferencia radiativa o geométrico-ópticos, que describen la dispersión de la energía de la cubierta (la llamada BRDF, Bidirectional Reflectance Distribution Function), y por tanto pueden describir los parámetros vegetales presentes. Dentro de éstos, la forma de extraer el valor del parámetro es invertir el modelo.
- Redes neuronales, que estiman el parámetro biofísico en un sistema en el que las reflectancias y las medidas del parámetro en el terreno son las entradas.

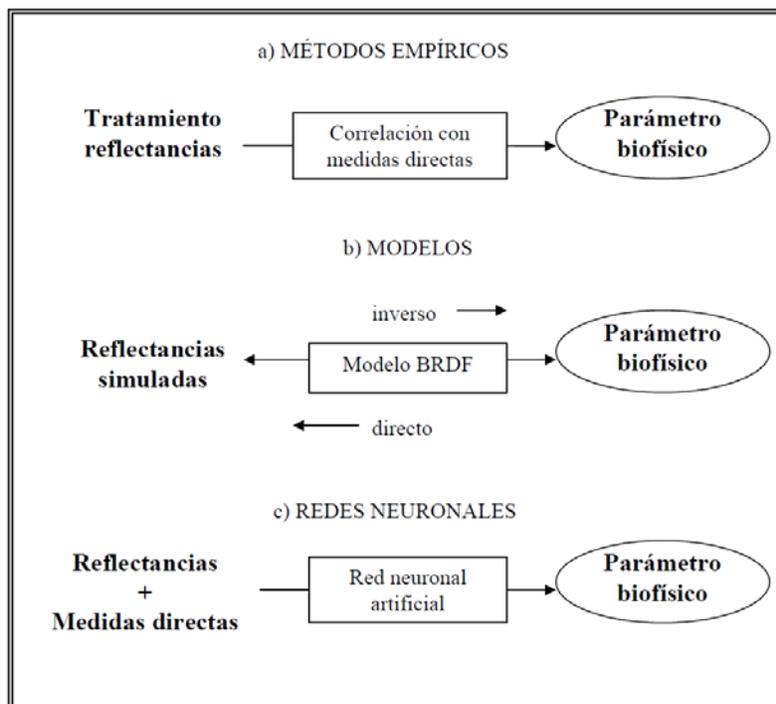


Figura 1.1 Métodos de extracción de variables biofísicas mediante teledetección

1.3 METODOS EMPIRICOS

1.3.1 Análisis multiespectral: combinación de bandas

Se basan en la combinación algebraica de bandas en sus valores espectrales corregidos y calibrados radiométricamente (reflectancias) o no (niveles digitales). La idea es reducir la respuesta multivariante del sensor en un único valor por píxel que pueda correlacionarse con éxito con un parámetro biofísico como biomasa, producción, área foliar, etc.

Los diferentes índices de vegetación se correlacionan bien con la biomasa vegetal y el índice de área foliar en cubiertas agrícolas, ya que frecuentemente son sinónimos de vigor y salud de las mismas; y son una buena base para calcular parámetros biofísicos de las plantas. Sin embargo, producen serias ambigüedades en la identificación de especies, ya que diferentes plantas con muy distinta morfología pueden presentar valores similares en los índices. Es imprescindible, por tanto, el conocimiento del momento fenológico de la especie y otros datos como las características del suelo, las prácticas agrícolas o el factor climático. También es frecuente trabajar con índices de vegetación de series temporales de datos que coinciden con medidas de campo.

1.4 APLICACIÓN DE MODELOS

1.4.1 Reflectancia y BRDF

Las interacciones de la energía electromagnética que incide en una superficie están gobernadas por la BRDF. Es una propiedad física intrínseca fundamental que rige el comportamiento de la reflectancia de una superficie. La BRDF se formula como el cociente entre la radiancia dispersada por una superficie en una dirección dada medida sobre una unidad de superficie y la irradiancia incidente (con un ángulo determinado) sobre la misma.

Esta función describe cómo la aparente reflectancia de una superficie varía según el ángulo con el que es iluminada y observada por el sensor. Aunque la BRDF no puede

ser medida directamente, medidas multidireccionales pueden proporcionarnos estimaciones aproximadas de la misma. Se requiere, por tanto, algún tipo de modelo que permita interpolar entre un grupo de medidas de la reflectancia direccional y extrapolarlo a un conjunto mayor, de manera que se pueda predecir la “forma” general de la BRDF. Son los llamados modelos de transferencia radiativa. Idealmente, el modelo debe expresarse en términos de cantidades físicas medibles (por ejemplo un conjunto de medidas de LAI), y debe ser “invertible” para que se pueda estimar valores de esas mismas cantidades a partir de medidas de la reflectancia direccional.

1.4.2 Modelos de cobertura y modelos de hoja

Los modelos que simulan la BRDF es aquel que integra una serie de elementos físicos de signatura espectral conocida, a partir de cuyas medidas se pueden obtener valores teóricos de reflectancia. Referidos a vegetación, los parámetros que se miden pueden ser muy variados: el LAI, la cobertura, parámetros morfológicos (altura o diámetro), clorofila y otros componentes bioquímicos, indicadores de actividad fotosintética, etc. La abundancia y complejidad de parámetros hace complicado el diseño y la elección del modelo, así como su computación. El modelo ideal debería tener un mínimo número de parámetros físicos ajustables y ser capaz de describir un alto rango de anisotropías de la superficie

1.4.3 Inversión de modelos

La reflectancia de una cubierta es un modelo de transferencia radiativa -el llamado ‘problema directo’. Se estima la reflectancia a partir del parámetro físico de la cubierta, se invierte el modelo y se estima dicho parámetro físico.

Uno de los desarrollos más prometedores en la inversión de modelos es la utilización de los modelos de reflectancias multiangulares (Pinty *et al.*, 2002) e hiperespectrales (Meroni *et al.*, 2004), tanto procedentes de sensores remotos como a escala terreno (Casa and Jones, 2004).

1.5 REDES REURONALES

Las redes neuronales se aplican para obtener el parámetro físico una vez obtenidas las reflectancias por un método de inversión, por ejemplo; también para resolver el propio modelo de inversión y obtener las reflectancias simuladas, o bien formando parte de un proceso híbrido entre ambos. Este método integra la información del parámetro biofísico en el terreno y la reflectancia en las bandas (simulada o no), y necesita de un conjunto amplio de medidas sobre el terreno con buena calidad si se quieren obtener resultados óptimos. Las redes neuronales artificiales son apropiadas cuando es difícil establecer un modelo que relacione las variables, pero tienen el problema de que cada modelo es único para el caso que se aplique.

También se aplican, con menor frecuencia, redes bayesianas (probabilísticas) para la extracción del LAI.

En general la tecnología de los sensores remotos permite el seguimiento del crecimiento y desarrollo de la vegetación, mediante relaciones empíricas que calculan entre las variables biofísicas de los cultivos y los índices de vegetación espectrales (IV) (Verstraete y Pinty, 1996). La mayoría de los IV están con base en el alto contraste entre la banda del rojo (R) y la del infrarrojo cercano (IRC) para la vegetación (Tucker, 1979).

Los índices de vegetación están influenciados principalmente por los efectos atmosféricos, la geometría sol-sensor y la mezcla suelo-vegetación. En particular, la variación en el brillo y color del suelo de fondo es muy importante para determinar variables biofísicas. Para reducir el efecto se han diseñado diferentes IV que minimizan la respuesta del índice a una misma cantidad de cubierta vegetal variando las condiciones del suelo de fondo, como los índices GESAVI (Gilabert *et al.*, 2002) y el NDVI_{cp} (Paz *et al.*, 2007), cuyo rango de validez está limitado hasta una primera fase exponencial de los patrones (geometría o funciones) espectrales que se asocian al crecimiento de la vegetación (curvas iso-IAF). Romero *et al.* (2009) generalizan el NDVI_{cp} para el caso de las fases exponencial y lineal (hasta el IAF máximo) usando el índice IV_CIMAS. Los índices NDVI_{cp} e IV_CIMAS se diseñaron en función de los patrones espectrales de las líneas iso-IAF y son versiones mejoradas de otros índices

publicados (Paz *et al.*, 2007; Romero *et al.*, 2009), bajo el mismo esquema de modelación.

1.6 LITERATURA CITADA

- Allen, R. G., Tasumi, M., Morse, A. and Trezza, R. 2005. A Landsat-based Energy Balance and Evapotranspiration Model in Western US Water Rights Regulation and Planning. *Journal of Irrigate and Drainage System* 19(3-4): 251-268.
- Asner, G. P., Scurlock, J. M., & Hicke, J. A. 2003. Global synthesis of leaf area index observations: Implications for ecological and remote sensing studies. *Global Ecology and Biogeography* 12, 91-205.
- Blackburn, G. A. 2007. Hyperspectral remote sensing of plant pigments. *Journal of Experimental Botany*, Vol. 58, No. 4, pp. 855–867.
- Casa, R. and Jones, H. G. 2004. Retrieval of crop canopy properties: a comparison between model inversion from hyperspectral data and image classification. *International Journal of Remote Sensing* 25, Number 6, March 20, 2004, pp. (6): 1119-1130.
- Doraiswamy, P. C., Hatfield, J. L., Jackson, T. J., Akhmedov, B., Prueger, J. and Stern, A. 2004. Crop condition and yield simulations using Landsat and MODIS. *Remote Sensing of Environment* 92: 548-559.
- Doraiswamy, P. C., Hollinger, S., Sinclair, T. R., Stern, A., Akhmedov, B. and Prueger, J. 2002. Application of MODIS-derived parameters for regional yield assessment. *Proceedings of SPIE* 4542: 1-8.
- Ehlers, M., Gähler, M. and Janowsky, R. 2003. Automated analysis of ultra high resolution remote sensing data for biotope type mapping: new possibilities and challenges. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 57: 315-326.
- Essa, S. 2004. GIS modelling of land degradation in Northern-Jordan using Landsat imagery. XXth ISPRS Congress. Commission 4, Istanbul, Turkey
- Gilabert, M. A., J. González, F. J. García, and J. Meliá. 2001. A generalized soil- adjusted vegetation index. *Remote Sensing of Environment* 82: 303-310.

- Green, E. P., P. J Mumby, A. J. Edwards & C.D. Clark. 2000. *Remote Sensing Handbook for Tropical Coastal Management*. Vol. 3. Ed. UNESCO (Paris).
- Gutman, G.G. 1991. *Vegetation indices from AVHRR: An update and future prospects*. *Remote Sensing of Environment* 35, 121–136.
- Haboudane, D., Bonn, F., Royer, A., Sommer, S. and Mehl, W. 2002. Land degradation and erosion risk mapping by fusion of spectrally based information and digital geomorphometric attributes. *International Journal of Remote Sensing* 18: 3795-3820.
- Hernández-Clemente, R., Navarro-Cerrillo, R. M., Suárez, L., Morales, F., & Zarco-Tejada, P. J. 2011. Assessing structural effects on PRI for stress detection in conifer forests. *Remote Sensing of Environment* 115, 2360-2375.
- Hese, S., Lucht, W., Schmillius, C., Barnsley, M. J., Dubayah, R., Knorr, D., Neumann, K., Riedel, T. and Schroter, K. 2005. Global biomass mapping for an improved understanding of the CO₂ balance - the Earth observation mission Carbon-3D. *Remote Sensing of Environment* 94: 94-104.
- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X. and Ferreira, L. G. 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment* 83:195-213.
- Jacquemoud S. & F. Baret. 1990. *PROSPECT: a model of leaf optical properties spectra*. *Remote Sensing. Environment* 34: 75-91.
- Kuusk, A. 1998. Monitoring of vegetation parameters on large areas by the inversion of a canopy reflectance model. *International Journal of Remote Sensing* 19: 2893-2905.
- Lacar, F. M., Lewis, M. M. and Grierson, I. T. 2001. Use of hyperspectral reflectance for discrimination between grape varieties. *International Geoscience & Remote Sensing Symposium*, Sydney, Australia.

- Le Maire G., François C., Soudani K., Berveiller D., Pontailier J., Bréda N., Genet H., Davi H., Dufrêne E. 2008. Calibration and validation of hyperspectral indices for the estimation of broadleaved forest leaf chlorophyll content, leaf mass per area, leaf area index and leaf canopy biomass. *Remote Sensing of Environment* 112:3846–3864
- Luther, J. E., Fournier, R. A., Hall, R. J., Ung, C. H., Guindon, L., Piercey, D. E., Lambert, M. C. and Beaudoin, A. 2002. A Strategy for Mapping Canada's Forest Biomass with Landsat TM Imagery. IGARSS, Toronto, Canada.
- Main, R., Cho, M. A., Mathieu, R., O'Kennedy, M. M., Ramoelo, A., & Koch, S. 2011. An investigation into robust spectral indices for leaf chlorophyll estimation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 66: 751-761.
- Martínez de Santa Olalla, F., Calera, A. and Domínguez, A. 2003. Monitoring irrigation water use by combining Irrigation Advisory Service and remotely sensed data with a geographic information system. *Agricultural Water Management* 61: 111-124.
- Meroni, M., Colombo, R. and Panigada, C. 2004. Inversion of a radiative transfer model with hyperspectral observations for LAI mapping in poplar plantations. *Remote Sensing of Environment* 92: 195– 206.
- Moorthy I., Miller J. R., & Noland T. L. 2008. Estimating chlorophyll concentration in conifer needles with hyperspectral data: An assessment at the needle and canopy level. *Remote Sensing of Environment* 112: 2824-2838.
- Moreau, S. and Le Toan, T. 2003. Biomass quantification of Andean wetland forages using ERS satellite SAR data for optimizing livestock management. *Remote Sensing of Environment* 84: 477-492.
- Morissette J. T., F. Baret & J. L. Privette. 2006. *Validation of global moderate-resolution LAI products: a framework proposed within the CEOS land product validation subgroup*. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44, No. 7, July.

- Nagler, P. L., Cleverly, J., Glenna, E., Lampkin, D., Huete, A. and Wan, Z. 2005. Predicting riparian evapotranspiration from MODIS vegetation indices and meteorological data. *Remote Sensing of Environment* 94:17-30.
- Nemani, R., Pierce, L., Running, S., Band, L. 1993. Forest ecosystem processes at the watershed scale: sensitivity to remotely sensed leaf-area index estimates. *International Journal of Remote Sensing* 14 (13), 2519-2534.
- Paz, F., E. Palacios, M. Bolaños, L. A. Palacios, M. Martínez, E. Mejía, y A. Huete. 2007. Diseño de un índice espectral de la vegetación: NDVI_{cp}. *Agrociencia* 41: 539-554.
- Peddle, D. R., Hall, F. R., & LeDrew, E. F. 1999. Spectral mixture analysis and geometric-optical reflectance modelling of boreal forest biophysical structure. *Remote Sensing of Environment* 67:288-297.
- Pekkarinen, A. 2002. A method for the segmentation of very high spatial resolution images of forest landscapes. *International Journal of Remote Sensing* 23(14): 2817-2836.
- Reichstein, M., Tenhunen, J., Roupsard, O., Ourcival, J. M., Rambal, S., Miglietta, F., Peressotti, A., Pecchiari, M., Tirone, G., and Valentini, R. 2003. Inverse modeling of seasonal drought effects on canopy CO₂/H₂O exchange in three Mediterranean ecosystems. *Journal of Geophysical Research*. 10:108(D23), 4726.
- Romero, E., F. Paz, E. Palacios, M. Bolaños, R. Valdez, y A. Aldrete. 2009. Diseño de un índice espectral de la vegetación desde una perspectiva conjunta de los patrones exponenciales y lineales del crecimiento. *Agrociencia* 43: 291- 307.
- Sakamoto, T., Yokozawa, M., Toritani, H., Shibayama, M., Ishitsuka, N. and Ohno, H. 2005. A crop phenology detection method using time-series MODIS data. *Remote Sensing of Environment* 96: 366-372.
- Schulzt, G. A. and Engman, E. T. 2000. *Remote sensing in hydrology and water management*. Berlin, Springer-Verlag.

- Steven, M. D., T. J. Malthus, F. Baret, H. Xu & M. J. Chopping. 2003. *Intercalibration of vegetation indices from different sensor systems*. Remote Sensing of Environment 88: 412-422.
- Tan, Q., Shao, Y., Yang, S. and Wei, Q. 2003. Wetland Vegetation Biomass Estimation Using Landsat-7 ETM+ Data. IGARSS, IEEE International
- Teillet, P. M., Staenz, K., & Williams, D. J. 1997. Effects of spectral, spatial, and radiometric characteristics on remote sensing vegetation indices of forested regions. Remote Sensing of Environment 61:139-149.
- Tucker, C. J. 1979. Red and photographic infrared linear combination for monitoring vegetation. Remote Sensing of Environment 8:127-150.
- Verhoef, W. 1984. *Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modeling: the SAIL model*. Remote Sensing of Environment 16: 25-141.
- Verstraete, M. M., and B. Pinty. 1996. Designing optical spectral indexes for remote sensing applications. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 34: 1254-1265.
- Xiao, X., Boles, S., Liu, J., Zhuang, D., Frohling, S., Li, C., Salas, W. and Moore III, B. 2005. Mapping paddy rice agriculture in southern China multi-temporal MODIS images. Remote Sensing of Environment 95:480-492.
- Zarco-Tejada, P. J., Miller, J. R., Mohammed, G. H., Noland, T. L., & Sampson, P. H. 2001. Scaling-up and Model Inversion methods with narrow-band Optical Indices for Chlorophyll Content Estimation in closed Forest Canopies with Hyperspectral Data. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 39:1491-1507.
- Zhan, X., Sohlberg, R. A., Townshend, J. R. G., DiMiceli, C., Carroll, M. L., Eastman, J. C., Hansen, M. C. and DeFries, R. S. 2002. Detection of land cover changes using MODIS 250 m data. Remote Sensing of Environment 83:336–350.

1.7 OBJETIVOS

1.7.1 OBJETIVO GENERAL

Modelar el desarrollo de la vegetación herbácea mediante el uso de sensores remotos para estimar variables biofísicas al utilizar información espectral en la región/banda R e IRC como base para el establecimiento de sistemas de monitoreo de vegetación y estimación de biomasa aérea

1.7.2 OBJETIVOS PARTICULARES

1. Utilizar los sensores remotos para la estimación de variables biofísicas que caractericen el estado de desarrollo de estratos de vegetación.
2. Desarrollar la metodología de un Sistema de Monitoreo Básico de Vegetación para caracterizar los patrones temporales de crecimiento utilizando sensores remotos a partir de información de variables biofísicas.
3. Desarrollar una metodología experimental para la estimación de la cobertura aérea de la vegetación herbácea a partir de información contenida en los sensores remotos y comprobar su funcionamiento con información de variables de control.
4. Desarrollar una metodología de monitoreo de estratos de vegetación utilizando sensores remotos para tres esquemas de muestreo de utilidad para la actividad ganadera actual.
5. Validar el uso de índices de vegetación para la estimación de capacidad de carga animal en agostaderos utilizando información espectral obtenida a través de empleo de sensores remotos.

1.8 HIPOTESIS

El uso correcto de la información obtenida por los sensores remotos en las regiones espectrales que corresponden a la banda del R e IRC, permite estimar y validar variables biofísicas en estratos de vegetación, que sirven para planeación de la actividad ganadera bajo el paradigma de la sustentabilidad ambiental.

CAPITULO 2: BASES PARA EL DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITOREO DE LA VEGETACION USANDO SENSORES REMOTOS

2.1 INTRODUCCION

El desarrollo de un sistema de monitoreo satelital debe considerar la información satelital disponible (sin costo) y los requerimientos de monitoreo de los usos del suelo y la vegetación (USV) a diferentes escalas y con diferentes impactos en la dinámica del carbono, agua y biodiversidad.

Las variables biofísicas como cobertura aérea de la vegetación (f_v), índice de área foliar (IAF) o biomasa aérea (B) son parámetros críticos que requieren estimarse para la evaluación de los servicios hidrológicos, la emisión y remoción del carbono en la vegetación y la biodiversidad. Los sensores remotos, por su capacidad de visitar varias veces el mismo sitio (pixel) de la superficie terrestre permiten caracterizar los patrones temporales del crecimiento de la vegetación, en términos espectrales.

El uso de la información espectral contenida en las imágenes satelitales para estimar variables biofísicas se fundamenta en los sistemas de monitoreo robustos y confiables, de tal forma que sea posible generar datos sobre el estado de la vegetación y, a través del análisis intra e interanual determinar procesos de deforestación, degradación forestal, regeneración, conservación, etc.

Para su viabilidad operativa, los sistemas de monitoreo satelital se deben con base en imágenes satelitales con suficiente cobertura temporal, preferentemente diaria, y resolución espacial. Así, en este trabajo se discute el uso del sensor MODIS, con resolución espacial a NADIR de 250 m x 250 m y resolución temporal de un día. Las bases teóricas y experimentales de la utilización de índices espectrales de la vegetación se analizaron y al final se revisó la implementación operativa del sistema de monitoreo.

2.2 INDICES ESPECTRALES DE LA VEGETACION

Los patrones espectrales del crecimiento de un cultivo en el espacio del rojo (R) y del infrarrojo cercano (IRC), han sido discutidos ampliamente por Paz *et al.* (2005a y 2007) como se muestra en la Figura 2.1

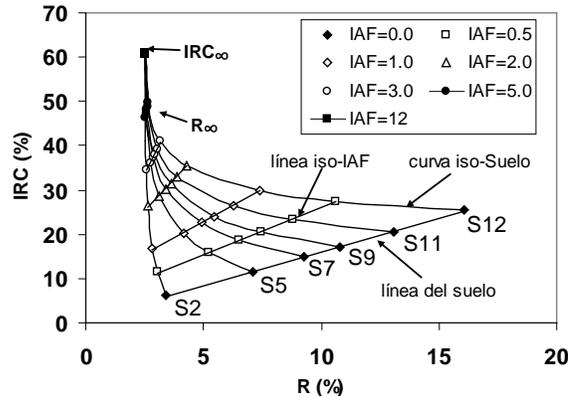


Figura 2.1. Patrones espectrales del crecimiento de un cultivo en el espacio del R-IRC.

Paz *et al.*, (2014 y 2015) discuten las limitaciones de los IV con base en las pendientes de las líneas de igual vegetación y definen caminos para reducir su impacto. Romero *et al.* (2009) propusieron una generalización de los IV que usan una perspectiva conjunta de los patrones exponenciales y lineales que se asocian a los parámetros de las líneas iso-IAF, que aunque permite un enfoque más general. Que adolecen de los problemas de falta de sensibilidad de las pendientes de las líneas iso-IAF para valores grandes del IAF.

Considerando el problema de saturación de la banda del R para la vegetación densa, tal como en bosques/selvas y pastizales cultivados, y la problemática que se asocia al desarrollo de IV generalizados (IVg) con base en las líneas iso-IAF. Se utilizó el enfoque desarrollado por Paz *et al.*, (2011) al usar los patrones de las curvas iso-Suelo (Figura 2.1) y se explican con las siguientes funciones:

$$\begin{aligned}
IVg &= -\ln\left(\frac{dIRC_{\infty} - dIRC}{dIRC_{\infty} - dIRC_s}\right) \\
dIRC &= IRC - (a_s + b_s R) \\
dIRC_{\infty} &= IRC_{\infty} - (a_s + b_s R_{\infty}) \\
dIRC_s &= IRC_s - (a_s + b_s R_s)
\end{aligned}
\tag{2.1}$$

donde a_s y b_s son las constantes de la línea del suelo (Figura 2.1), R_{∞} e IRC_{∞} son las reflectancias en el infinito o de medio ópticamente denso (Figura 2.1) y R_s e IRC_s son los valores asociados a la línea del suelo ($IRC_s = a_s + b_s R_s$).

Conocidos los parámetros de la línea del suelo (o supuestos de cómo se asocian a una línea del suelo “virtual”), entonces se tiene que $dIRC_s = 0$, por lo que la ecuación (2.1) se simplifica a:

$$IVg = -\ln\left(1 - \frac{dIRC}{dIRC_{\infty}}\right)
\tag{2.2}$$

Al usar las simulaciones radiativas que se muestran en la Figura 2.1, la Figura 2.2 muestra la relación entre el IVg y el IAF (índice de área foliar) para el caso de un suelo oscuro y uno claro, ambos con efectos simulados de cambios de humedad de un estado seco a uno húmedo. Se observa que las variaciones en los cambios de las propiedades ópticas de los suelos (humedad) tienen un efecto bajo en los patrones de la relación, por lo que a nivel de análisis de píxel x píxel (nuestro caso), se puede usar el IVg en forma confiable, con efectos mínimos del suelo abajo de la vegetación.

El término “Estimado” significa que se han usado los parámetros (a_s , b_s y $dIRC_{\infty}$) obtenido directamente de los datos y el término “Virtual” significa que se han usado parámetros virtuales ($a_s = 0$, $b_s = 1$, $dIRC_{\infty} =$ valor arbitrario, pero mayor de 50 %) (Figura 2.2). El uso de parámetros estimados o virtuales genera patrones similares, por lo que el uso de parámetros virtuales puede ser confiables. En el caso del $dIRC_{\infty}$, el uso de valores > 75 % producen una relación no-lineal (bi-lineal), por lo que se recomienda el uso de un $dIRC_{\infty}$ virtual entre 60 y 70 %.

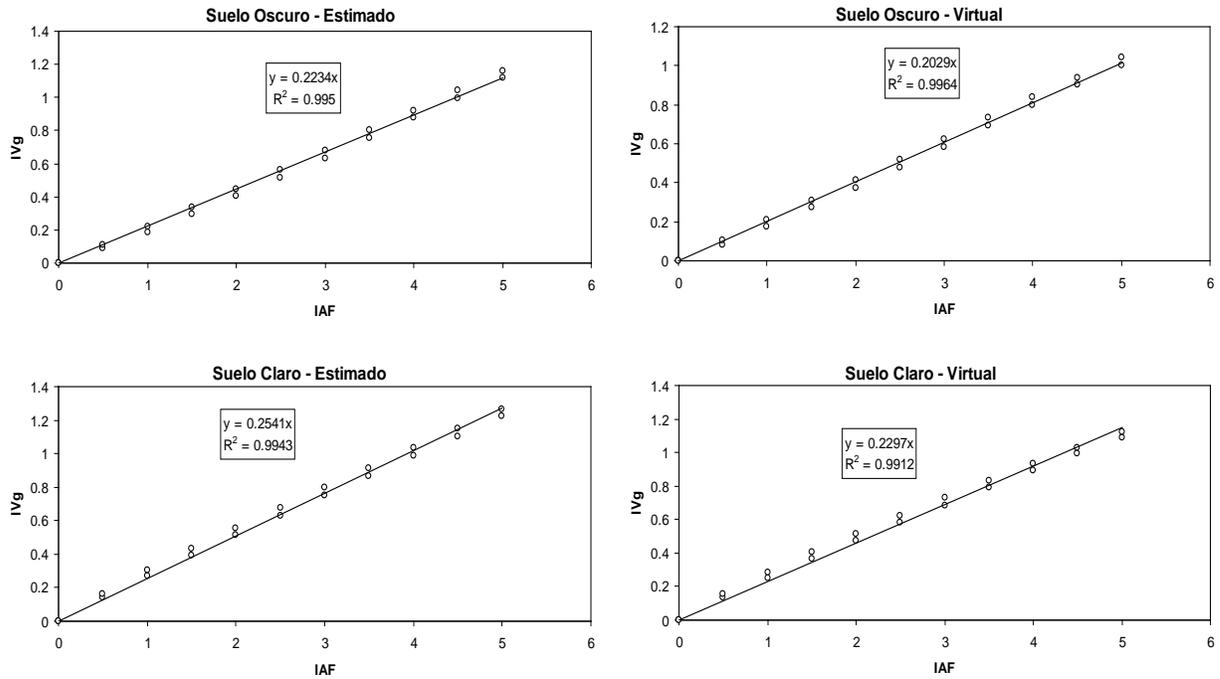


Figura 2.2. Relación entre el IVg y el IAF para un suelo claro y uno oscuro usando simulaciones radiativas

Los patrones del IVg que se asocian con IAF se pueden analizar utilizando los datos del experimento de algodón de Huete *et al.*, (1985) y el de maíz de Bausch (1993), reportado por Paz *et al.*, (2007 y 2011).

En la Figura 2.3 se muestran los patrones espectrales del experimento de maíz en el espacio del R-IRC para un suelo claro (suelo O) y uno oscuro (suelo C), bajo la condición de humedad seca y húmeda del suelo.

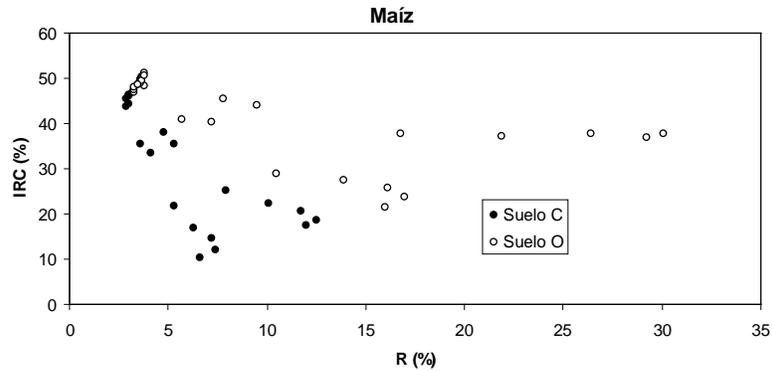


Figura 2.3. Patrones espectrales del crecimiento del maíz para un suelo oscuro y uno claro, bajo dos condiciones de humedad del suelo (seco y húmedo).

En la Figura 2.4 se muestra la misma información que en la Figura 2.3, pero para el experimento de maíz con tres suelos secos.

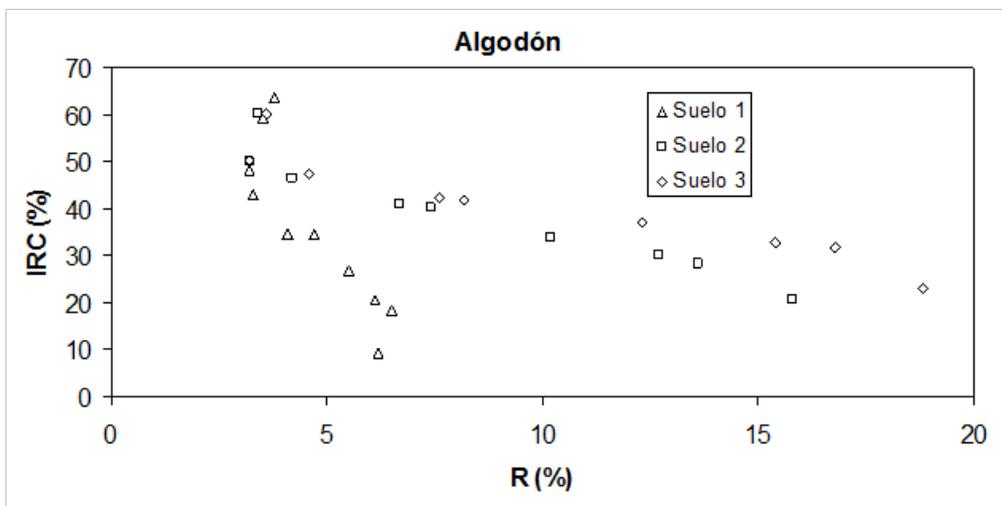
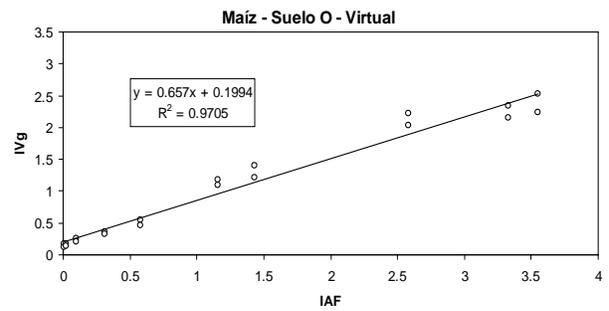
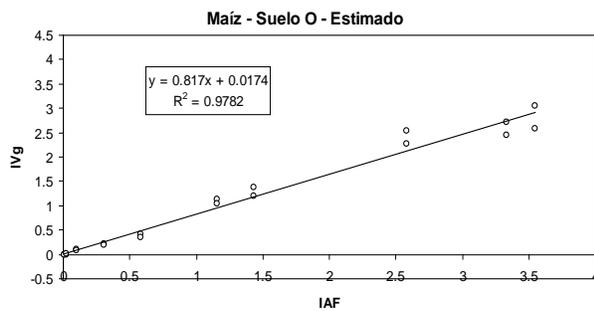
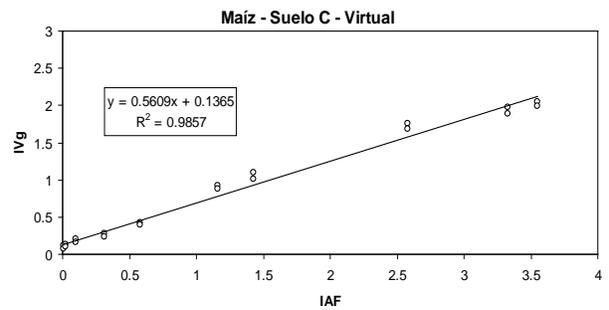
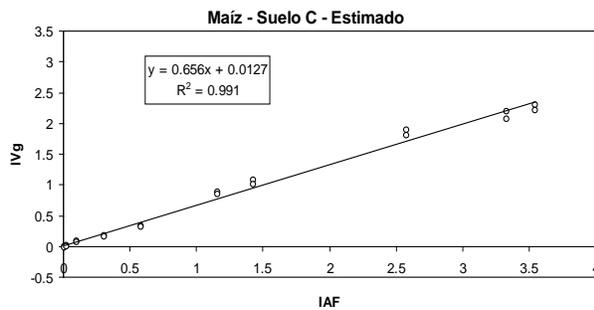


Figura 2.4. Patrones espectrales del crecimiento del algodón para tres suelos secos.

En la Figura 2.5 se muestra la relación entre el IAF y el IVg para el caso del experimento de maíz y la Figura 2.6 para el experimento de algodón.



Nota: IAF es un Índice de área foliar, IVg: Índice de Vegetación generalizado

Figura 2.5. Relación entre el IAF y el IVg para el experimento del maíz.

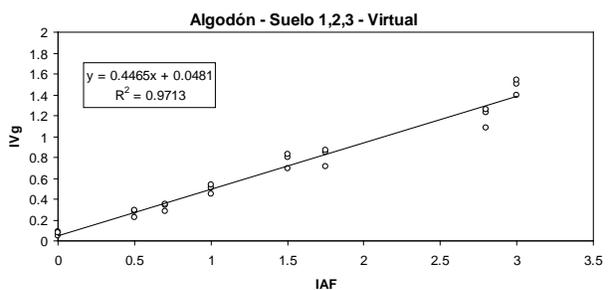
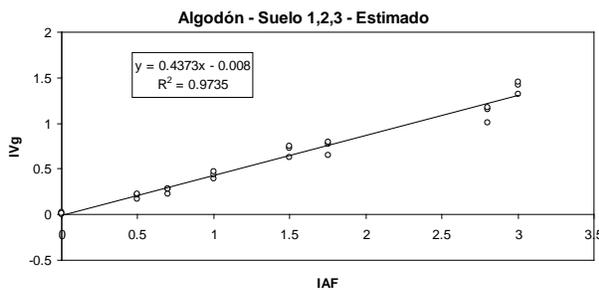


Figura 2.6. Relación entre el IAF y el IVg para el experimento del algodón.

Se observa de las Figuras 2.5 y 2.6 que la relación entre el IAF y el IVg es de tipo lineal, aún en una porción de la etapa reproductiva del crecimiento, donde las propiedades ópticas y/o geométricas del follaje cambian. Asimismo, se observa que el efecto del suelo (cambio de humedad) y de varios tipos de suelos (simulando cambios más drásticos en la humedad u otra propiedad asociada a las reflectancias). La evidencia experimental soporta el uso del IVg como un índice espectral de la vegetación con la propiedad de

tener una relación lineal con el IAF (y la biomasa B_m , suponiendo una relación lineal entre el IAF y B_m).

En las Figuras 2.5 y 2.6 no se muestran las relaciones entre el IAF y el IVg para valores más altos del IAF, porque implicaban cambios en las propiedades ópticas y/o geométricas del follaje. De acuerdo a la evidencia experimental, el IVg no muestra problemas de saturación de la banda del R y llega al punto de saturación cuando el IRC alcanza el IRC^∞ , que define el límite de uso de los sensores remotos en el monitoreo y caracterización de la vegetación.

El IVg, también denominado IVIS (Índice de Vegetación basado en curvas Iso-Suelo) (Paz *et al.*, 2011), permite parametrizar la curva de crecimiento de la vegetación.

2.3 Estandarización de los efectos de la geometría sol-sensor

La estandarización de los efectos de la geometría sol-sensor es un requisito para la obtener los índices espectrales de la vegetación homogéneos, particularmente para el caso del sensor MODIS. Así, al usar la geometría definida en la Figura 2.7, donde θ_s es el ángulo cenital solar, ϕ_s es el ángulo azimutal solar, θ_v es el ángulo cenital de visión y ϕ_v el ángulo azimutal de visión, así se puede usar un esquema de modelación que asocia esta geometría, pero se simplifica al utilizar simetrías angulares.

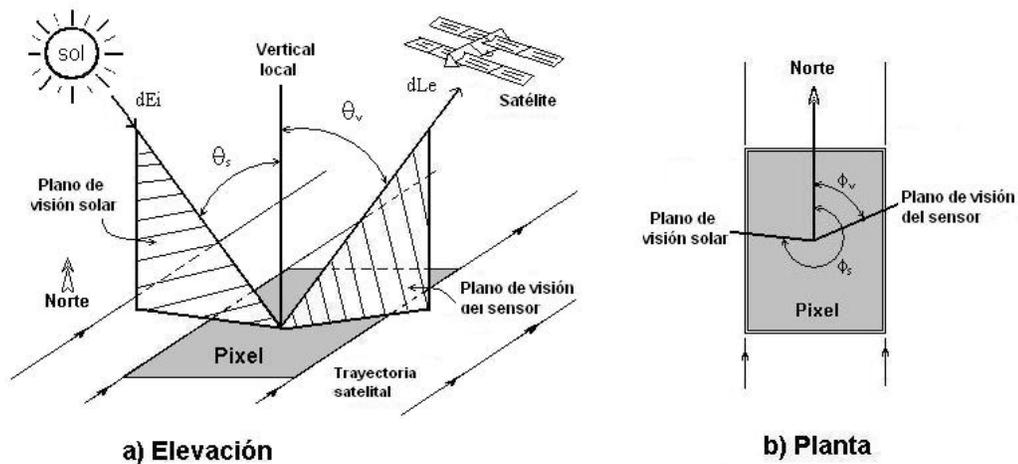


Figura 2.7. Geometría sol-sensor de iluminación y visión.

Para desarrollar un modelo general de la BRDF aplicable a todas las bandas espectrales, se utilizó un plano de simetría genérico. El plano de simetría seleccionado fue $\chi = 90 - \theta_v + \theta_s$, donde θ_v no tiene signo. Las reflectancias normalizadas están definidas como $R_n = R \cos(\chi)$ (más adelante se utiliza R para referirse a solo la banda del R).

Bolaños *et al.* (2007) y Bolaños y Paz (2010) plantearon el uso de un modelo de los ángulos cenitales de visión e iluminación de un solo parámetro, reduciendo así la complejidad de los esquemas de clasificación de la vegetación. Así, si definimos el vector de visión (θ_v, ϕ_v) y el de iluminación (θ_s, ϕ_s), donde θ es un ángulo cenital y ϕ el azimutal, con v significando visión y s iluminación solar, el modelo definido está dado por:

$$\begin{aligned}\chi &= 90 - \theta_v + \theta_s \\ R_n &= \ln(R) \cos(\chi) \\ \chi &= f + gR_n\end{aligned}\tag{2.3}$$

donde se utiliza un valor de $f = 90$ para obtener un punto adicional y así estimar b. El uso de la función $\cos(\chi)$ como factor multiplicativo de R permite definir un punto del patrón $R_n - \chi$, ya que $\cos(90^\circ) = 0$, por lo que $R_n = 0$ en $\chi = 90^\circ$ ($\theta_v = \theta_s$; es decir, el plano del *Hot Spot*). El ángulo θ_v no tiene signo.

De las relaciones (2.3), el parámetro g se puede estimar con un solo dato de R (cualquier banda espectral):

$$g = \frac{90 - \chi}{R_n}\tag{2.4}$$

Al usar la notación de ángulos azimutales positivos en la dirección de las manecillas del reloj, es posible un modelo general de la BRDF (Función de Distribución de la Reflectancia Bidireccional) que considera al parámetro g de los efectos de los ángulos cenitales de visión e iluminación:

$$\text{Si } \phi_s < \phi_v, d\phi = 360 - (\phi_v - \phi_s)$$

$$\text{Si } \phi_s \geq \phi_v, d\phi = (\phi_v - \phi_s)$$

$$\text{Si } d\phi \leq 180, d\phi_p = d\phi$$

$$\text{Si } d\phi > 180, d\phi_p = 360 - d\phi$$

$$\text{Si } d\phi_p \leq 90, \zeta = d\phi_p + \theta_s$$

$$\text{Si } d\phi_p > 90, \zeta = d\phi_p - \theta_s$$

$$gn = g \cos(\zeta) \tag{2.5}$$

$$\zeta = 90 + Ggn$$

El modelo de las relaciones (2.5) sigue el mismo esquema que el de las (2.3), donde ζ es una variable de posición que hace simétricos los patrones de g . Los ángulos cenitales θ_s (*Hot Spot*) son considerados en términos de sus posiciones: plano (semi-hemisferio) de iluminación y sombreado. En el caso del sensor MODIS, la convención usada por NASA es $d\phi = \phi_v - 180 - \phi_s$.

Al igual que en el caso del parámetro g , G puede ser estimada de:

$$G = \frac{\zeta - 90}{gn} \tag{2.6}$$

Conocido el valor de g de la relación (2.4) y el de G de la relación (2.6), usando un solo dato de R e IRC, para una geometría sol-sensor dada, el siguiente paso es estandarizar la geometría. Para eso se puede usar el plano principal, $d\phi = 0$ y usar las relaciones (2.5) para estimar el parámetro g , para el ángulo cenital de iluminación actual:

$$g\{d\phi = 0\} = \frac{\theta_s - 90}{G \cos(\theta_s)} \tag{2.7}$$

Con el valor de g para $d\phi=0$, podemos estimar ahora el valor de la reflectancia normalizada a nadir ($\theta_v = 0$) de las relaciones (2.4):

$$Rn\{\theta v = 0; d\phi = 0\} = -\frac{\theta v}{g\{d\phi = 0\}} \quad (2.8)$$

De las relaciones (2.3), la reflectancia no normalizada estará dada por:

$$R\{\theta = 0; d\phi = 0\} = \exp\left[\frac{Rn\{\theta v = 0, d\phi = 0\}}{\cos(90 + \theta v)}\right] \quad (2.9)$$

Así, para una geometría estandarizada de $\theta v = 0$ y $d\phi = 0$, se puede definir un valor de las reflectancias para un θv estandarizado. En este caso, el valor usado es $\theta v = 0$. En el algoritmo usado en el proceso de MODIS se considera la estandarización de la geometría sol-sensor usando $\theta s = 30$, $\theta v = 0$ y $d\phi = 0$

2.4 Minimización de los efectos atmosféricos en el IVg

Los efectos atmosféricos sobre las bandas espectrales del R e IRC se puede aproximar con las siguientes relaciones (Paz *et al.*, 2005b):

$$\begin{aligned} Ra &= a_R + b_R R \\ IRCa &= a_{IRC} + b_{IRC} IRC \end{aligned} \quad (2.10)$$

donde la letra *a* en R e IRC significa con efecto atmosférico; las constantes *a* y *b* aproximan la radianza de trayectoria y la transmitancia de doble vía, en términos efectivos, de la atmósfera.

Paz *et al.* (2005b) han demostrado que:

$$\frac{dIRCa}{dIRC} = b_{IRC} \quad (2.11)$$

donde *dIRCa* tiene efectos atmosféricos y está definida en función de la línea del suelo con efectos atmosférico. Así, de las ecuaciones (2.10) y (2.11), tenemos que IVg es invariante bajo efectos atmosféricos:

$$IVg = IVga \quad (2.12)$$

La invarianza bajo efectos atmosféricos requiere de conocer los parámetros de las líneas del suelo con y sin atmosfera, por lo que resulta difícil de aplicarse en términos operacionales en imágenes del sensor MODIS (píxeles de 6.25 ha).

Un procedimiento alternativo para reducir los efectos atmosféricos en los IVg es usar una línea virtual del suelo, similar para con y sin efectos de la atmósfera. Así, al usar una línea del suelo virtual $IRC = b_s R$ ($a_s = 0$) y las relaciones (2.10) podemos definir a dIRC:

$$\begin{aligned} dIRC &= IRC - b_s R \\ dIRC a &= a_{IRC} + b_{IRC} - b_s a_R - b_s b_R R \end{aligned} \quad (2.13)$$

Ahora bien, usando una línea iso-IAF, Figura 1, definida por:

$$IRC = a_0 + b_0 R \quad (2.14)$$

Se puede sustituir esta ecuación en la relación de dIRC, ecuación (2.13), y despejarla para R:

$$R = \frac{dIRC - a_0}{b_0 - b_s} \quad (2.15)$$

La ecuación (2.14) puede ahora sustituirse en la (2.13) para poner dIRCa en función de dIRC y simplificarse como:

$$\begin{aligned} dIRC a &= S + T dIRC \\ S &= (a_{IRC} - b_s a_R) + \left[\frac{b_s a_0}{(b_0 - b_s)} \right] (b_R - b_{IRC}) \\ T &= \left[\frac{b_0 b_{IRC} - b_s b_R}{(b_0 - b_s)} \right] \end{aligned} \quad (2.16)$$

De acuerdo con Paz *et al.*, (2005b y 2007), se tienen las siguientes condiciones:

$$\begin{aligned}
a_R &> a_{IRC} \\
b_R &< b_{IRC} \\
b_0 &\geq b_S \\
0 &< b_R \leq 1 \\
0 &< b_{IRC} \leq 1
\end{aligned}
\tag{2.17}$$

Por lo general, $b_S > 1$ (Baret *et al.*, 1983); aunque en este caso se usa un parámetro virtual con $b_S \leq 1$ para considerar situación de píxeles con poca vegetación.

De las relaciones (2.16) y (2.17) se tiene que $S < 0$ ($a_0 \geq 0$). Para evaluar a T se puede usar las relaciones entre b_R y b_{IRC} , tal como se muestra en la Figura 2.8 obtenida de simulaciones radiativas (Vermote *et al.*, 1997) con un ángulo cenital solar (θ_s) = 0, Altitud = 0, atmósfera tropical y aerosol continental, donde cada punto representa un espesor óptico atmosférico o visibilidad.

De los patrones determinados por Paz *et al.* (2008) para la relación entre b_R y b_{IRC} , la Figura 2.9 muestra b_R/b_{IRC} en relación al espesor óptico a 550 nm (T_{550}) para una atmósfera tropical y los aerosoles continental, desértico y de quema de biomasa (aerosol genérico), típicos en las aplicaciones de los sensores remotos en el monitoreo de la vegetación.

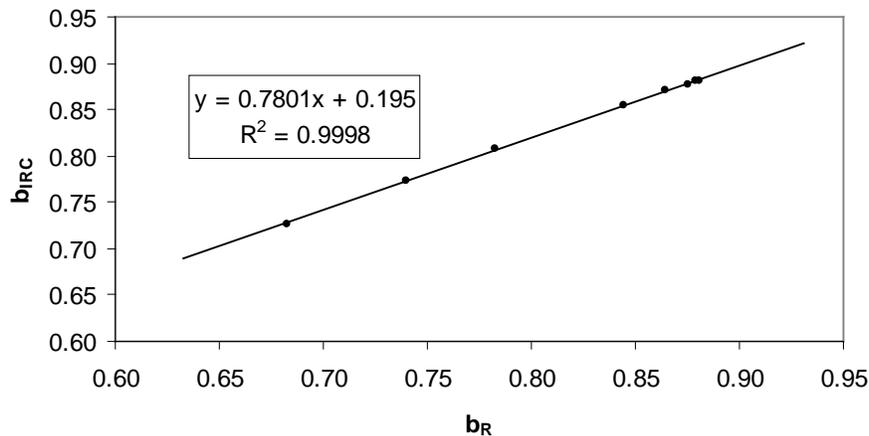


Figura 2.8. Relación entre b_R y b_{IRC} para simulaciones atmosféricas radiativas.

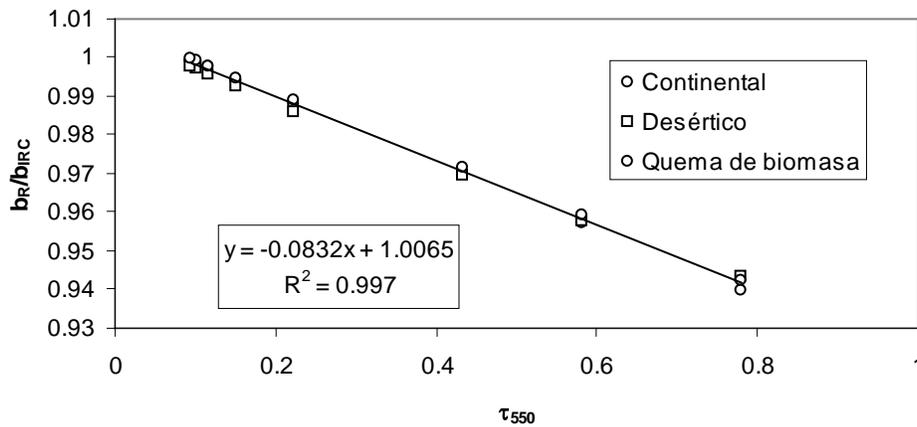


Figura 2.9. Relación entre b_R/b_{IRC} y τ_{550} para una atmósfera tropical y un aerosol genérico.

De la Figura 2.9, el aerosol genérico representa bien los tres tipos de aerosoles y define el patrón en relación a la turbiedad o visibilidad de la atmosfera (τ_{550}). En la Figura 2.10 se muestra la situación de diferentes modelos atmosféricos y el aerosol genérico. De esta figura puede concluirse que las variaciones de b_R/b_{IRC} con la visibilidad atmosférica son reducidas para los modelos atmosféricos y aerosoles de interés en las aplicación del monitoreo de la vegetación.

Para evaluar el parámetro T, ecuación (2.16), se puede usar la relación de la Figura 2.10, por ejemplo, y un valor de $b_s = 1$.

La Figura 2.10 muestra la relación entre b_0 y T para diferentes visibilidades atmosféricas (valores de b_R), que es discontinua en $b_0 = b_s$. Para valores de $b_0 < b_s$, $T < 1$ y para valores un poco mayores que b_s (1.3 en la Figura 2.11), se obtiene $T < 0$.

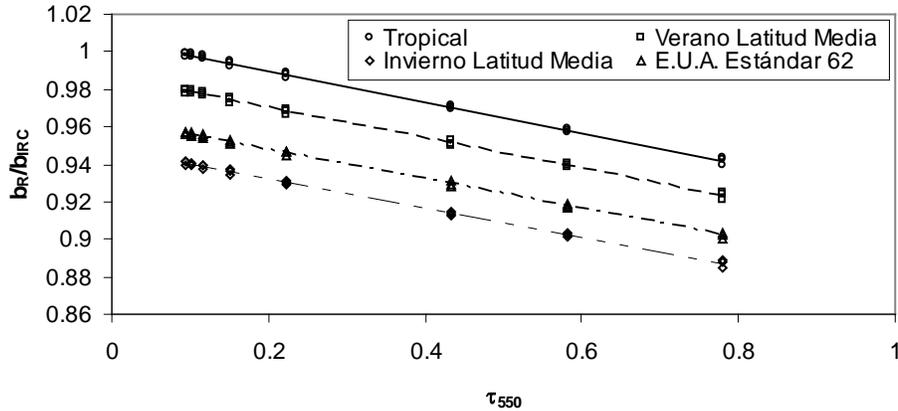


Figura 2.10. Relación entre $bR/bIRC$ y τ_{550} para varios modelos atmosféricos y un aerosol genérico.

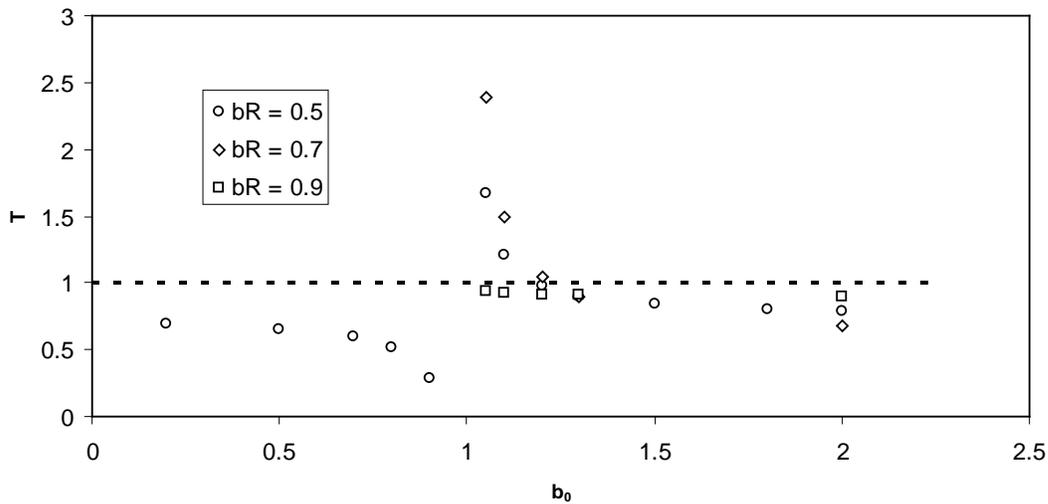


Figura 2.11. Relación entre b_0 y T para varias visibilidades atmosféricas.

De análisis similares a los de la Figura 2.11, cuando $b_0 > 1.5$ se tiene que $T < 1$. Al considerar, las líneas reales del suelo (y de residuos o vegetación seca) tienen valores de $b_s > 1$, la condición de $b_0 > 1.5$ representa condiciones típicamente encontradas en esta situación para las líneas de igual vegetación (iso-IAF).

Para el caso de $b_s = 1$, se recomienda utilizar un valor de $b_s = 0.2$ para tener mayor certeza de que $T < 1$.

La Figura 2.12 muestra la relación entre el índice de área foliar (IAF) y a_0 y b_0 para las simulaciones radiativas mostradas en la Figura 2.12.

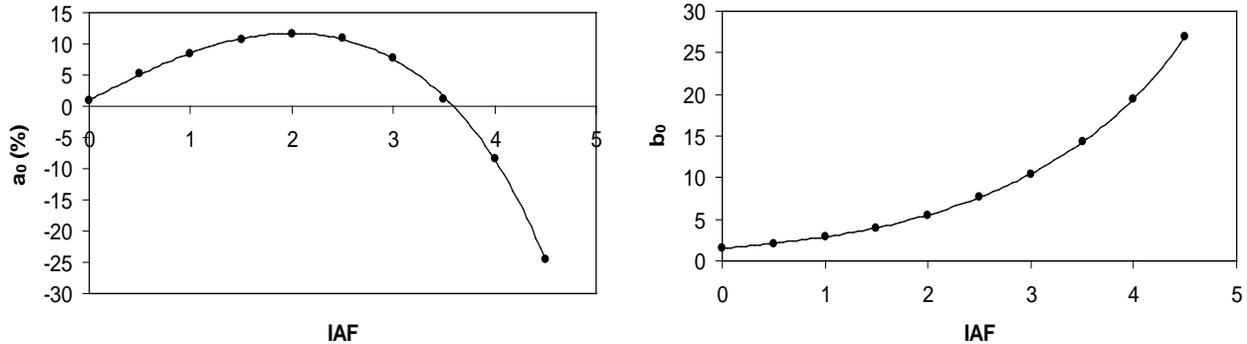


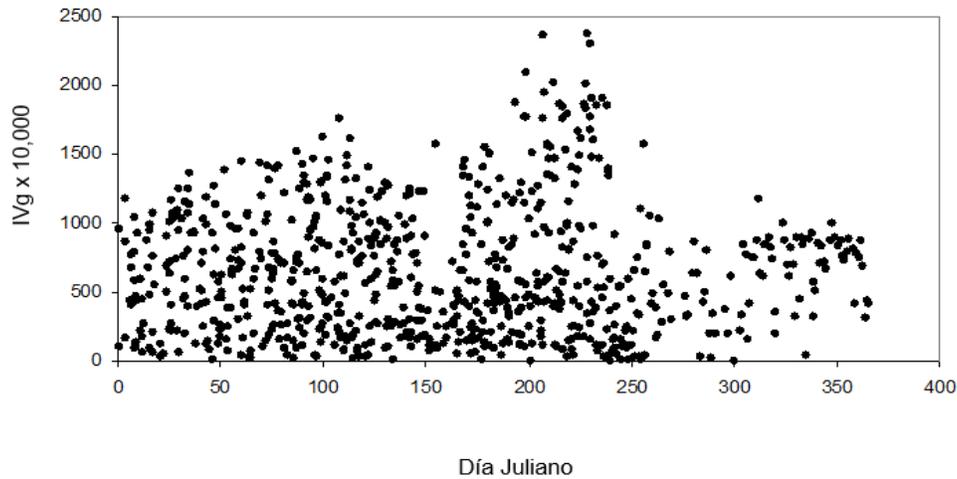
Figura 2.12. Relación entre el IAF y a_0 y b_0 de las simulaciones radiativas de la Figura 2.

Se observa en la Figura 2.12 que cuando la vegetación (medio homogéneo o medio turbio) se vuelve más densa, el valor de a_0 se vuelve negativo. Yoshiaka *et al.*, (2000) muestran que para un medio heterogéneo generalmente se tiene que $a_0 > 0$. No obstante esto, dado el término $b_s a_0 / (b_0 - b_s)$ en S y el uso de valores de $b_s < 1$, el caso de $a_0 < 0$ tiene un efecto muy reducido en el valor de este término (b_0 crece casi al mismo ritmo que a_0 decrece). La multiplicación del término discutido por $(b_R - b_{IRC})$ de S , hace que la situación de $S > 0$ tenga una probabilidad muy baja, si acaso.

La discusión anterior implica que $S < 0$ y $T < 1$, por lo que $dIRC_a < dIRC$, en lo general. En el caso de nubes o de cuerpos de agua, tenemos que $dIRC$ es negativo o cercano a cero, por lo que IV_g es negativo o cercano a cero. La relación $dIRC_a < dIRC$ puede generalizarse a una del tipo $dIRC_2 < dIRC_1$, donde $dIRC_2$ representa un mayor efecto atmosférico que $dIRC_1$. Así, de estas consideraciones, en una serie temporal de IV_g los valores más grandes representan la condición de efectos atmosféricos mínimos, cualquier IAF, por lo que se pueden usar una algoritmo que seleccione estos valores máximos para el desarrollo de un modelo paramétrico del crecimiento de la vegetación.

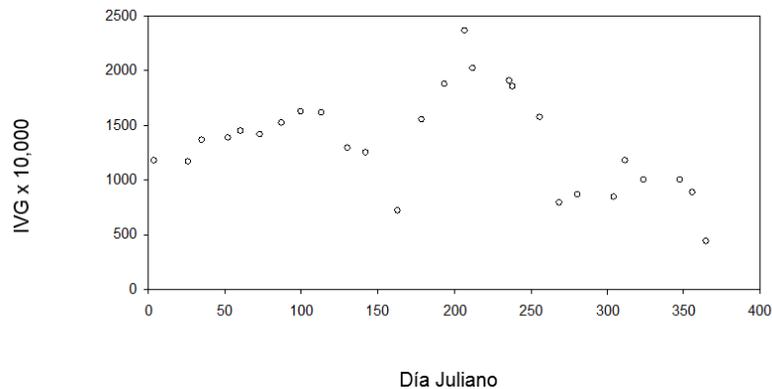
Como primera aproximación en el desarrollo del algoritmo de base se utilizó $dIRC_\infty = 100$ y $b_s = 1$ ($a_s = 0$), estas condiciones resultan más o menos adecuadas para los patrones de crecimiento de la mayoría de los tipos de vegetación en México.

En la Figura 2.13 se observa el patrón temporal de los IVg de un píxel en pastizales cultivados (2008), geometría solo-sensor estandarizada, donde se observa una gran dispersión en los valores de los IVg (varios satélites). Al aplicar el algoritmo de seleccionar los valores más altos de los IVg por ventanas temporales, la Figura 2.14 muestra los resultados, donde el patrón esperado de los IVg se muestra en términos más claros.



Nota: El eje X representa días julianos y el eje Y el IVg multiplicado por 10,000.

Figura 2.13. Patrón temporal del IVg para el uso de varios satélites (2008), datos originales.

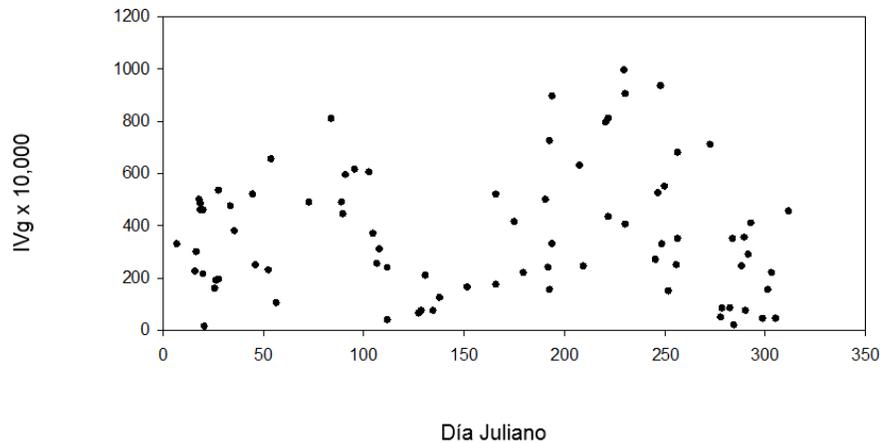


Nota: EL eje X representa días julianos y el eje Y el IVG multiplicado por 10,000

Figura 2.14. Patrón temporal del IVg para el uso de varios satélites (2008), algoritmo aplicado.

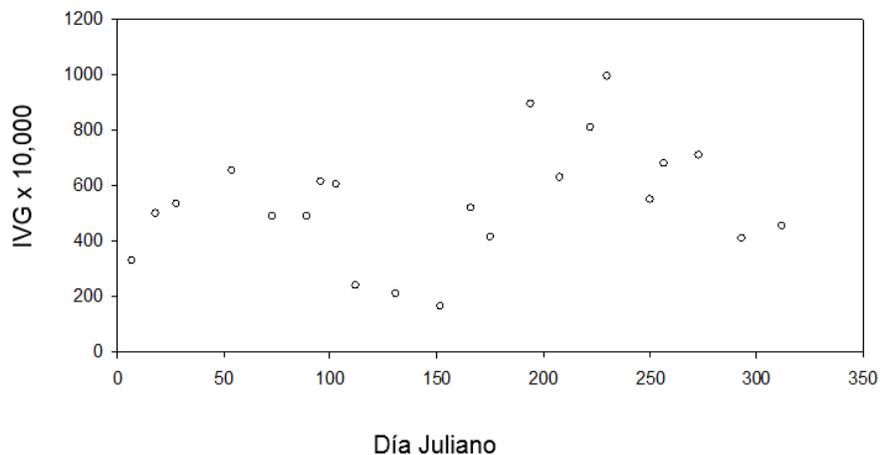
En el caso de menos satélites disponibles, las Figuras 2.15 y 2.16 muestran gráficos similares al caso de un píxel. Los datos mostrados corresponden al año de 1988.

De las Figuras 2.14 y 2.16, y de los desarrollos teóricos presentados, el algoritmo usado para caracterizar la evolución temporal de los pastizales cultivados (y otros tipos de vegetación densa) resulta robusto para su aplicación en términos operacionales.



Nota: El eje X representa días julianos y el eje Y el IVG multiplicado por 10,000.

Figura 2.15. Patrón temporal del IVg para el uso de varios satélites (1988), datos originales.



Nota: El eje X representa días julianos y el eje IVG multiplicado por 10,000

Figura 2.16. Patrón temporal del IVg para el uso de varios satélites (1988), algoritmo aplicado.

En el algoritmo usado para el proceso de las imágenes MODIS se usa $dIRC^\infty = 75\%$ y $b_s = 0.2$ ($a_s = 0$)

2.5 Geometría sol-sensor y diseño de índices de vegetación

El modelo de la geometría sol-sensor discutido previamente genera buenos resultados al ser ajustado a datos de campo. En la Figura 2.17 se muestra su ajuste al caso de pastizales en México (Bolaños y Paz, 2010), donde R representa la banda del R e IRC.

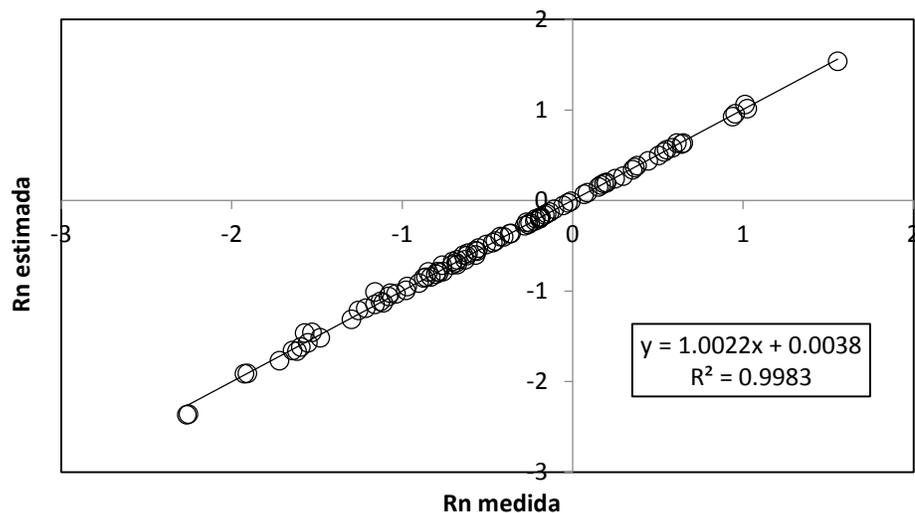


Figura 2.17. Ajuste del modelo de la geometría sol-sensor en pastizales de México.

No obstante el buen ajuste del modelo de la geometría sol-sensor en el espacio normalizado (R_n), en el algoritmo del índice del seguro de la segunda generación del seguro paramétrico ganadero satelital se utiliza el espacio normal (R), después de su estandarización en la condición $d\phi = 0$, $\theta_v = 0$ y $\theta_s = 30$. El pasar del espacio R_n a R genera que el error de estimación se propague, tal como se muestra en la Figura 3.18 para los datos de la Figura 2.17.

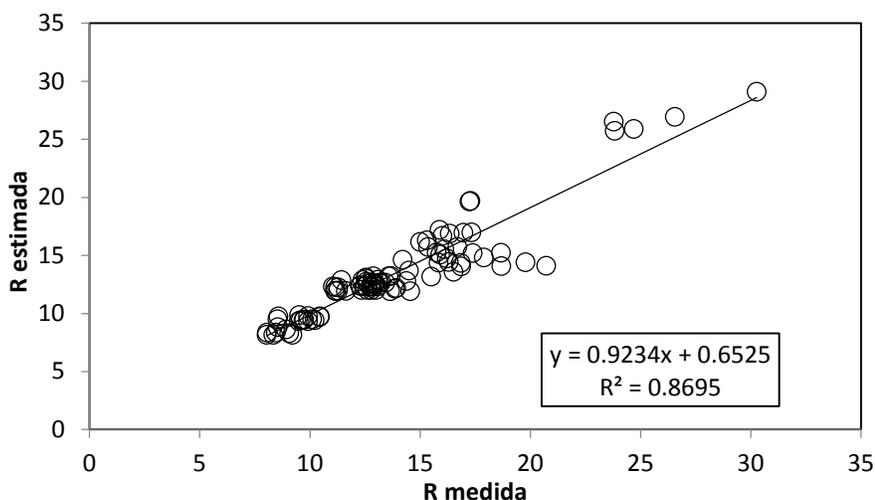


Figura 2.18. Espacio normal (R) del ajuste del modelo geometría sol-sensor para los datos mostrados en la Figura 2.17.

Aunque el ajuste estadístico del modelo de la geometría sol-sensor en el espacio de las reflectancias en formato normal se puede considerar como bueno, el error mostrado implica que el ajuste del modelo con un solo dato generará errores grandes que se propagarán en la estimación del índice del seguro.

En las relaciones (2.3) se muestra que las reflectancias normalizadas tiene la función logaritmo, la cual fue introducida para compensar el efecto de escala de las mediciones realizadas por el sensor MODIS. En el caso de la no existencia de este efecto de escala o el uso de ángulos cenitales de visión pequeños, no se requiere el uso de la función logaritmo.

Para evitar la propagación de errores se plantea el desarrollo de un índice de vegetación que use las reflectancias normalizadas directamente.

La Figura 2.19a muestra los patrones espectrales en el espacio R_n -IRC $_n$ para $d\phi = 0$, $\theta_v = 0$ y $\theta_s = 30$, para el caso sin efecto de escala, mismas simulaciones de la Figura 2.1. Los valores de R_n se multiplicaron por -1 para mostrarlos en el cuadrante positivo. La Figura 2.19b muestra el espacio $g R - g IRC$ para el mismo caso, donde se ha eliminado la curva iso-Suelo que asocia al más oscuro, para mejorar la visualización. El parámetro

g define en forma completa las variaciones de diferentes geometrías sol-sensor (ver Figura 2.1) en un solo valor y es una forma compacta de analizar el BRDF en forma completa (caso de variaciones de ángulos cenitales). Se observa de estas figuras, sin efecto de escala, que los espacios estandarizados o del BRDF, conservan las métricas de separabilidad del crecimiento de la vegetación.

Las figuras 2.19c y d muestran los patrones espectrales de las simulaciones de la Figura 2.1, pero para el caso de considerar el efecto de escala (transformación logarítmica). La Figura 2.19c muestra el espacio Rn-IRCn y la Figura 2.19d el espacio g de R – g IRC.

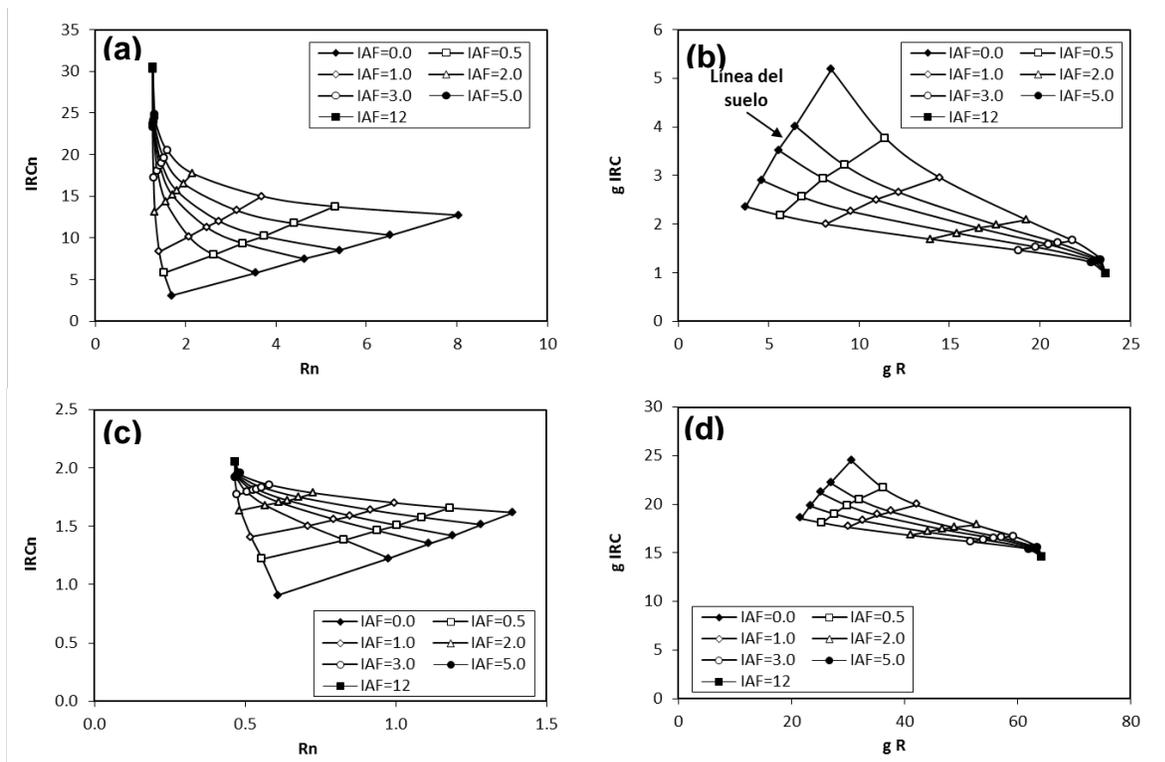


Figura 2.19. Simulaciones radiativas para el caso de efecto de escala (a y b) y sin él (c y d).

Se observa en las figuras 2.19 c y d que los patrones son similares a los de las figuras 2.19 a y b, pero con una reducción de la separabilidad (aparente, ya que la transformación logarítmica mantiene métricas).

Como evidencia experimental de campo, la Figura 2.20 muestra patrones espectrales y de la BRDF (geometría sol-sensor) para el caso de mediciones de reflectancias de maíz.

En la Figura 2.20 b y d se observa, con o sin efecto de escala, que las líneas iso-IAF para valores mayores a 2.0 las líneas son casi horizontales, donde el valor de g IRC asociado define un criterio de clasificación sin efecto del suelo (se presenta en los valores de g R).

Las figuras 2.19 y 2.20 muestran que es posible utilizar un esquema de desarrollo de índices de vegetación similares al usado para el IVg o IVIS. Si se usa la transformación logarítmica que se asocia al efecto de escala, el índice tendrá un menor rango de variación que para el caso de la no transformación.

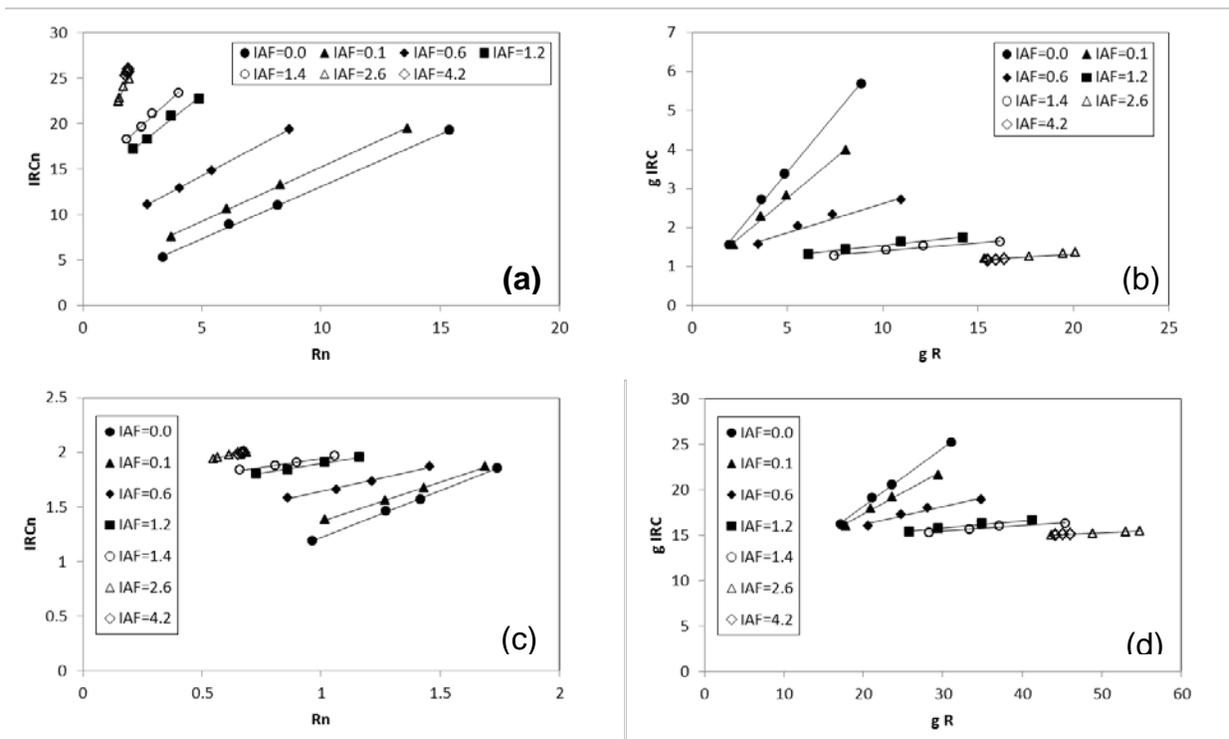


Figura 2.20. Mediciones en campo para el caso de efecto de escala (a y b) y sin él (c y d).

De la discusión previa, la propuesta que se implementó en la mejoría de los algoritmos del sistema de monitoreo satelital fue utilizar reflectancias normalizadas (letra n) y definir el índice IVIS en función de estas:

$$IVISn = -\ln\left(\frac{dIRC\infty n - dIRCn}{dIRC\infty n - dIRCsn}\right)$$

$$dIRCn = IRCn - (a_{sn} + b_{sn}Rn) \quad (2.18)$$

$$dIRC\infty n = IRC\infty n - (a_{sn} + b_{sn}R\infty n)$$

$$dIRCsn = IRCsn - (a_{sn} + b_{sn}Rsn)$$

Al conocer los parámetros de la línea del suelo (o supuestos como asociados a una línea del suelo “virtual”), espacios normalizados, entonces tenemos que $dIRCsn = 0$, por lo que la ecuación (2.18) se simplifica a:

$$IVISn = -\ln\left(1 - \frac{dIRCn}{dIRC\infty n}\right) \quad (2.19)$$

La Figura 2.21 se muestra la relación entre el índice de área foliar (IAF) y el IVISn para el caso de las simulaciones radiativas de la Figura 1, donde se ha eliminado el suelo más oscuro (valor de la banda del R más pequeño). La eliminación de este suelo oscuro se explica más adelante.

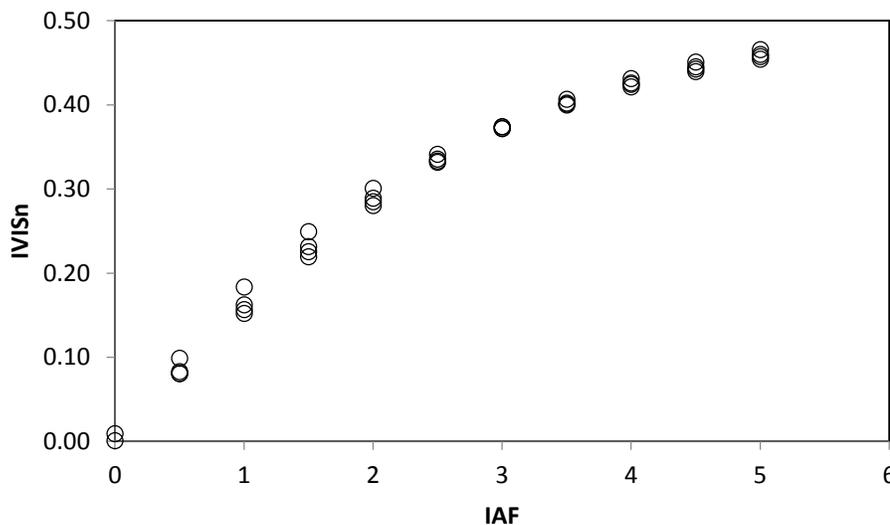


Figura 2.21. Relación entre el IAF e IVISn para las simulaciones radiativas.

Se observa de la Figura 2.21 que la relación entre el IAF y el IVISn es de tipo exponencial, por lo que se requiere realizar una transformación logarítmica de IAF. Dado que $\ln(\text{IAF}=0)$

no está definido, se usó la variable IAF+1, $\ln(\text{IAF}=0 + 1) = 0$, tal como se muestra en la Figura 2.22.

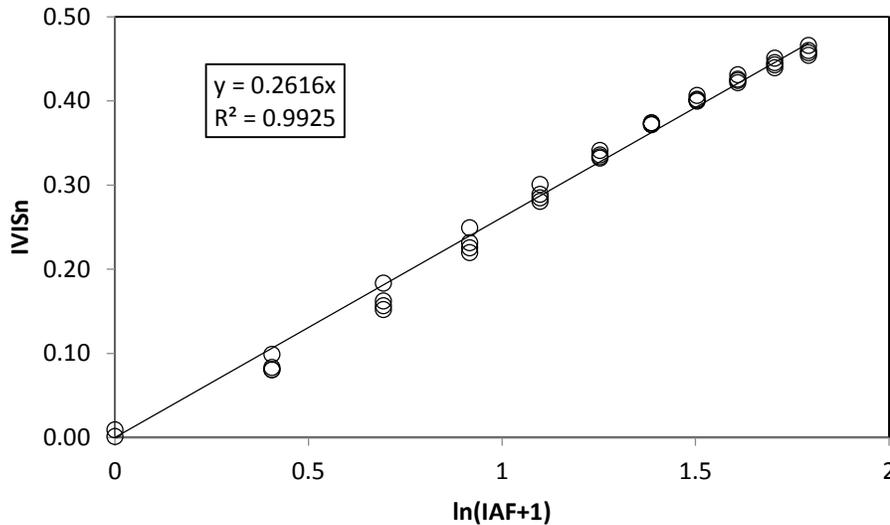


Figura 2.22. Relación entre $\ln(\text{IAF}+1)$ e IVISn para las simulaciones radiativas.

De la Figura 2.22 es claro que la transformación logarítmica genera una relación lineal.

La Figura 2.23 muestra las relaciones para el caso IAF-IVISn y $\ln(\text{IAF}+1)$ -IVISn para el cultivo de algodón analizado previamente. Todas las regresiones lineales fueron ajustadas a pasar por el origen.

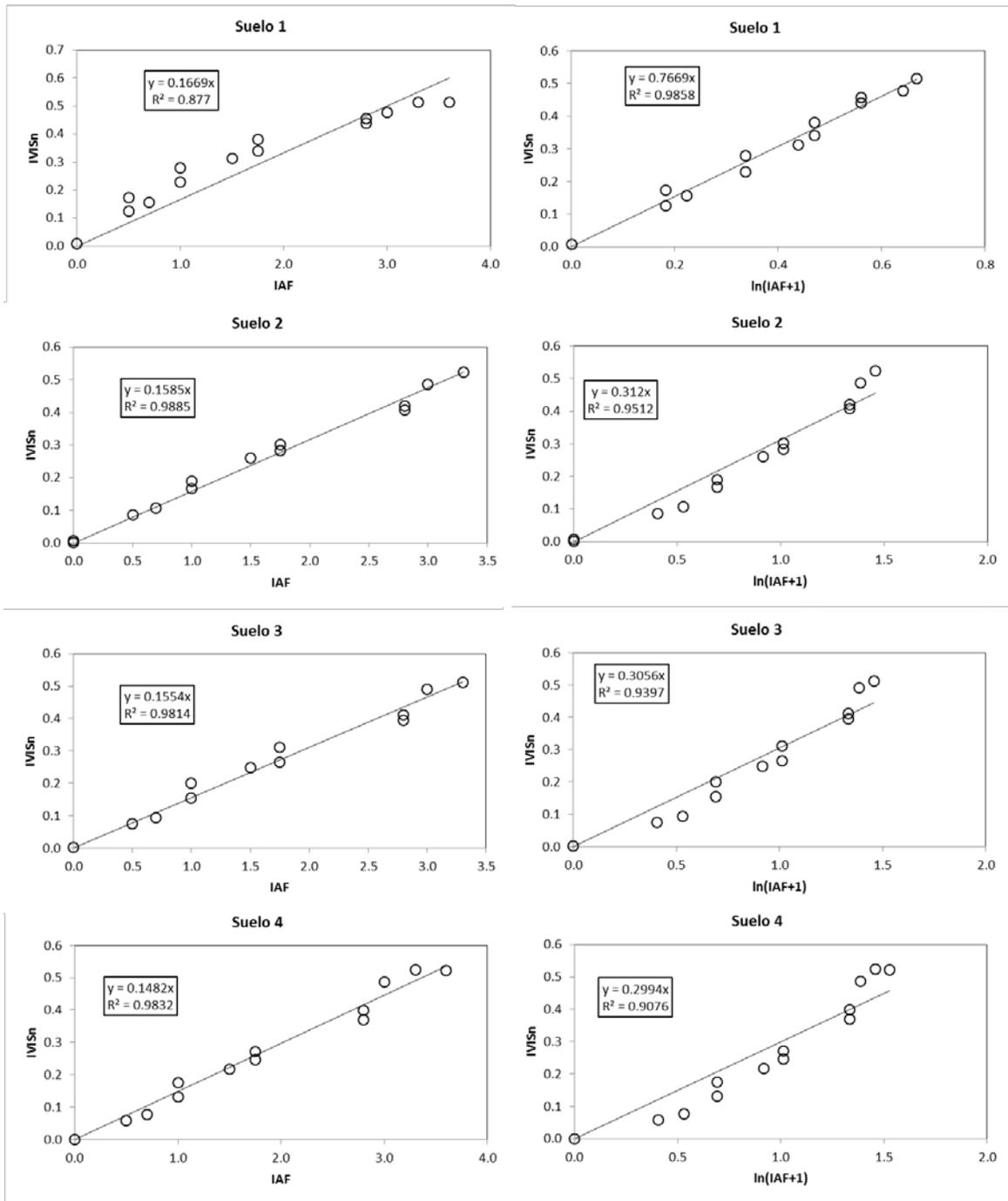


Figura 2.23. Relaciones IAF-IVISn y $\ln(\text{IAF}+1)$ -IVISn en suelos en la condición seco y húmedo en cultivo de algodón.

En lo general, la Figura 2.23 se muestra que la relación IAF-IVISn es lineal y se comporta mejor que la relación $\ln(\text{IAF}+1)$ -IVISn; con excepción del suelo 1 que es el más oscuro

de todo. El caso de este tipo de suelos oscuros son representativos de suelos en bosques y selvas, por lo que tiene repercusiones para el caso de pastizales y matorrales, objetivo inicial del sistema de monitoreo satelital.

La diferencia observada entre las simulaciones radiativas y las mediciones de campo es debida al uso de una estructura unidimensional en las radiativas, contraria al caso tridimensional del campo.

Ahora bien, considerando que lo que interesa es una relación lineal, con origen en cero, entre el IVISn y la biomasa aérea (Bm) de la vegetación, el uso de la relación $Bm = mIAF$, con m una constante empírica, que permite obtener esta meta. La Figura 2.24 muestra la relación entre Bm e IVISn para los cuatro suelos debajo del cultivo de algodón. Se observa de esta figura que la relación propuesta se cumple, con la excepción del suelo oscuro 1 que tiene un patrón no lineal.

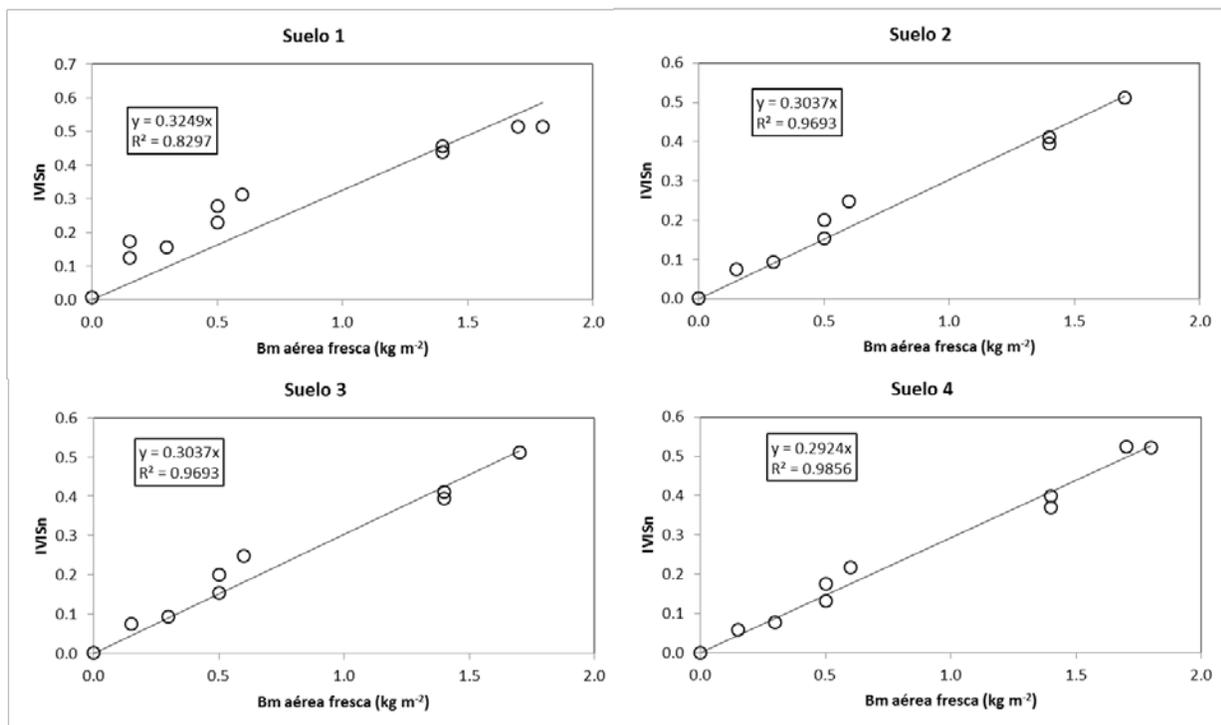


Figura 2.24. Relación Bm-IVISn en suelos en la condición seco y húmedo en cultivo de algodón.

En la Figura 2.24 se observa que para valor del IAF mayores que 2.0, el IVISn cambia poco de valor. En lo general, valores del IAF entre 2.0 y 2.5 representan el término de la etapa vegetativa del cultivo e inicio de la reproductiva.

La diferenciación de propiedades ópticas del cultivo en la etapa vegetativa (solo hojas) con la reproductiva (hojas y órganos reproductivos) es más clara para el caso del maíz, tal como se muestra en la Figura 2.25.

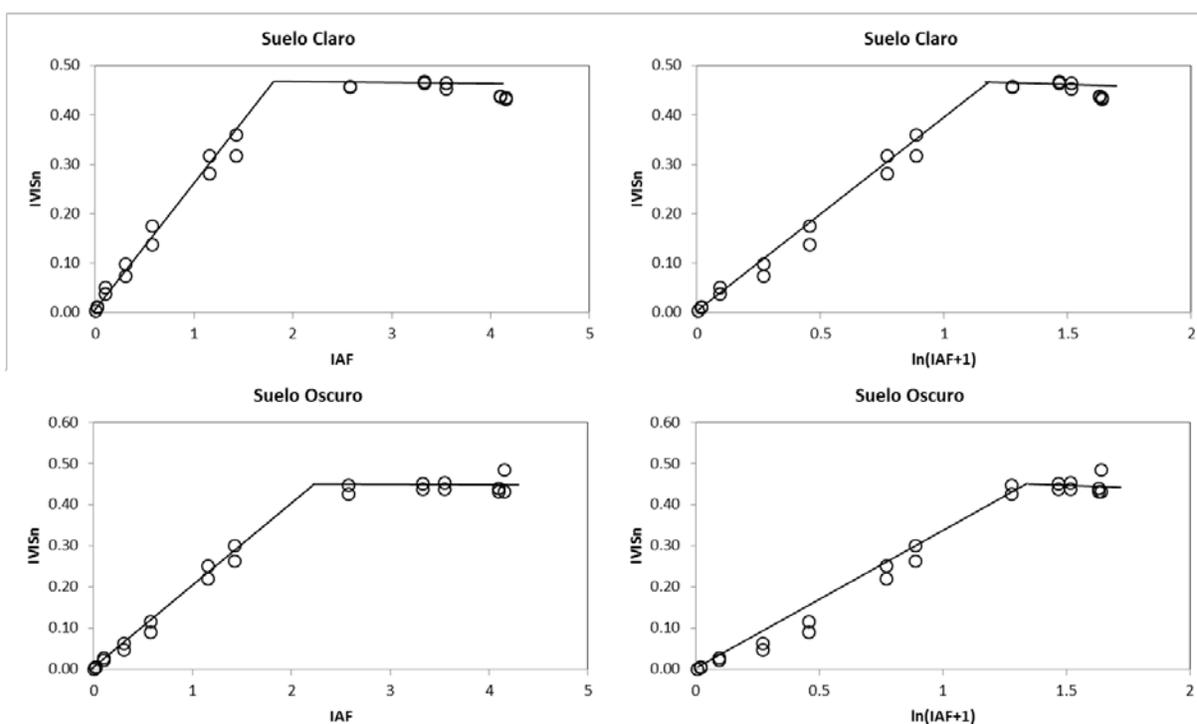


Figura 2.25. Relaciones IAF-IVISn y ln(IAF+1)-IVISn para dos suelos debajo del cultivo de maíz, cada uno en la condición seco y húmedo.

En la Figura 2.25 se observa que el uso ln(IAF+1) mejora la relación lineal con respecto al valor del IAF máximo en ésta, su patrón tendiente a no lineal no representa una mejoría substancial, por lo que la relación lineal entre el IAF y el IVISn puede considerarse adecuado para la etapa vegetativa y, en algunos casos, para la reproductiva (Figura 2.25).

En el análisis del algodón y maíz, se utilizaron líneas del suelo (espacio normalizado) y el valor observado de $dIRC^{\infty n}$. De estas líneas del suelo y valores del $dIRC^{\infty n}$, y otras observaciones, en el algoritmo se utilizaron las constantes $a_{Sn} = 0.0$, $b_{Sn} = 0.8$ y $dIRC^{\infty n} = 3.5$, para el caso de la estandarización $d\phi = 0$, $\theta_v = 0$ y $\theta_s = 30$.

2.6 Modelación de los patrones temporales de IVISn

Del análisis de los patrones temporales (días julianos) del IVISn de los cultivos analizados algodón y maíz para la etapa vegetativa y reproductiva, hasta el IAF máximo, es posible utilizar un modelo logístico definido por:

$$IVISn = \frac{1}{1 + \exp(a_1 + b_1 t)} \quad (2.20)$$

donde a_1 y b_1 son constantes empíricas.

De igual manera, para la etapa de senescencia se puede usar un modelo similar:

$$IVISn = \frac{1}{1 + \exp(a_2 + b_2 t)} \quad (2.21)$$

donde a_2 y b_2 son constantes empíricas.

La Figura 2.26 muestra el ajuste del modelo (2.20) para el caso del cultivo de algodón para el suelo 2 y 4; y, la Figura 2.27 para el cultivo de maíz, donde los ajustes del modelo son excelentes.

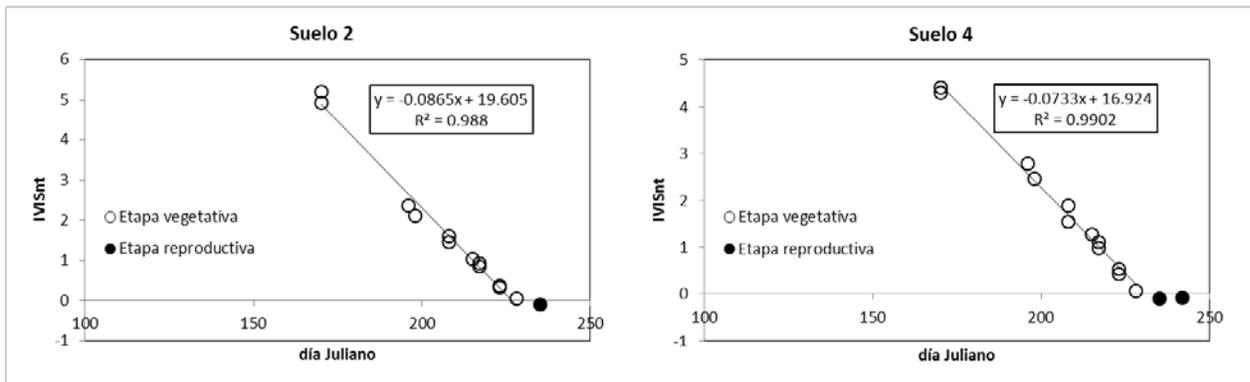


Figura 2.26. Modelo logístico para el cultivo de algodón, suelo 2 y 4.

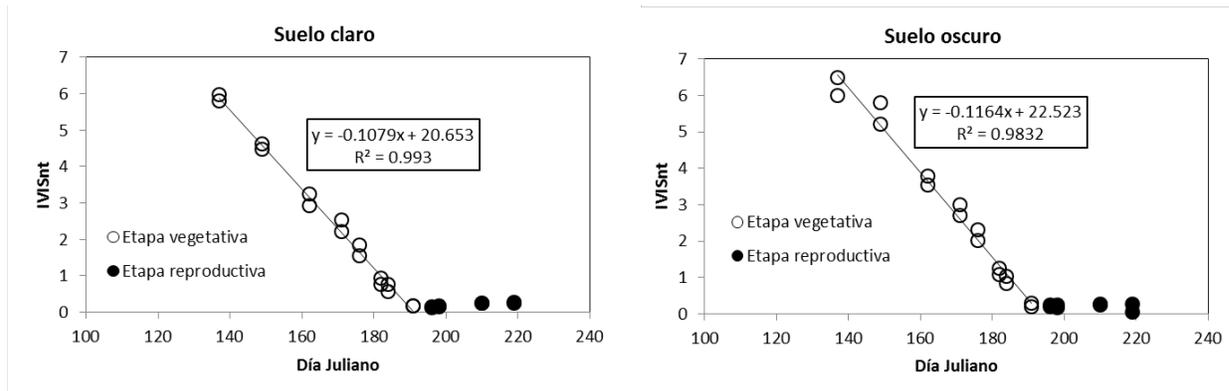


Figura 2.27. Modelo logístico para el cultivo de maíz, suelo claro y oscuro.

Los ajustes de las Figuras 2.26 y 2.27 se realizaron usando la transformación de la relación (2.20):

$$IVISnt = \ln \left[\frac{1}{IVISn} - 1 \right] \quad (2.22)$$

$$IVISnt = a_1 + b_1 t$$

La Figura 2.28 muestra la evolución temporal de IVISnt para cinco cultivos agrícolas discutidos en Reyes *et al.* (2011) y Pascual *et al.* (2012).

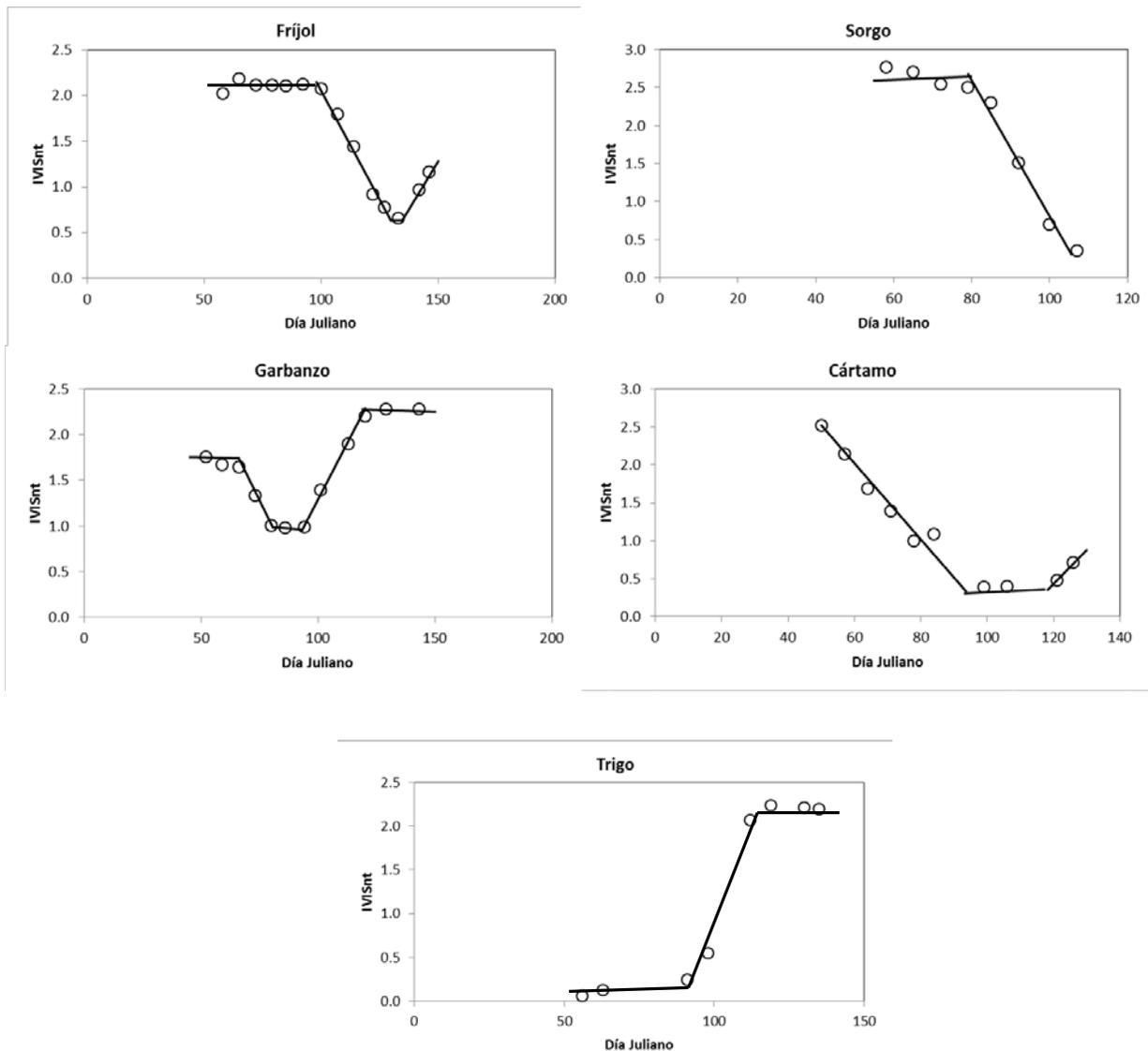


Figura 2.28. Evolución temporal de IVISnt para cinco cultivos agrícolas.

De la Figura 2.28 se observa que los modelos (2.20) y (2.21) resultan buenos en lo general, por lo que se pueden usar en forma operativa.

No obstante el ajuste obtenido para el modelo (2.21) de la senescencia, es posible utilizar un modelo alternativo, después de su ajuste a diferentes bases de datos experimentales analizadas.

El modelo finalmente planteado es:

$$IVISn = a_2 \exp(-b_2 t) \quad (2.23)$$

que se puede transformar a un formato lineal como:

$$\begin{aligned} IVISnt &= \ln(IVISn) \\ IVISnt &= \ln(a_2) - b_2 t \end{aligned} \quad (2.24)$$

La Figura 2.29 muestra la evolución temporal de IVISnt (multiplicado por -1) para la etapa de senescencia de dos de los cultivos de la Figura 30, donde los ajustes resultan buenos.

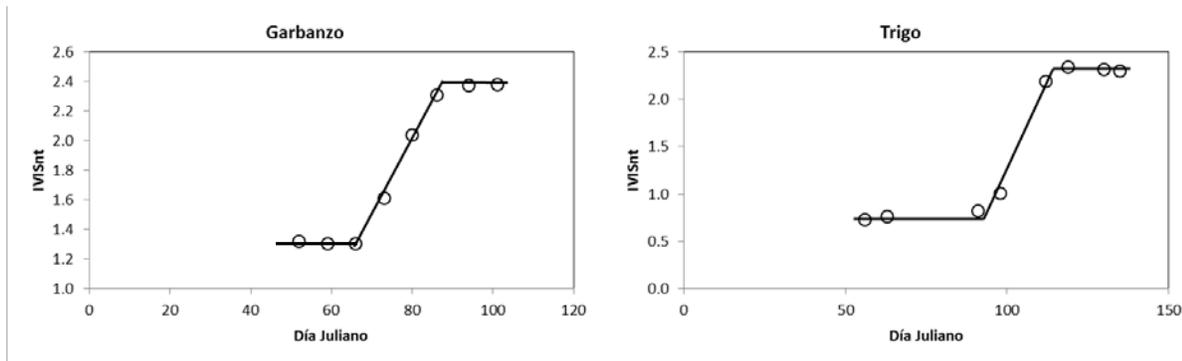


Figura 2.29. Evolución temporal de IVISnt para los cultivos: garbanzo y trigo en la etapa de senescencia.

Un modelo similar al implementado para el IVISn se ha propuesto por Baret (1986), con bases semi-mecanicistas, para la evolución temporal del IAF:

$$IAF = IAF_{amp} \left[\frac{1}{1 + \exp\{-b(t - t_i)\}} - \exp\{a(t - t_s)\} \right] \quad (2.25)$$

La etapa de crecimiento está definida por una función logística con el parámetro b representando una tasa de crecimiento relativa en el punto de inflexión t_i . La senescencia está definida por una función exponencial con el parámetro a representando una tasa de crecimiento relativa y t_s el tiempo cuando todas las hojas son senescentes. El parámetro IAF_{amp} es la amplitud (meseta) del IAF máximo.

2.7 SISTEMA DE MONITOREO SATELITAL BASICO

La presente versión del sistema de monitoreo satelital básico es con base en la estimación del índice espectral $IVIS_n$ a escala temporal decenal y a nivel de pixel por pixel. La malla estatal de pixeles de 250 m x 250 m esta referenciada a la malla nacional, Figura 2.30. Así, los pixeles del cualquier estado de México tienen la definición del INEGI de sus productos nacionales, en la proyección Conica Conforme de Lambert (CCL).

La Figura 2.31 muestra el marco estatal de la malla nacional del sistema de avances a nivel de pixeles individuales.

Aunque es posible asociar un modelo matemático a la curva de crecimiento espectral asociada a cada pixel de la malla estatal, en la presente versión del sistema se decidió un esquema de presentar los valores calculados a nivel de decenas, permitiendo a los usuarios contar con la información directa del sensor MODIS.

El sistema de avance considera datos generalmente diarios, que son revisados para obtener el valor máximo del $IVIS_n$ en la decena, para minimizar los efectos atmosféricos en las series temporales.

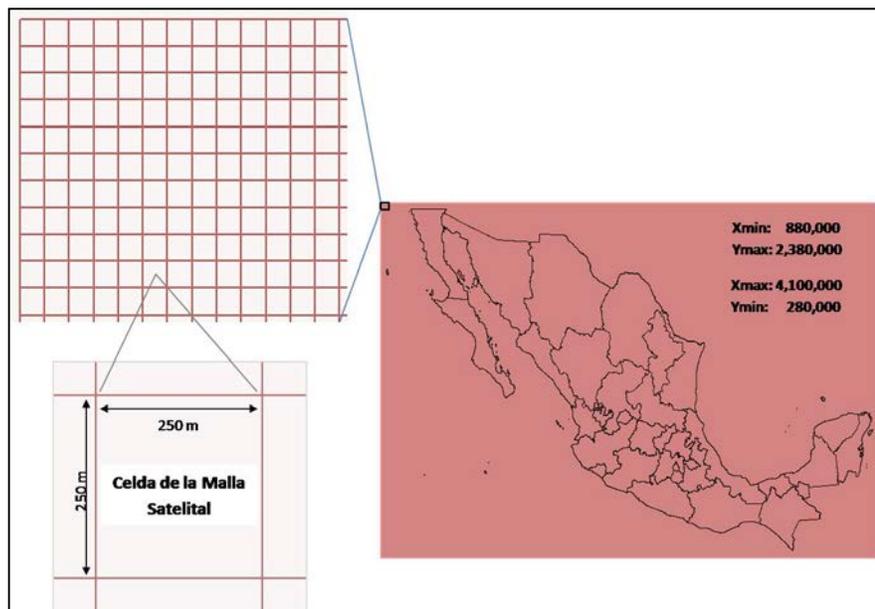


Figura 2.30. Marco Nacional para la integración de la base geoespacial de USV para consultas satelitales.

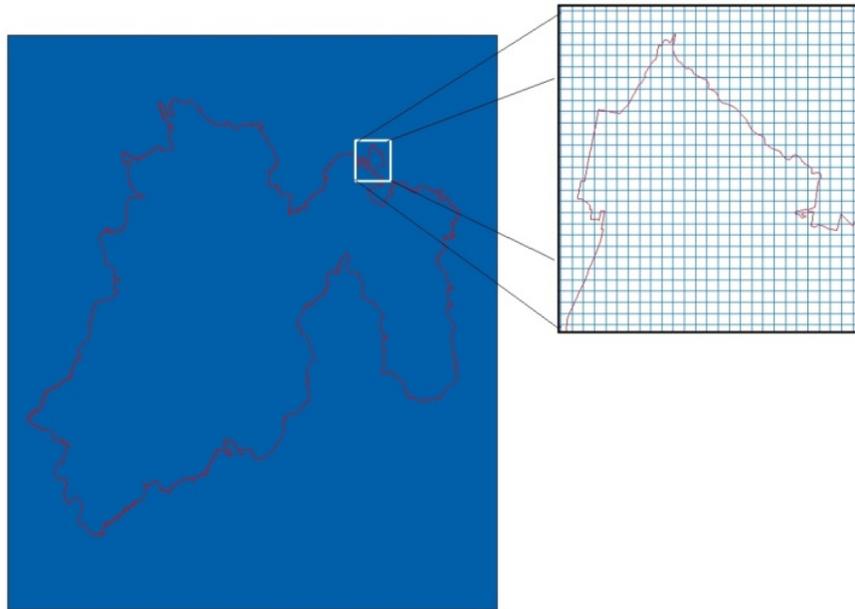


Figura 2.31. Marco Estatal para la integración de la base geoespacial de USV para consultas satelitales.

La Figura 2.32 muestra un patrón típico de un pixel de vegetación, con el patrón de crecimiento asociado a curvas unimodales. Pueden existir curvas bi o tri modales en algunos tipos de vegetación.

En la Figura 2.33 se muestra la situación de un sistema de monitoreo cada 20 días, con menores errores que el decenal. Este sistema de avances se compara con respecto al estimado usando el periodo anual completo y revisando los patrones del IVISn.

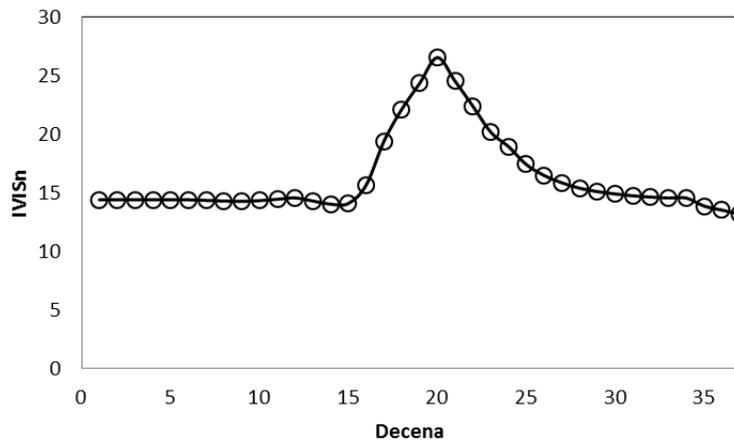


Figura 2.32. Patrón típico de una curva de crecimiento unimodal de la vegetación.

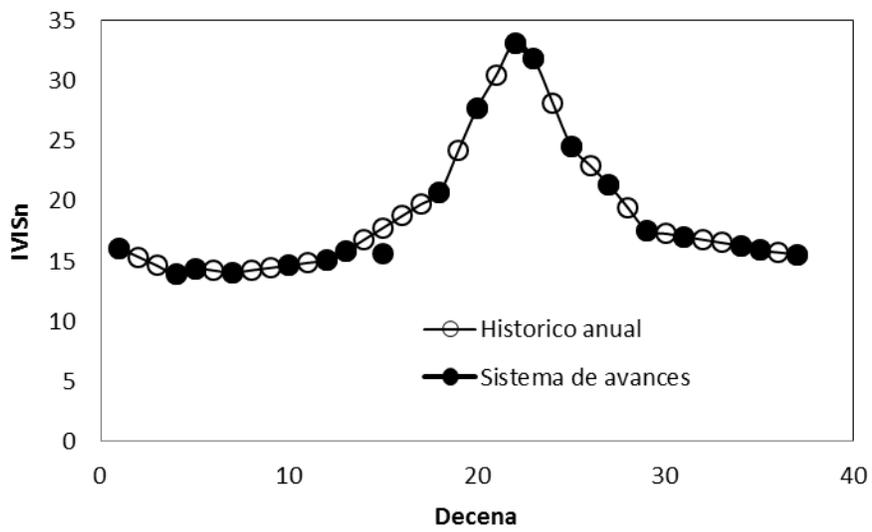


Figura 2.33 Sistema de avance (cada 20 días) en relación al histórico anual.

2.8 LITRATURA CITADA

- Baret, F. 1986. Contribution au suivi radiometrique de cultures de cereales. Ph.D. Thesis. Universite de Paris-SudOrsay, Paris. 182 pp.
- Baret, F., S. Jacquemoud, and J.F. Hanocq. 1983. The soil line concept in remote sensing. *Remote Sensing Reviews* 7: 65-82.
- Bausch, W.C. 1993. Soil background effects on reflectance based crop coefficients for corn. *Remote Sensing of Environment* 46: 213-222.
- Bolaños, M., F. Paz, E. Palacios, E. Mejía, y A. Huete. 2007. Modelación de los efectos de la geometría sol-sensor en la reflectancia de la vegetación. *Agrociencia* 41: 527-537.
- Bolaños, M., y F. Paz. 2010. Modelación general de los efectos de la geometría iluminación-visión en la reflectancia de pastizales. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias* 1: 349-361.
- Huete, A.R., R.D. Jackson, and D.F. Post. 1985. Spectral response of a plant canopy with different soil backgrounds. *Remote Sensing of Environment* 17: 35-53.
- Pascual, F., F. Paz, y M. Bolaños. 2012. Estimación de biomasa aérea en cultivos con sensores remotos. *Terra Latinoamericana* 30: 17-28
- Paz, F., E. Palacios, E. Mejía, M. Martínez, y L.A. Palacios. 2005a. Análisis de los espacios espectrales de la reflectividad del follaje de los cultivos. *Agrociencia* 39: 293-301.
- Paz, F., E. Palacios, L.A. Palacios, L. Tijerina, y E. Mejía. 2005b. Correcciones atmosféricas usando patrones invariantes en el espacio del rojo e infrarrojo cercano. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales* 1:51-64.
- Paz, F., E. Palacios, M. Bolaños, L.A. Palacios, M. Martínez, E. Mejía y A. Huete. 2007. Diseño de un índice espectral de la vegetación: NDVIcp. *Agrociencia* 41: 539-554.

- Paz, F., M. Bolaños, E. Palacios, L.A. Palacios, M. Martínez, y A. Huete. 2008. Optimización del índice espectral de la vegetación NDVI_{cp}. *Agrociencia* 42: 925-937.
- Paz, F., M. Reyes, y E. Medrano. 2011. Diseño de índices espectrales de la vegetación usando curvas iso-suelo. *Agrociencia* 45: 121-134.
- Paz, F., E. Romero, E. Palacios, M. Bolaños, R. Valdez, y A. Aldrete. 2014. Alcances y limitaciones de los índices espectrales de la vegetación: marco teórico. *Terra Latinoamericana* 3: 177-194.
- Paz, F., E. Romero, E. Palacios, M. Bolaños, R. Valdez, y A. Aldrete. 2015. Alcances y limitaciones de los índices espectrales de la vegetación: análisis de índices de banda ancha. *Terra Latinoamericana* 33: 27-49.
- Reyes, M., F. Paz, M. Casiano, F. Pascual, M.I. Marín, y E. Rubiños. 2011. Caracterización del efecto de estrés usando índices espectrales de la vegetación para la estimación de variables relacionadas con la biomasa aérea. *Agrociencia* 45: 221-233
- Romero, E., F. Paz, E. Palacios, M. Bolaños, R. Valdez, y A. Aldrete. 2009. Diseño de un índice espectral de la vegetación desde una perspectiva conjunta de los patrones exponenciales y lineales del crecimiento. *Agrociencia* 43: 291-307.
- Vermote, E. F., D. Tanre, J.L. Deuze, M. Herman, y J.J. Morcrette. 1997. Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S: an overview. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 35: 675-686

CAPITULO 3 ESTIMACIÓN DE LA COBERTURA AEREA DE LA VEGETACIÓN HERBACEA USANDO SENSORES REMOTOS

3.1 INTRODUCCIÓN

Los sensores remotos permiten obtener información del estado de la vegetación de la superficie terrestre con tiempos de revisita cortos, de días a meses, y con capacidades de muestreos espaciales exhaustivos a diferentes resoluciones. En esta perspectiva, el uso de esta tecnología permite generar mapas dinámicos de la vegetación para diferentes usos.

Las variables biofísicas que se asocian a la vegetación, tales como la cobertura aérea foliar (f_v), el índice de área foliar (IAF) o la biomasa aérea (B) se pueden usar para sintetizar el estado y crecimiento de la vegetación en forma adecuada, de tal forma que se pueden generar modelos biofísicos para diferentes aplicaciones. El uso de los sensores remotos para estimar variables biofísicas permite reducir significativamente los costos asociados a muestreos en campo, siempre y cuando las relaciones establecidas entre los datos espectrales y los biofísicos sean robustas y estables en el tiempo.

Los sensores remotos, en plataformas espaciales o a nivel de campo, miden las interacciones entre la vegetación con la radiación solar en las diferentes bandas electromagnéticas (sensores ópticos), de tal manera que captan información que puede utilizarse para estimaciones de variables biofísicas. La liga entre estas variables y la transferencia radiativa es función de lo que los sensores remotos pueden medir. En los procesos de transferencia radiativa los datos espectrales son función de las interacciones con la atmosfera y con el medio suelo-vegetación. Sin considerar los aspectos atmosféricos, la información espectral es función de la vegetación a la escala de un pixel o parcela (cobertura aérea, índice de área foliar, distribución angular del follaje de las plantas, agrupamiento espacial de las hojas o racimos de éstas, propiedades ópticas de las hojas, principalmente) y del fondo de la vegetación (propiedades ópticas del suelo o mezcla suelo-vegetación); además, la geometría sol-sensor. En este sentido, las observaciones de los sensores remotos dependen de múltiples y complejas interacciones

del medio suelo-vegetación, por lo que es complicado extraer información biofísica en términos generales.

En términos estructurales (geometría de la distribución de la vegetación en un pixel o parcela), los sensores remotos captan información relacionada con el follaje (la parte fotosintética en las bandas fotosintéticamente activas y la estructural del mesófilo foliar, más otras variables asociadas), por lo que es importante conocer los alcances y limitaciones de la tecnología. Una variable típica usada en las relaciones entre los datos espectrales y la estructura de la vegetación es el IAF, usando diferentes aproximaciones en relación a su definición. Un problema que se asocia con el IAF es que esta variable no es suficiente para caracterizar la distribución espacial del follaje, por lo que se requiere de la cobertura aérea para tener información completa. Por un lado, el IAF es determinado a nivel de campo a nivel global (superficie de una cara de las hojas en relación a la superficie del terreno) por lo que existe un gran número de posibles arreglos geométricos de las plantas en la parcela que generan un mismo IAF (Paz et al., 2013).

Al usar el IAF a escala de plantas individuales (IAF local), lo que generalmente se mide en campo, más la cobertura de la vegetación o del suelo (entre el dosel del follaje de las plantas individuales), es posible tener información completa del follaje y su distribución espacial en un pixel o parcela (Carlson y Ripley, 1997; Paz *et al.*, 2013). Al contrario del IAF (global), la cobertura aérea foliar o f_v , es una variable global más adecuada para caracterizar a la vegetación (Specht, 1972; Specht y Specht, 1989; Carlson y Ripley, 1997; Paz *et al.*, 2013). En este caso, f_v está definido como la cobertura del follaje visto a nadir por un sensor, también denominada cobertura proyectiva foliar (Specht y Specht, 1989), por lo que tiene información del follaje de las plantas individuales y de su distribución espacial. La cobertura proyectiva foliar (densidad del follaje) es una variable crítica en las interacciones atmósfera-vegetación-suelo en procesos ecológicos e hidrológicos (Specht, 1972; Eagleson, 1982).

Bajo la perspectiva de la estimación de f_v de la distribución del follaje en un pixel o parcela, en este trabajo se revisa el uso de los datos espectrales para este fin, además de la revisión de la relación entre el IAF y la f_v . Los desarrollos teóricos que fundamentan

la estimación de f_v se revisaron en función de diferentes bases de datos experimentales, para analizar su robustez y estabilidad en el tiempo y espacio.

3.2 POSICIONAMIENTO DEL PROBLEMA DE ESTIMACIÓN

Los sensores remotos pueden tomar datos de radianzas (reflectancias) en diferentes bandas espectrales que en el espectro electromagnético de onda corta van de 400 a 2,500 nm, generalmente. En las aplicaciones que se asocian a caracterizar el medio suelo-vegetación típicamente se utilizan las bandas del rojo (R) e infrarrojo cercano (IRC), dado el alto contraste de estas bandas para diferenciar la vegetación del suelo (Richardson y Wiegand, 1977; Tucker, 1979). Este par de bandas espectral están disponibles en la gran mayoría de los satélites comerciales o gratuitos, así como en radiómetros espectrales de campo, por lo que en lo siguiente la discusión estará centrada en estas bandas.

3.2.1 Patrones espectrales del crecimiento de la vegetación

Los procesos de transferencia radiativa en el medio suelo-vegetación se pueden aproximar de diferentes maneras para su análisis y comprensión. Para generar simulaciones radiativas, un primer paso es establecer la condición de frontera, la cual está definida por el caso de suelo desnudo ($IAF = 0$, $f_v = 0$). En una determinada región, las reflectancias de los suelos presentan un patrón lineal de variación conocido como línea del suelo (Baret *et al.*, 1983), que permite introducir simetrías en las simulaciones radiativas. La Figura 3.1 muestra una línea del suelo con seis suelos con propiedades ópticas diferentes.

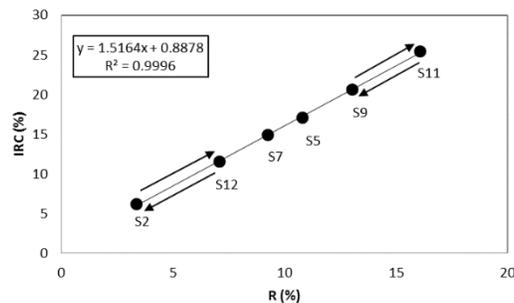


Figura 3.1. Línea del suelo en seis suelos con propiedades ópticas diferentes.

A la escala de píxeles individuales, los cambios en las reflectancias del suelo, principalmente por cambios en la humedad del suelo o prácticas de labranza en cultivos agrícolas, se reflejan en un movimiento en la línea del suelo. Así, para un suelo claro (S11 en la Figura 3.1), su humedecimiento modifica su posición al punto definido por S9. Al secarse el suelo, se regresa al punto S11. Para un suelo oscuro (S12 en la Figura 3.1), el patrón va de S12 a S2 y, al secarse, de S2 a S12. De esta forma, en lo siguiente la discusión de simulaciones radiativas estará orientada a suelos claros y oscuros, para considerar el patrón completo, en los extremos, de variabilidad en las propiedades ópticas de los suelos.

Los patrones espectrales del crecimiento de un cultivo en el espacio del rojo (R) y del infrarrojo cercano (IRC), discutidos por Paz *et al.*, (2005a y 2007), usando el modelo 1-D de transferencia radiativa SAIL (Verhoef, 1984) se reportaron en la Figura 2.1

El modelo SAIL usa una aproximación de medio turbio (Ross, 1981) unidimensional que consiste en un medio semi-infinito compuesto por fitoelementos infinitesimales sin sombreado entre ellos. En la realidad, modelos 3-D, la distribución del follaje tiene patrones más complejos y la aproximación de medio turbio está limitada. No obstante lo anterior, las simulaciones 3-D de modelos de transferencia radiativa tienen patrones similares a los mostrados para el caso 1-D (Gao *et al.*, 2000), por lo que los patrones unidimensionales se pueden convertir a tridimensionales a través de transformaciones lineales (Pinty *et al.*, 2004). En esta situación, los parámetros de los modelos 1-D son considerados como efectivos bajo el concepto de medios equivalentes (Pinty *et al.*, 2004; Paz *et al.*, 2013). En la Figura 3.2 se muestra los patrones espectrales de mediciones en campo, diferentes propiedades ópticas de los suelos, de un cultivo de algodón (Huete *et al.*, 1985), donde se observan patrones similares a las simulaciones radiativas.

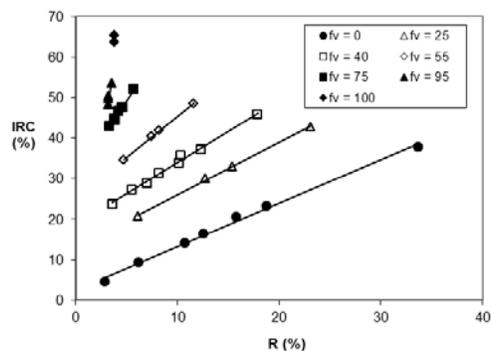


Figura 3.2. Patrones espectrales de las reflectancias de un cultivo de algodón en campo (adaptado de Huete *et al.*, 1985).

Para el caso de cultivos agrícolas o vegetación herbácea, si se unen los valores de igual IAF o fv (iso-IAF o iso-fv) de cada curva de igual suelo (iso-Suelo), se obtiene un patrón cuasi-lineal. Esto es congruente con la información de campo y con otras aproximaciones teóricas (Huete *et al.*, 1985; Yoshiaka *et al.*, 2000). En realidad la curva de iso-IAF corresponde a un comportamiento tipo parabólico, que si no se consideran suelos muy claros, resulta en una línea recta (Paz *et al.*, 2014 y 2015). Así, un estado de crecimiento de un cultivo (IAF) se refleja en una línea recta, independientemente del tipo de suelo de fondo en el cultivo. La pendiente e intersección de las líneas rectas de iso-IAF varían con el valor del IAF, como se observa en la Figura 2.1. La inclinación (pendiente) de las rectas de iso-IAF parte desde una pendiente igual a la de la línea del suelo (IAF = 0) y aumenta hasta alcanzar un ángulo de 90° en el sentido contrario a las manecillas del reloj. Esta última condición corresponde al caso de saturación de la reflectancia de la banda del R (R_{∞}), representada en la Figura 2.1 como los valores de reflectancia arriba del ápice del sombrero de tres picos (IAF > 3 en la Figura 2.1). Los patrones de los espacios espectrales IRC-Visible (azul, verde y rojo) son similares para todas las bandas del espectro visible, dado que hay una relación lineal entre estas bandas (Paz *et al.*, 2005a y 2015). En consecuencia, no existe razón aparente, salvo el de la rapidez de saturación de las bandas, para preferir una banda visible en particular. Todas las curvas de iso-Suelos convergen al mismo punto de saturación de las bandas visibles. En realidad el sombrero de tres picos tiene una línea recta como ápice, ya que cuando una banda visible se satura el IRC no lo hace y sigue creciendo hasta su propio punto de saturación

(IRC_{∞}). Esta propiedad es muy importante para el diseño de algoritmos de índices de la señal del suelo y de la vegetación y refleja la condición física obvia de que una superficie cubierta por un cultivo se ve como un cultivo y no como una mezcla de suelo-cultivo. El punto de saturación, llamado también de reflectancia infinita o de medio denso, es función del espectro de las hojas y de su distribución angular (Ross, 1981).

La estimación de f_v usando sensores remotos ha sido aproximada usando análisis espectral de mezclas para extraer la variable biofísica de interés (van Leeuwen *et al.*, 1997), redes neuronales calibradas en función de los patrones de la Figura 4.2 (Baret *et al.*, 1995), soluciones numéricas y estadísticas de los patrones de la Figura 4.2 (Paz *et al.*, 2006; Kallel *et al.*, 2007) o con índices de vegetación (IV), principalmente. Los IV utilizados han sido numerosos para aproximar f_v o IAF (Huete, 1988; Carlson y Ripley, 1997; Purevdorj *et al.*, 1998; Gitelson *et al.*, 2002; Paz *et al.*, 2007 y 2011; Odi *et al.*, 2010; Reyes *et al.*, 2011; Pascual *et al.*, 2012; Romero *et al.*, 2013; Villa *et al.*, 2014). Uno de los índices que más se utilizan es el NDVI = $(IRC-R)/(IRC+R)$ (Rouse *et al.*, 1974), el cual ha sido comparado con simulaciones radiativas y mediciones de campo para analizar su relación con f_v o IAF (Baret *et al.*, 1995; Carlson y Ripley, 1997; Purevdorj *et al.*, 1998).

Los resultados de estos análisis muestran relaciones no lineales y con dispersión grande, particularmente cuando se varían las propiedades ópticas de las hojas y su distribución angular. Paz *et al.* (2007 y 2015) analizan una gran cantidad de índices de vegetación, incluido el NDVI, y señalan que este último es uno de los peores para ser usado en las estimaciones de variables biofísicas. De hecho, Paz *et al.* (2014 y 2015) muestran que solo el índice IV_CIMAS (Romero *et al.*, 2009) cumple con los patrones asociados a evidencia teórica y experimental, hasta el punto de máximo IAF (etapa vegetativa y reproductiva).

3.2.2 Desarrollo de índices espectrales de la vegetación

Aunque hay muchos enfoques para el diseño de IV, en este apartado solo se considera la situación de contar con bases teóricas de transferencia radiativa. El uso de otras bandas espectrales diferentes del R e IRC es discutido en Paz *et al.* (2015), donde se

argumenta que no contribuyen con nueva información o reducción de los errores de estimación.

Para el caso de transformaciones del espacio del R-IRC, Paz *et al.* (2013) analizan sus relaciones en un marco teórico-experimental unificado, por lo que no se consideraran en este apartado. Asimismo, la situación de minimizar o eliminar los efectos atmosféricos no se considera, dadas las revisiones y discusiones de diferentes autores (Myneni y Asrar, 1994; Yoshiaka, 2004; Paz *et al.*, 2005b y 2008).

El diseño de los IV generalmente se plantea para reducir o eliminar los efectos del fondo (suelo) debajo de la vegetación (Huete, 1988), buscando que el IV tenga una relación lineal con la variable biofísica de interés (Huete *et al.*, 1994).

Los IV generalmente reducen en forma irreversible la información disponible (Verstraete *et al.*, 1996), ya que combinan las bandas del R e IRC en un solo valor (IV), que no puede ser invertido para recuperar las bandas espectrales. En este sentido, el diseño de los IV se debe realizar con variables biofísicas relevantes que sean dependientes de la transferencia radiativa suelo-vegetación (Verstraete *et al.*, 1996) para evitar problemas de dependencias indirectas que pueden variar de caso a caso. Como se discute en lo siguiente, las reflectancias de las bandas del R e IRC están correlacionadas, no linealmente, con el IAF y esta relación depende de las propiedades ópticas del suelo y del follaje, además del arreglo de la distribución angular de las hojas.

Para un medio turbio con iluminación difusa, la reflectancia del sistema suelo-vegetación (hojas negras con distribución angular horizontal) se puede estimar de (Kubelka y Munk, 1931; Bonhomme y Varlet-Grancher, 1977; Goudriaan, 1977; Ross, 1981; Price y Bausch, 1995):

$$R_{sv} = \frac{R_{\infty} - R_s R_{\infty}^2 + (R_s - R_{\infty}) \exp(-2K_h IAF)}{1 - [1 + \exp(-2K_h IAF)] R_s R_{\infty} + R_{\infty}^2 \exp(-2K_h IAF)} \quad (3.1)$$

Donde K_h es el coeficiente de extinción para hojas negras horizontales. El término K se usa en forma genérica para definir un coeficiente de extinción.

Para el caso de las bandas del visible, despreciando contribuciones no significativas, la ecuación (1) se puede simplificar como:

$$R_{sv} \approx R_{\infty} - (R_{\infty} - R_s) \exp(-2K_h IAF) \quad (3.2)$$

Donde R_s es la reflectancia del suelo debajo de la vegetación.

Para la banda del IRC, la ecuación (3.2) es una buena aproximación (Paz *et al.*, 2013). En el caso de iluminación directa y difusa, y hojas no negras y no horizontales, la relación (3.2) sigue siendo válida, pero con parámetros ajustados a esta situación:

$$R_{sv} \approx R_{\infty} - (R_{\infty} - R_s) \exp(-2K_R IAF) \quad (3.3)$$

Donde K_R es el coeficiente de extinción para la banda R (rojo o infrarrojo cercano).

La inversión de la ecuación (2) dada por:

$$IAF = -\frac{1}{2K_R} \ln\left(\frac{R_{\infty} - R_{sv}}{R_{\infty} - R_s}\right) \quad (3.4)$$

ha sido usada por Price (1992), Price y Bausch (1995), Paz *et al.* (2011 y 2014) para estimaciones del IAF o diseño de índices de vegetación proporcionales al IAF.

El formato de la ecuación (3.3), después de la revisión de los patrones de los IV al usar simulaciones radiativas o datos experimentales, ha sido propuesto por Clevers (1989) y Baret y Guyot (1991) para caracterizar a los índices de vegetación:

$$IV \approx IV_{\infty} - (IV_{\infty} - IV_s) \exp(-2K_{IV} IAF) \quad (3.5)$$

Paz *et al.* (2011) propusieron el IVIS usando la formulación (3.5), para el caso de utilizar el índice dIRC = IRC_{sv} - (a_S+b_{SR}), donde la línea del suelo de la Figura 3.1 y 2.1 está dada por:

$$IRC_s = a_s + b_s R_s \quad (3.6)$$

(s se refiere a la condición de suelo desnudo) y el índice de vegetación IVIS por:

$$IVIS = -\ln\left(\frac{dIRC_{\infty} - dIRC}{dIRC_{\infty} - dIRC_s}\right)$$

$$dIRC = IRC - (a_s + b_s R)$$

$$dIRC_{\infty} = IRC_{\infty} - (a_s + b_s R_{\infty})$$

$$dIRC_s = IRC_s - (a_s + b_s R_s)$$
(3.7)

El índice dIRC es la distancia vertical proyectada de una reflectancia sobre una línea de iso-IAF o iso-fv hasta la línea del suelo, Figura 3.3.

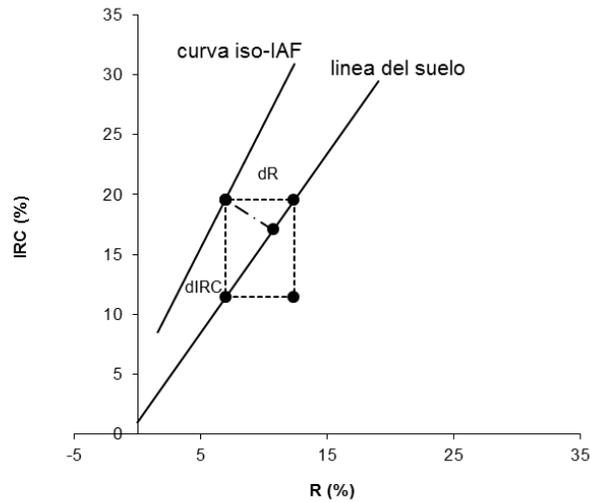


Figura 3.3. Relación de los índices dIRC y dR.

Conocidos los parámetros de la línea del suelo (o supuestos como asociados a una línea del suelo “virtual”), entonces tenemos que $dIRC_s = 0$, por lo que la ecuación (3.7) se simplifica a:

$$IVIS = -\ln\left(1 - \frac{dIRC}{dIRC_{\infty}}\right)$$
(3.8)

De la discusión previa, el IVIS está relacionado linealmente con el IAF:

$$IVIS = \left(\frac{1}{2K_{IVIS}} \right) IAF \quad (3.9)$$

Usando simulaciones radiativas con el modelo SAIL, la Figura 3.4 muestra la relación del IVIS con el IAF para un suelo oscuro y uno claro, con cambios de humedad tal como los discutidos en la Figura 3.1.

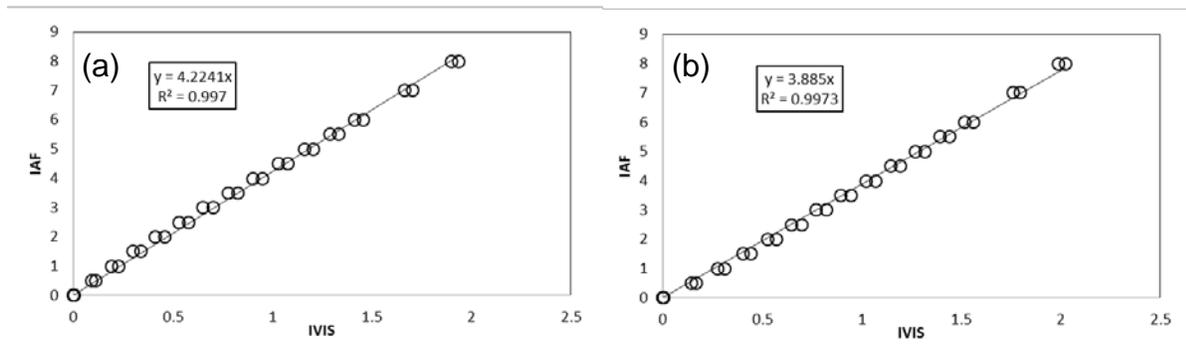


Figura 3.4. Relación entre el IVIS y el IAF para suelo oscuro (a) y suelo claro (b).

Los resultados mostrados en la Figura 3.4 indican que el IVIS no tiene los problemas de saturación de los otros IV, además que muestra una relación lineal con valores altos del IAF (IAF = 8). Resulta claro que la relación (3.9) debe ampliarse para considerar el efecto de las propiedades ópticas del suelo debajo de la vegetación, ya que para un KIVIS similar, la relación (3.9) cambia (Figura 3.4).

Para el caso de datos experimentales la relación (3.9) se conserva (Paz *et al.*, 2011).

La relación entre el IAF y f_v (en %), de consideraciones teóricas y experimentales, está dada por (Nilson, 1971; Ross, 1981):

$$f_v = 100[1 - \exp(-K_v IAF)] \quad (3.10)$$

Donde K_v es el coeficiente de extinción de la parte fotosintética de la vegetación (bandas del visible).

Modelo generalizado de los patrones espectrales del R-IRC

Usando como referencia los patrones espectrales de los cambios en el follaje de la vegetación (Sinclair *et al.*, 1971; Boyer *et al.*, 1988; Gitelson y Merzlyak, 1994; Merzlyak y Gitelson, 1995), se puede modelar la respuesta de los fitoelementos de una planta durante su dinámica de crecimiento (Jacquemoud y Baret, 1990; Jacquemoud *et al.*, 1996). Con este conocimiento, es posible plantear un modelo generalizado de patrones espectrales del R-IRC, que considere el ciclo de crecimiento de los cultivos (vegetación herbácea), desde su emergencia hasta su senescencia. Baret (1986) presenta evidencia experimental en cultivos de cereales de este tipo de patrones; aunque solo a niveles descriptivos.

La Figura 3.5 muestra la dinámica del IAF durante el ciclo de crecimiento de un cultivo, al utilizar el espacio temporal; y, la Figura 3.6 usa el espacio espectral del R-IRC, usando dos tipos de suelos como fondos. De estas figuras se pueden definir tres patrones generales:

a).- Patrón A: Esta etapa va desde la emergencia a la madurez fisiológica del cultivo, hasta la antesis. En el espacio temporal se caracteriza por un crecimiento exponencial del follaje, hasta lograr el cubrimiento máximo del suelo y después hay una transición a un crecimiento tipo lineal, Figura 3.5. El patrón discutido se puede modelar en forma simple al usar un modelo expo-lineal de crecimiento (Goudriaan, 1977; Goudriaan y Monteith, 1990). En el espacio espectral, esta dinámica se caracteriza por la evolución de las curvas iso-IAF hasta alcanzar el punto de saturación del rojo (reflectancia de medio denso), Figura 3.6. En relación a las propiedades ópticas de las hojas, estas sufren cambios (patrones exponenciales), que reflejan los cambios en las concentraciones de pigmentos (clorofilas y carotenoides) en la región visible (espacio del R). En el IRC, los cambios son más pequeños.

b).- Patrón B. Va desde la antesis hasta antes del inicio de la senescencia y se caracteriza por un IAF constante (nacimiento y muerte de hojas equilibrado), Figura 3.5. En el espacio espectral del R-IRC, este patrón se caracteriza porque la reflectancia del R permanece relativamente constante y el IRC se incrementa y después disminuye,

Figura 3.6, reflejando los cambios que se producen en el follaje de las plantas, donde la etapa de disminución del IRC refleja una degradación inicial del mesófilo de las hojas. Es importante enfatizar, que en muchos cultivos en que no se logra el cubrimiento total del suelo (y la densidad del follaje suficiente), la línea recta que caracteriza este patrón está ligeramente inclinada. Adicionalmente, la línea recta mostrada en la Figura 3.6 generalmente forma un ovalo alargado, producto de la floración / llenado de grano que se presenta la inicio de esta etapa del crecimiento.

c).- Patrón C. Va desde el inicio de la senescencia hasta su cosecha o muerte del cultivo. El espacio temporal se caracteriza por un patrón tipo exponencial, Figura 3.1. El patrón es similar en espacio del R-IRC y se caracteriza por el incremento del R debido a la degradación de los pigmentos de las hojas y la reducción del IRC por el deterioro de la estructura del mesófilo.

En el caso de la muerte del cultivo y su transformación a residuo vegetal cubriendo el suelo, la curva final de residuos es lineal (Wanjura y Bilbao, 1986; Baird y Baret, 1997).

Un punto importante de señalar, es que al inicio de la etapa de senescencia, el patrón espectral de las curvas iso-IAF es muy similar al de la etapa B, por lo que es posible caracterizar la etapa B, al usar esta información.

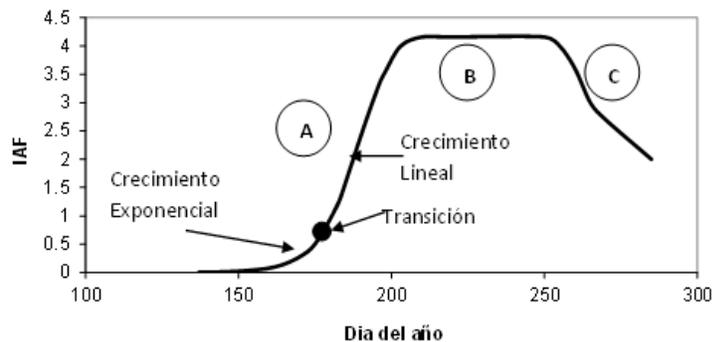


Figura 3.5. Patrón temporal del IAF de un cultivo.

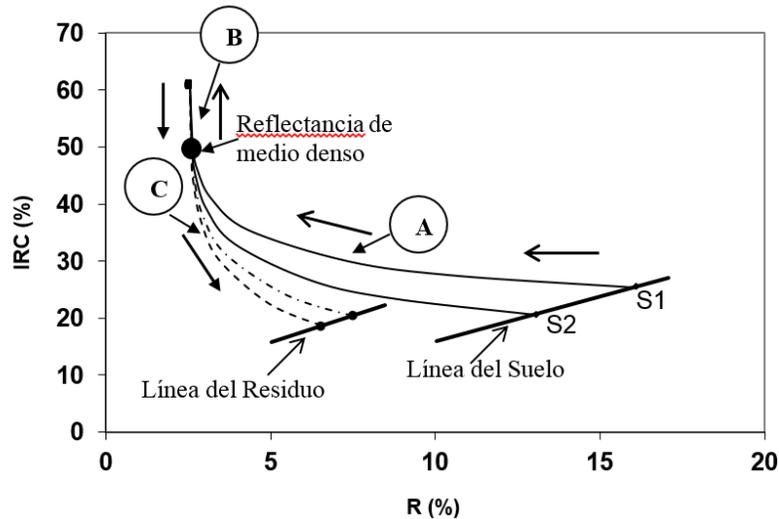


Figura 3.6. Patrón espectral en el espacio R-IRC del crecimiento de un cultivo

De acuerdo a lo mostrado en la Figura 3.5, después de la fase lineal del patrón A, se presenta una fase exponencial hasta llegar al punto de la meseta en el IAF. La fase lineal se representa en la Figura 3.5 como el patrón B en su etapa creciente y el exponencial posterior como la fase decreciente de este patrón. En esta situación, el modelo exponencial requiere generalizarse para una nueva fase.

En relación al uso de los índices de vegetación para estimar f_v , los resultados muestran relaciones diferentes para la etapa vegetativa-reproductiva y la de senescencia (Gilbert *et al.*, 1996; Odi *et al.*, 2010), por lo que es importante el desarrollo de un IV que tenga una relación única con la vegetación, durante todo el ciclo completo del crecimiento.

3.3 DISEÑO DE INDICES DE VEGETACIÓN EN ESPACIOS NORMALIZADOS Y ESTANDARIZADOS

Usando las simulaciones radiativas de la Figura 2.1, normalizándolas (con multiplicación por -1 para hacerlas positivas) y estandarizándolas a la geometría sol-sensor definida, la Figura 3.7 muestra los patrones iso-IAF o iso- f_v en el espacio R_n - IRC_n .

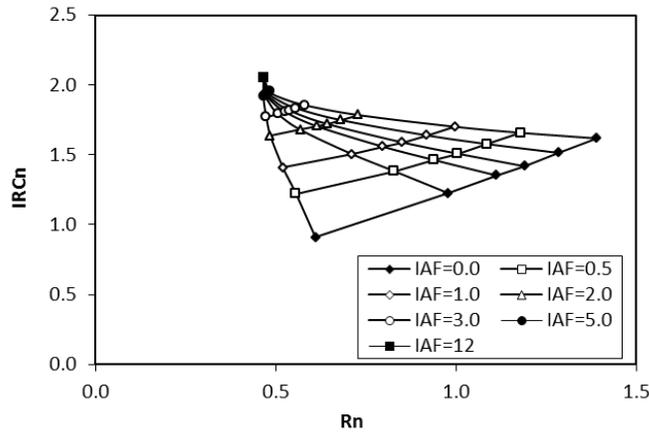


Figura 3.7. Patrones del crecimiento de la vegetación en el espacio Rn-IRCn.

Al usar los análisis previos, una primera propuesta se puede utilizar reflectancias normalizadas (letra n) y definir el índice IVISn en función de estas:

$$IVISn = -\ln\left(\frac{dIRC\infty n - dIRCn}{dIRC\infty n - dIRCsn}\right)$$

$$dIRCn = IRCn - (a_{Sn} + b_{Sn} Rn)$$

$$dIRC\infty n = IRC\infty n - (a_{Sn} + b_{Sn} R\infty n)$$

$$dIRCsn = IRCsn - (a_{Sn} + b_{Sn} Rsn) \quad (3.11)$$

Conocidos los parámetros de la línea del suelo (o supuestos como asociados a una línea del suelo “virtual”), espacios normalizados y estandarizados, entonces se tiene que $dIRCsn = 0$, por lo que la ecuación (3.11) se simplifica a:

$$IVISn = -\ln\left(1 - \frac{dIRCn}{dIRC\infty n}\right) \quad (3.12)$$

La Figura 3.8 muestra la relación entre el índice de área foliar (IAF) y el IVISn para el caso de las simulaciones radiativas de la Figura 3.7, donde se ha eliminado el suelo más oscuro (valor de la banda del R más pequeño), que presenta desviaciones de los patrones lineales. Este suelo tiene un reflectancia muy baja ($R_s = 1\%$), por lo que no se considera como posible en la mayoría de los ecosistemas terrestres en México.

El uso de reflectancias normalizadas y estandarizadas evita el problema que se asocia a los errores en el espacio R-IRC al realizar estas estimaciones a partir de R_n e IRC_n (Bolaños *et al.*, 2007). Con este enfoque es posible reducir fuertemente la propagación de errores.

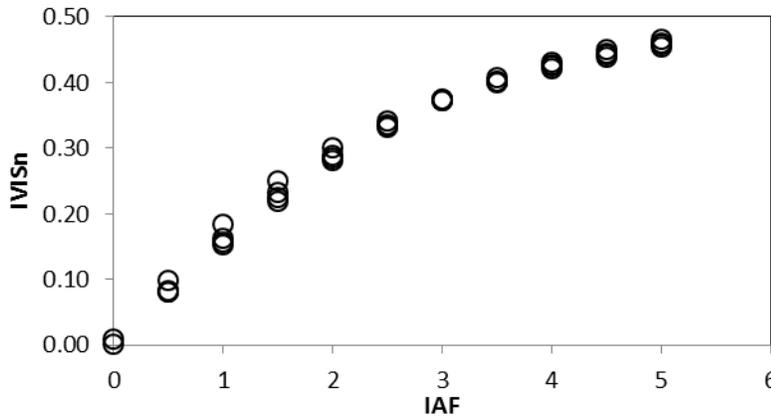


Figura 3.8. Relación entre el IAF e IVISn para las simulaciones radiativas (IAF de 0 a 5).

Se observa de la Figura 3.8 que la relación entre el IAF y el IVISn es de tipo exponencial, por lo que se requiere realizar una transformación logarítmica de IAF. Dado que $\ln(\text{IAF}=0)$ no está definido, se usó la variable $\text{IAF}+1$, $\ln(\text{IAF}=0 + 1) = 0$, tal como se muestra en la Figura 3.9.

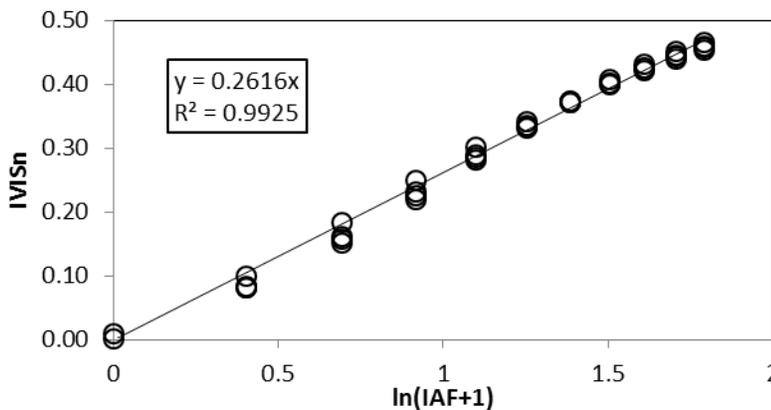


Figura 3.9. Relación entre $\ln(\text{IAF}+1)$ e IVISn para las simulaciones radiativas (IAF de 0 a 5).

De la Figura 3.8, la transformación logarítmica que se usa genera una relación lineal; aunque para valores del IAF >3 se nota una desviación del patrón lineal.

De los patrones iso-suelo de la Figura 3.7, cuasi-lineales, es posible introducir un nuevo índice espectral de la vegetación que este armonizado a la normalización de las reflectancias, convirtiendo los patrones exponenciales de las líneas iso-suelo en lineales. El índice IV_PELANA (Índice de Vegetación de Proporciones Estandarizadas en relación al Limite Asociado a espacios Normalizados y sus Atrayentes) definido por:

$$IV_PELANA = \frac{dIRCn}{dIRC\infty} \quad (3.13)$$

cumple el objetivo planteado en relación a la variable fv.

La Figura 3.10, similar a la Figura 3.4, pero con reflectancias normalizadas y estandarizadas, muestra que la relación entre el IV_PELANA y fv cumple los objetivos planteados para un IV (Huete et al., 1994). La Figura 3.4 muestra valores del IAF de 0 a 8, convertidos a fv.

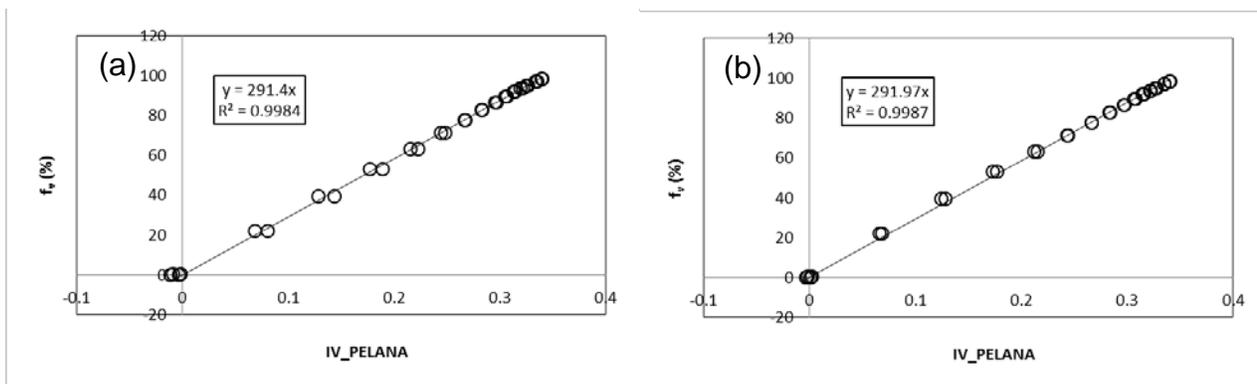


Figura 3.10. Relación entre el Índice de vegetación de proporciones estandarizadas y fv para suelo oscuro (a) y claro (b), con IAF de (0 a 8).

3.4 VALIDACION DE LA RELACION DEL IV_PELANA CON fv USANDO DATOS EXPERIMENTALES

Para validar el modelo lineal entre el IV_PELANA y fv, en lo siguiente se analizan diferentes experimentos publicados previamente, bajo diferentes perspectivas.

3.4.1 Experimentos de cultivos agrícolas con diferentes suelos

El experimento de algodón de Huete *et al.* (1985) y el de maíz de Bausch (1993), discutidos por Paz *et al.* (2007 y 2011), utilizaron charolas rellenas de suelos diferentes puestos debajo de los cultivos, por lo que simulan los patrones de la Figura 2.1. La Figura 3.11 muestra la evolución temporal del fv de los cultivos, donde se muestra que cubren la etapa vegetativa y reproductiva, hasta el valor máximo de crecimiento (IAF o fv).

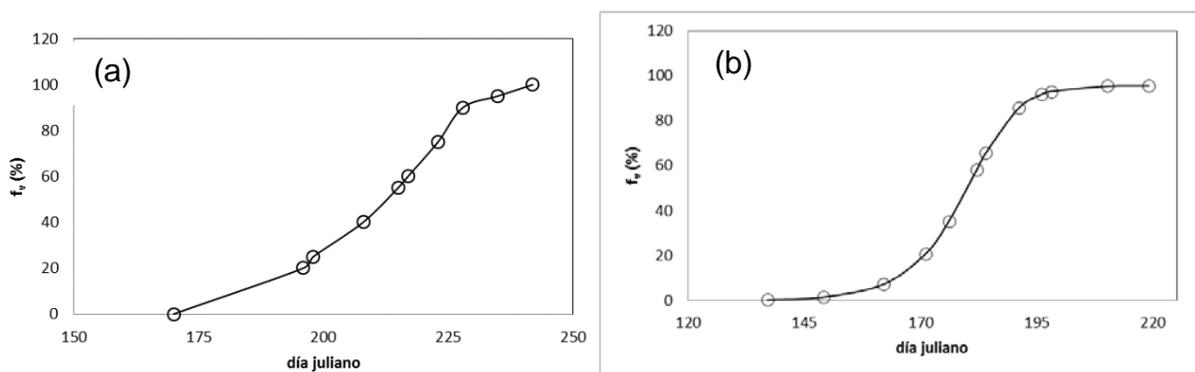


Figura 3.11. Evolución temporal de fv: (a) algodón y (b) maíz.

La Figura 3.12 muestra la relación IV_PELANA con el fv para el algodón, con distintos tipos de suelos (oscuros y claros), considerando cambios de humedad en cada uno de ellos: (a) Oscuro 1 ($R_s = 2.9$ a 6.2), (b) Oscuro 2 ($R_s = 12.6$ a 15.8), (c) Claro 1 ($R_s = 10.7$ a 18.8) y (d) Claro 2 ($R_s = 18.7$ a 33.7).

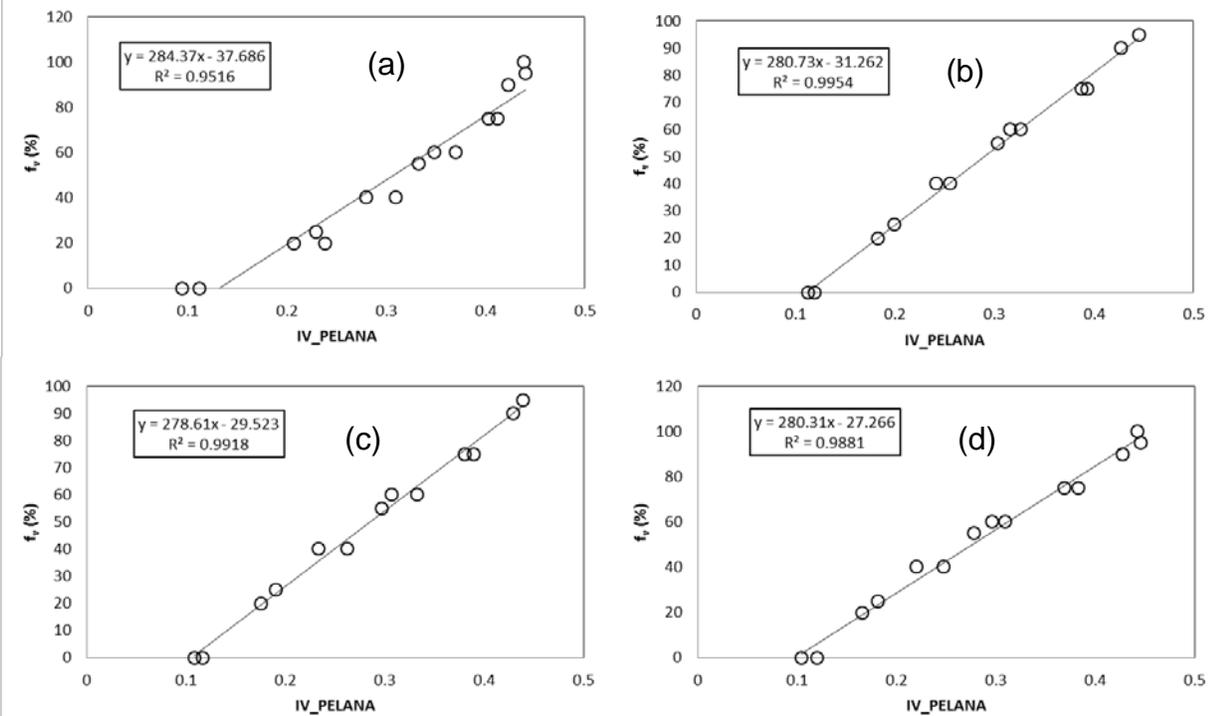


Figura 3.12. Relación entre el IV_PELANA y fv para el cultivo de algodón con distintos tipos de suelos.

Se observa de la Figura 3.12, que la relación lineal está bien establecida, con algo de no linealidad para el caso del suelo oscuro (Figura 3.12a). En la estimación del IV_PELANA se usó un suelo virtual (asn = 0 y bsn = 0.8), por lo que el valor mínimo no es 0.0.

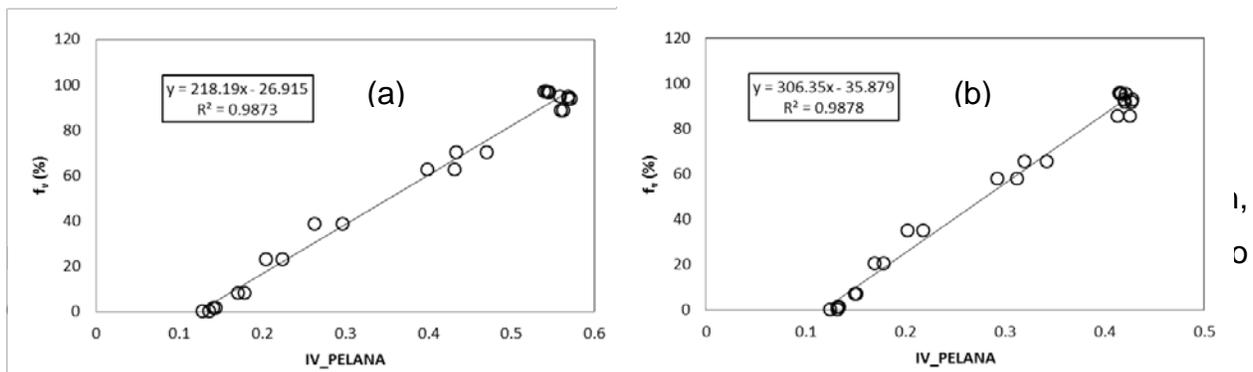


Figura 3.13. Relación entre el IV_PELANA y fv para el cultivo de maíz con distintos tipos de suelos debajo del cultivo: (a) Oscuro (Rs = 6.0 a 12:0), (b) Claro (Rs = 16.0 a 30.1)

En el caso del cultivo de maíz no se midió f_v , por lo que fue estimada de la relación (3.10) usando un coeficiente de extinción aproximado. Paz *et al.*, (2011) muestran relaciones lineales entre el IVIS y el IAF, lo que valida en forma indirecta las relaciones de la Figura 3.13

Experimentos de cultivos agrícolas con suelos similares y diferentes niveles de estrés

En un experimento realizado el 2008 en el Valle del Yaqui, Sonora, México, se midieron las reflectancias semanalmente en parcelas homogéneas (PH) en cinco cultivos agrícolas. Los suelos tuvieron propiedades ópticas similares entre sí. La Figura 3.14 muestra el arreglo experimental usado por PH, donde se establecieron dos líneas de muestreo y en cada una cinco puntos de muestreo. Las mediciones durante todo el muestreo se realizaron en los mismos puntos establecidos. Reyes *et al.* (2011) y Pascual *et al.* (2012) detallan la campaña de muestreo y resultados obtenidos.

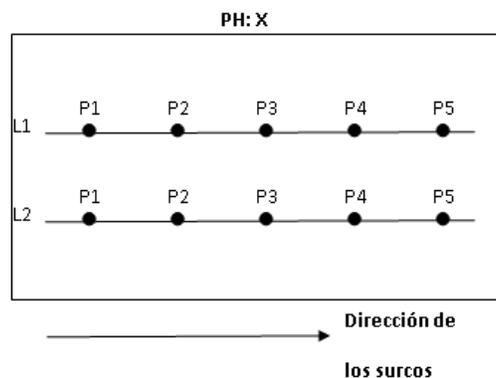


Figura 3.14. Diseño experimental de muestreo en las parcelas homogéneas de la campaña del Valle del Yaqui, Sonora, México.

Las variables biofísicas que se midieron fueron la biomasa fresca y seca y la f_v . Aunque existen diferentes formas de medir la cobertura aérea foliar (Coulloudon *et al.*, 1996), en este caso se usaron fotografías digitales a nadir, las cuales se procesaron usando técnicas de clasificación estadística supervisada (Calera *et al.*, 2001) para determinar f_v . Este tipo de método se compara relativamente bien con otros de mayor esfuerzo y

tiempo; aunque es dependiente de los algoritmos que se usó para determinar la fracción de vegetación verde (Booth *et al.*, 2006).

Los cultivos sorgo, trigo, frijol, garbanzo y cártamo se evaluaron en diferentes etapas de su crecimiento (fueron sembrados con fechas diferentes), tal como se muestra en la Figura 3.15. Los gráficos de la evolución temporal de f_v son solo indicativos, donde para cultivos específicos, los diferentes puntos de muestreo muestran fechas diferentes de alcance del f_v máximo, así como del valor de este. Reyes *et al.*, (2011) analizaron a los puntos de muestreo en forma individual para caracterizar los niveles de estrés a que estuvieron sujetos, por lo que en lo siguiente se considera un formato similar.

El Cuadro 3.1 muestra los resultados de los ajustes de la relación IV_PELANA con f_v ($f_v = a + bIV_PELANA$) para los cultivos analizados (sorgo, trigo, frijol, garbanzo y cártamo)), para la etapa vegetativa-reproductiva y la de senescencia como un todo, cuando las etapas estaban presentes. En el caso del trigo solo se muestreo la etapa de senescencia y solo se consideraron los muestreos que tuvieran cuatro datos. Para el caso del sorgo, solo se realizaron medición en la etapa vegetativa-reproductiva. El IV_PELANA mínimo representa el valor del índice para la condición sin cultivo (suelo desnudo), ya que se usó una línea virtual del suelo.

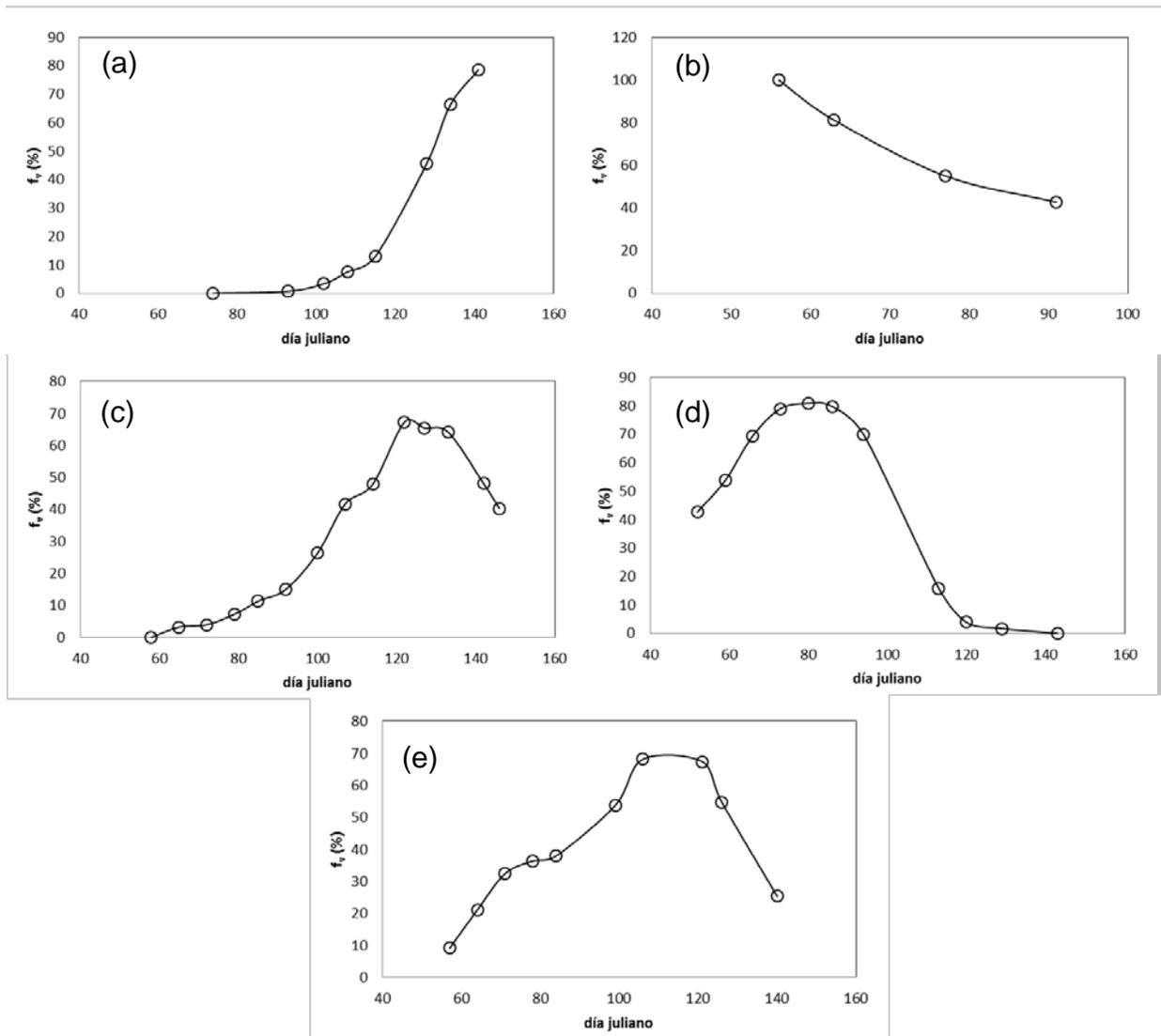


Figura 3.15. Patrones típicos de la evolución temporal del f_v de los cultivos agrícolas de la campaña del Valle del Yaqui, Sonora, México: (a) sorgo, (b) trigo, (c) frijol, (d) garbanzo y (e) cártamo.

Cuadro 3.1. Resultados del ajuste de la relación IV_PELANA con fv en Valle del Yaqui

Cultivo	Línea	Punto	a	b	R2	IV_PELANA Min	fv max
Sorgo	1	1	-29.666	290.49	0.9889	0.102	63.371
	1	2	-28.808	300.36	0.9769	0.096	75.177
	1	3	-30.284	290.79	0.9974	0.104	70.136
	1	4	-28.899	286.42	0.9775	0.101	67.431
	1	5	-30.011	297.81	0.9800	0.101	74.295
	2	1	-37.162	343.36	0.9921	0.108	78.522
	2	2	-34.591	324.45	0.9980	0.107	79.149
	2	3	-34.726	323.09	0.9932	0.107	75.085
	2	4	-28.776	276.32	0.9970	0.104	79.873
	2	5	-37.920	347.33	0.9685	0.109	83.575
Trigo	1	4	-253.250	770.47	0.8305	0.329	100.000
	1	5	-228.510	711.96	0.7316	0.321	100.000
	2	3	-278.510	832.03	0.8767	0.335	100.000
Frijol	1	1	-49.243	408.19	0.9733	0.121	70.904
	1	2	-42.866	363.24	0.9751	0.118	68.949
	1	3	-38.880	342.25	0.9537	0.114	67.214
	1	4	-50.029	405.85	0.9751	0.123	75.083
	1	5	-48.992	395.95	0.9377	0.124	69.924
	2	1	-44.257	360.08	0.9586	0.123	66.986
	2	2	-41.767	344.52	0.9636	0.121	75.704
	2	3	-57.991	445.26	0.9832	0.130	75.535

	2	4	-39.867	339.93	0.9559	0.117	65.073
	2	5	-50.589	385.13	0.9725	0.131	61.906
	<hr/>						
	1	1	-43.886	371.57	0.9781	0.118	80.925
	1	2	-40.318	367.81	0.9071	0.110	77.157
	1	3	-41.953	371.69	0.9401	0.113	60.045
	1	4	-33.798	335.34	0.9295	0.101	61.740
	1	5	-36.178	331.18	0.8888	0.109	55.120
Garbanzo	2	1	-50.612	397.96	0.9669	0.127	85.348
	2	2	-56.372	424.42	0.9783	0.133	88.235
	2	3	-44.332	377.36	0.9614	0.117	81.918
	2	4	-44.007	373.03	0.9444	0.118	80.929
	2	5	-51.232	413.10	0.9778	0.124	71.419
	<hr/>						
	1	1	-21.348	252.46	0.9612	0.085	69.787
	1	2	-26.744	259.23	0.9617	0.103	73.348
	1	3	-21.543	236.48	0.9728	0.091	61.739
	1	4	-20.355	232.24	0.9215	0.088	63.172
	1	5	-19.821	229.69	0.8445	0.086	68.136
Cartamo	2	1	-35.465	316.96	0.9407	0.112	87.623
	2	2	-30.779	291.29	0.9256	0.106	81.656
	2	3	-37.827	329.46	0.9750	0.115	88.039
	2	4	-29.919	289.52	0.9546	0.103	72.376
	2	5	-39.765	330.89	0.9478	0.120	87.028
	<hr/>						

En el Cuadro 3.1 se muestra los valores de f_v máxima, que puede ser usada como una medida del nivel de estrés de cada punto de muestreo, concordando con lo planteado por Reyes *et al.* (2011).

Las Figuras 3.16 a 3.20 muestran el mejor y peor ajuste estadístico a la relación lineal entre el IV_PELANA y f_v . De los errores asociados a las mediciones en campo, la hipótesis de la relación lineal se válida para este experimento.

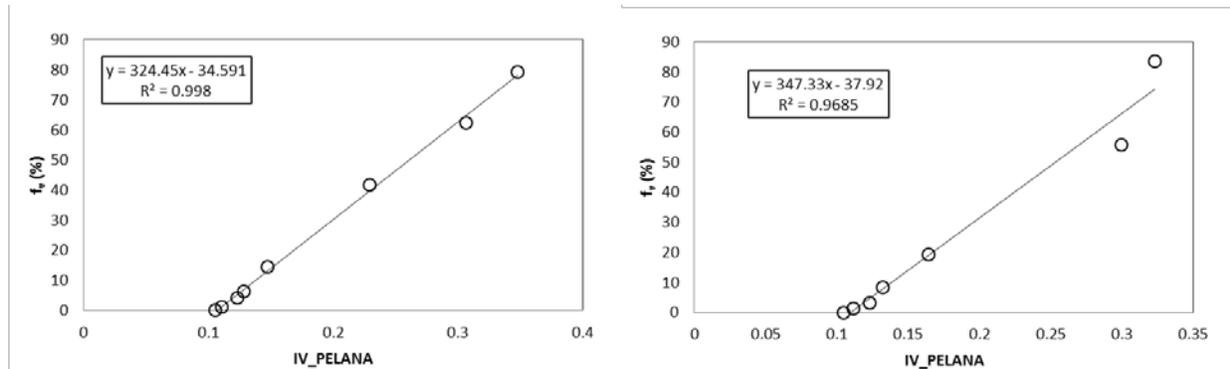


Figura 3.16. Relación IV_PELANA con f_v , cultivo sorgo.

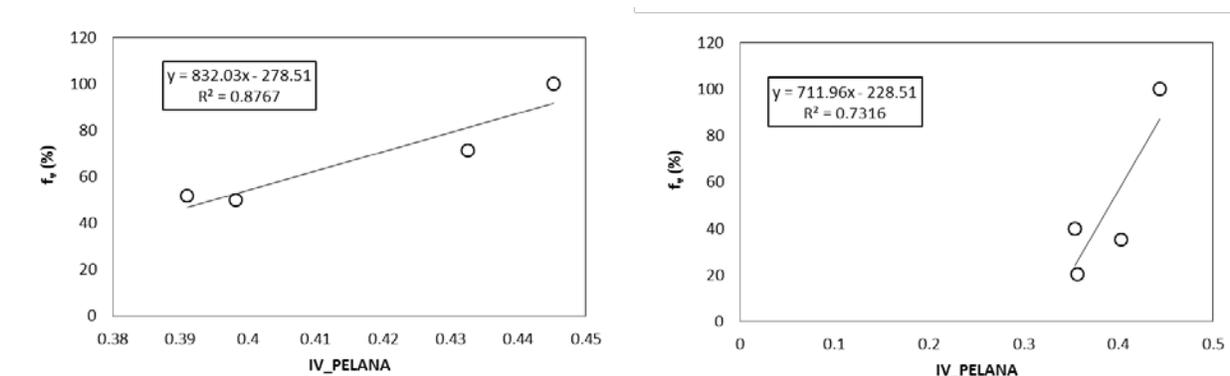


Figura 3.17. Relación IV_PELANA con f_v , cultivo trigo.

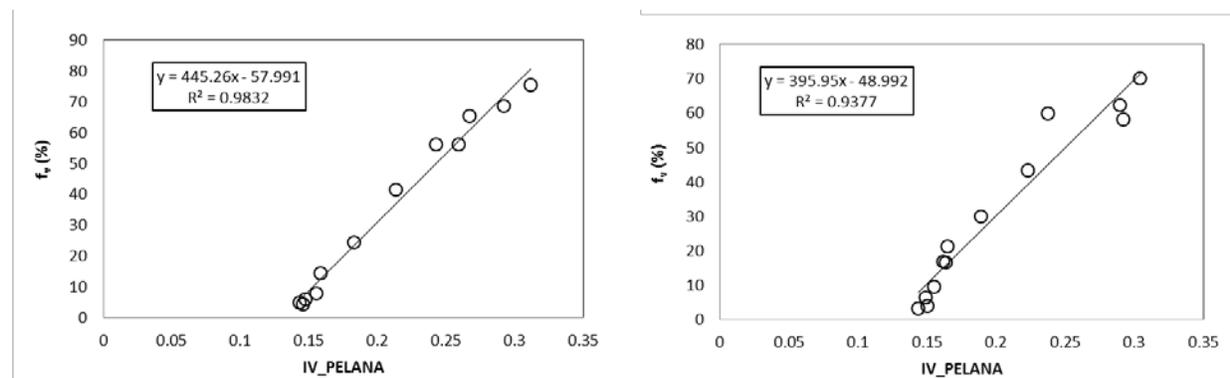


Figura 3.18. Relación IV_PELANA con f_v , cultivo frijol.

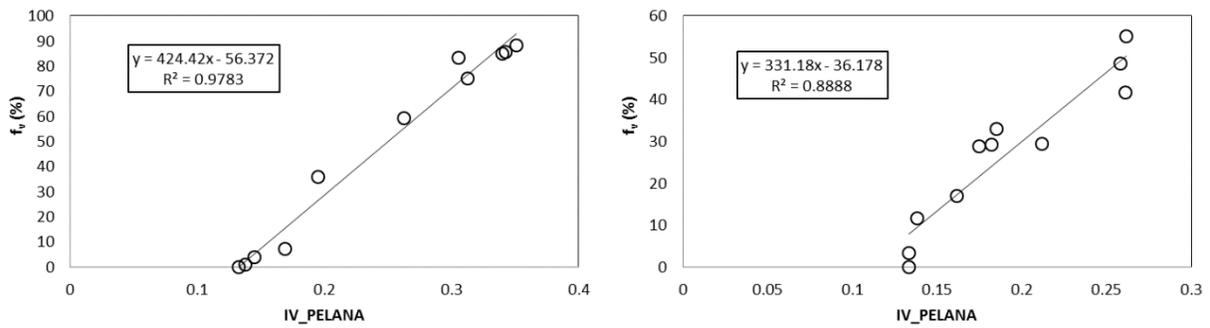


Figura 3.19. Relación IV_PELANA con fv, cultivo garbanzo.

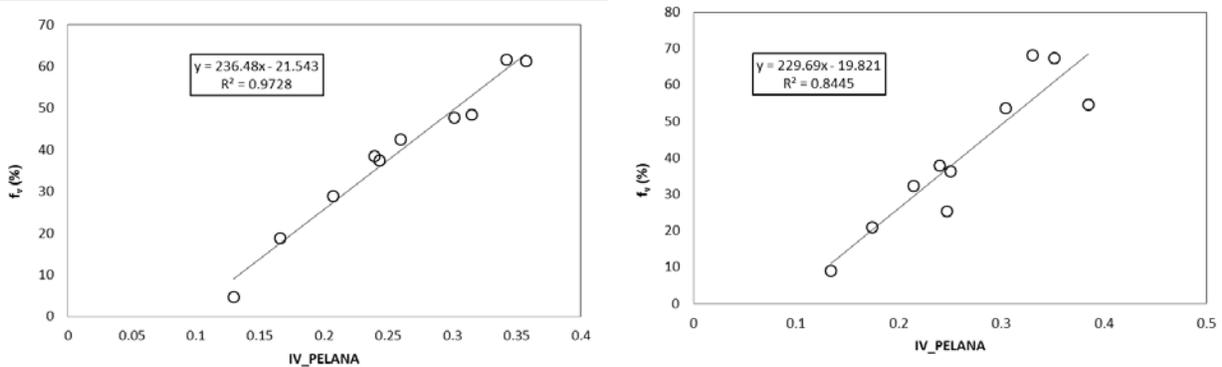


Figura 3.20. Relación IV_PELANA con fv, cultivo cártamo.

3.4.2 Experimento de reflectancia en pasto con mediciones multi-angulares

La Figura 3.21 muestra la evolución temporal de la biomasa total y la viva (verde) de mediciones multi-angulares de reflectancia realizadas en un pastizal natural (*Buteloua spp.*) en la cuenca de Walnut Gulch, Arizona, EE.UU. en 1990. El experimento está descrito en Huete *et al.*, (1992), Chehbouni *et al.*, (1994) y Qi *et al.*, (1994). El análisis de las reflectancias multi-angulares se discute en Bolaños *et al.* (2007) y Bolaños y Paz (2010).

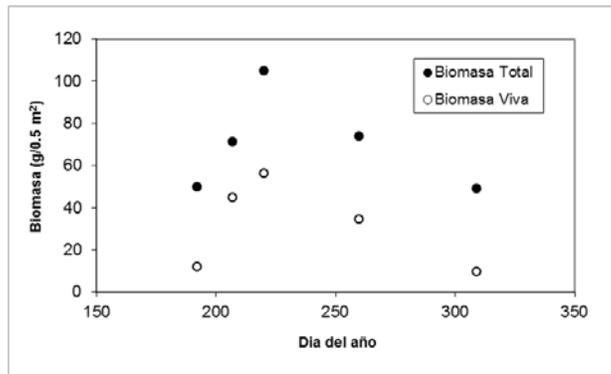


Figura 3.21. Evolución temporal de la biomasa total y viva del experimento de Walnut Gulch, Arizona

En la Figura 3.22 se muestra la relación entre el IV_PELANA y f_v del experimento de Walnut Gulch, donde f_v fue estimada de convertir la biomasa aérea viva a IAF y de allí a f_v , bajo la consideración de un f_v máximo del 40 %, definido en el experimento.

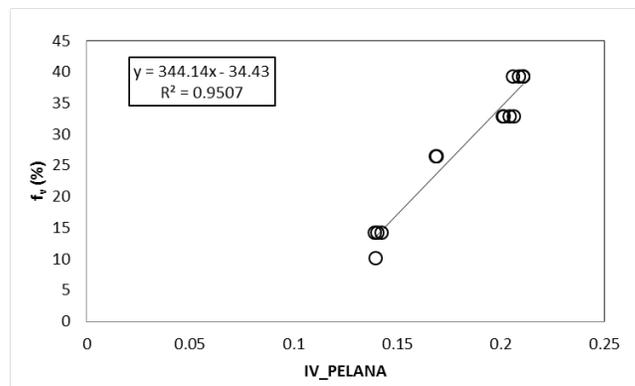


Figura 3.22. Relación entre IV_PELANA y f_v para el experimento de Walnut Gulch.

3.4.3 Maqueta experimental

Los experimentos tipo maqueta se refieren a arreglos de plantas, con un suelo debajo de ellas, en una plataforma de medición de reflectancias. En lo general, las plantas son pequeñas (juveniles) y son las mismas para diferentes densidades (IAF o biomasa aérea)

Para un experimento relativamente similar con otro pasto (Huete y Jackson, 1988; Huete *et al.*, 1992), la Figura 3.25 muestra la relación entre el IV_PELANA y f_v , esta última variable estimada después de convertir la biomasa aérea a IAF y de IAF a f_v , todo esto en términos aproximados.

En el caso de este experimento de pastos, con diferentes densidades, se utilizaron tres suelos, lo cual está mostrado en la Figura 3.25. Las relaciones lineales entre el IV_PELANA y f_v son buenas.

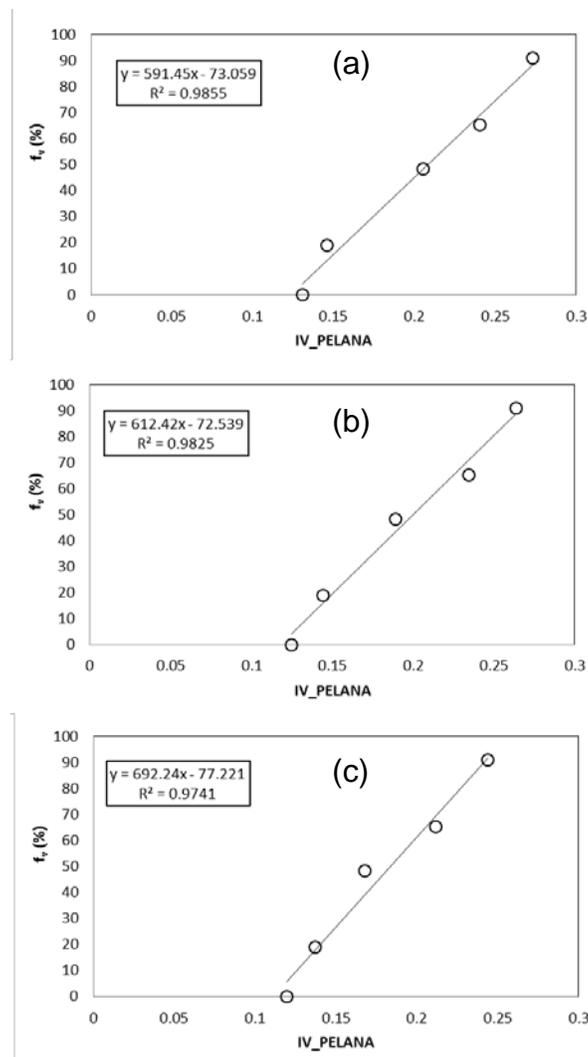


Figura 3.25. Relación entre el IV_PELANA y el f_v para otro pasto, con diferentes suelos.: (a) Oscuro ($R_s = 8.1$), (b) Medio ($R_s = 15.5$) y (c) Claro ($R_s = 37.5$).

3.5 Efectos de la distribución angular y propiedades ópticas de las hojas

En la Figura 2.1 (Paz *et al.*, 2005a) las simulaciones radiativas corresponden a propiedades ópticas (transmitancia y reflectancia) hojas de maíz (Gausman *et al.*, 1973) y distribución angular erectófila (Bunnik, 1978). La Figura 3.26 muestra estas mismas simulaciones, para los suelos extremos en propiedades ópticas, pero incluyendo el caso de una hoja de sorgo. Como se observa, las reflectancias en el infinito se modifican, cambiando también las relaciones entre el IVIS-IAF (IV_PELANA-fv).

Dejando fijas las propiedades ópticas de las hojas (maíz), en la Figura 3.27 se muestran los cambios en la distribución angular de las hojas, produciendo efectos similares a los discutidos para la Figura 3.26.

No obstante los cambios mostrados en las Figuras 3.26 y 3.27, Casiano *et al.* (2012) plantean la hipótesis de invarianza temporal en los atrayentes (reflectancias en el infinito) de las dinámicas del crecimiento de la vegetación. Las reflectancias en el infinito son dependientes de las propiedades ópticas y de la distribución angular de las hojas (Ross, 1981), por lo que de acuerdo a la hipótesis de invarianza temporal, las plantas modifican simultáneamente ambas propiedades para mantener las mismas reflectancias en el infinito, aun bajo condiciones de estrés. Esto implica que los patrones entre el IV_PELANA y el fv se mantienen similares para un tipo dado de suelo.

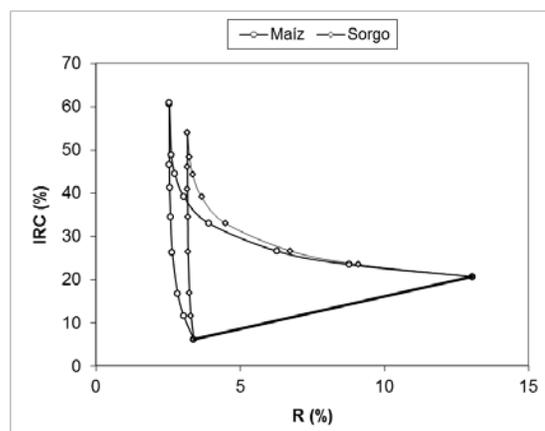


Figura 3.26. Efecto del cambio de las propiedades ópticas de las hojas, con una distribución angular erectófila.

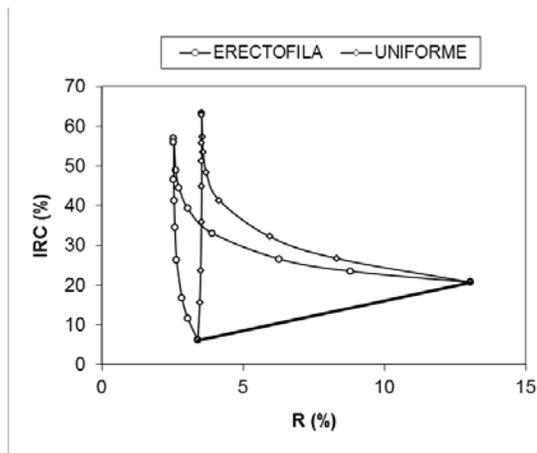


Figura 3.27. Efecto de cambio de la distribución de las hojas en maíz al mantener las propiedades ópticas.

3.6 CONCLUSIONES

Los desarrollos mostrados en relación a los patrones de la transferencia radiativa en el medio suelo-vegetación, para la generación del índice espectral de la vegetación IV_PELANA, sin problemas de geometría sol-sensor, permitieron establecer una relación lineal con la cobertura aérea foliar (fv).

Los datos experimentales analizados, diferentes arquetipos de plantas herbáceas, validaron la relación lineal establecida, permitiendo el uso del IV_PELANA en forma robusta y operativa.

3.7 LITERATURA CITADA

- Baird, F., and F. Baret. 1997. Crop residue estimation using multiband reflectance. *Remote Sensing of Environment* 59:530-536.
- Baret, F. 1986. Contribution au suivi radiometrique de cultures de cereales. Ph.D. Thesis. Universite de Paris-Sud Orsay, Paris. 182 pp.
- Baret, F., and G. Guyot. 1991. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. *Remote Sensing of Environment* 35:161-173.
- Baret, F., J.G.P.W. Clevers, and M.D. Steven. 1995. The robustness of canopy gap fraction estimates from red and near-infrared reflectances: a comparison of approaches. *Remote Sensing of Environment* 54: 141-151.
- Baret, F., S. Jacquemoud, and J.F. Hanocq. 1983. The soil line concept in remote sensing. *Remote Sensing Reviews* 7: 65-82.
- Bausch, W.C. 1993. Soil background effects on reflectance-based crop coefficients for corn. *Remote Sensing of Environment* 46: 213-222.
- Bonhomme, R. and C. Varlet-Grancher. 1977. Application aux couverts vegetaux de lois rayonnement en milieu diffusant I Etablissement des lois et verifications experimentales. *Ann. Agronomie* 28: 567-582.
- Bolaños, M., F. Paz, E. Palacios, E. Mejía, y A. Huete. 2007. Modelación de los efectos de la geometría sol-sensor en la reflectancia de la vegetación. *Agrociencia* 41: 527-537.
- Bolaños, M., y F. Paz. 2010. Modelación general de los efectos de la geometría iluminación-visión en la reflectancia de pastizales. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias* 1:349-361.
- Booth, D.T., S.E. Cox, T.W. Meikle, and C. Fitzgerald. 2006. The accuracy of ground-cover measurements. *Rangeland Ecology Management* 59: 179-188.

- Boyer, M., J. Miller, M. Belanger, and E. Hare. 1988. Senescence and spectral reflectance in leaves of Northern Pin Oak (*Quercus palustris* Muench.). *Remote Sensing of Environment* 25: 71-87.
- Bunnik, N.J.J. 1978. The multispectral reflectance of shortwave radiation by agricultural crops in relation with their morphological and optical properties. 78-1. Wageningen, The Netherlands 175 p.
- Calera, A., C. Martíne, and J. Meliá. 2001. A procedure for obtaining green plant cover: relation to NDVI in a case study for barley. *International Journal of Remote Sensing* 22:3357-3362.
- Carlson, T.N., and D.A. Ripley. 1997. On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote Sensing of Environment* 62: 241-252.
- Casiano, M., F. Paz, A. Zarco, M. Bolaños, y E. Palacios. 2012. Escalamiento espacial de medios heterogéneos espectrales usando invarianzas temporales. *Terra Latinoamericana* 30: 315-326
- Chehbouni, A., Y. H. Kerr, J. Qi, A. R. Huete, and S. Sorooshian. 1994. Toward the development of a multidirectional vegetation index, *Water Resources Research* 30: 1281-1286
- Clevers, J.G.P.W. 1989. The application of a weighted infrared-red vegetation index for estimating leaf area index by correcting for soil moisture. *Remote Sensing of Environment* 29: 25-37.
- Coullouudon, B., K. Eshelman, J. Gianola, N. Habich, L. Hughes, C. Johnson, M. Pellant, P. Podboruy, A. Rasmussen, B. Robles, P. Shaver, J. Spehrr, and J. Willoughby. 1996. *Sampling Vegetation Attributes. Technical Reference 1734-4.* Bureau of Land Management. National Business Center. Denver, CO 171 p.
- Eagleson, P.S. 1982. Ecological optimality in water-limited natural soil-vegetation systems. 1. Theory and hypothesis. *Water Resources Research* 18: 325-340

- Gao, X., A. R. Huete, W. Ni, and T. Miura. 2000. Optical-biophysical relationships of vegetation spectra without background contamination. *Remote Sensing of Environment* 74: 609-620.
- Gausman, H.W., W.A. Allen, C.I. Wiegand, D.E. Escobar, R.R. Rodriguez, and A.J. Richardson. 1973. The leaf mesophylls of twenty crops, their light spectra, and optical and geometrical parameters. USDA Tech. Bull. 1465. U.S. Govt. Printing Office. Washington, D.C. 59 p.
- Gilabert, M.A., S. Gandia, and J. Melia. 1996. Analyses of spectral-biophysical relationships for a corn canopy. *Remote Sensing of Environment* 55: 11-20.
- Gitelson, A.A., Y.J. Kaufman, R. Stark, and D. Rundquist. 2002. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. *Remote Sensing of Environment* 80: 76-87.
- Gitelson, A., and M.N. Merzlyak. 1994. Spectral reflectance changes associated with autumn senescence of *Aesculus hippocastanum* L. and *Acer platanoides* L. leaves. Spectral features and relation to chlorophyll estimation. *J. Plant Physiology* 143: 286-292
- Goudriaan, J. 1977. Crop micrometeorology: A simulation study. Simulation Monographs. PUDOC. Wageningen, The Netherlands 259 p.
- Goudriaan, J., and J.L. Monteith. 1990. A mathematical function for crop growth based on light interception and leaf area expansion. *Ann. Botany* 66: 695-701
- Huete, A.R. 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment* 25: 295-309.
- Huete, A.R., and R.D. Jackson. 1988. Soil and atmosphere influences on the spectra of partial canopies. *Remote Sensing of Environment* 25: 89-105
- Huete, A. R., G. Hua, J. Qi, and A. Chehbouni. 1992. Normalization of multidirectional red and nir reflectances with SAVI. *Remote of Sensing Environment* 41:143-154.

- Huete, A.R., R.D. Jackson, and D.F. Post. 1985. Spectral response of a plant canopy with different soil backgrounds. *Remote Sensing of Environment* 17: 35-53.
- Huete, A., C. Justice, and H. Liu. 1994. Development of vegetation and soil indices for MODIS-EOS. *Remote Sensing of Environment* 49: 224-234.
- Jacquemoud, S., and F. Baret. 1990. PROSPECT: A model of leaf optical properties spectra. *Remote Sensing of Environment* 34: 75-91.
- Jacquemoud, S., S.L. Ustin, J. Verdebout, G. Schmuck, G. Andreoli, and B. Hosgood. 1996. Estimating leaf biochemistry using the PROSPECT leaf optical properties model. *Remote Sensing of Environment* 56: 194-202.
- Kallel, A., S.L. Hégarat-Masclé, C. Ottlé, and L. Hubert-Moy. 2007. Determination of vegetation cover fraction by inversion of a four-parameter model based on isoline parameterization. *Remote Sensing of Environment* 111: 553-566.
- Kubelka, P., and F. Munk. 1931. Ein beitrag zur optik der farbanstriche. *Ann. Technical Physics* 11: 593-601.
- Medrano, R., F. Paz, y J.L. Oropeza. 2013. Evaluación de un modelo de la BRDF a partir de simulación con modelos semi-empiricos lineales (SEL). *Terra Latinoamericana* 31: 181-192
- Merzlyak, M.N., and A. Gitelson. 1995. Why and what for the leaves are yellow in autumn? On the interpretation of optical spectra of senescing leaves (*Acer platanoides* L.). *Journal Plant Physiology* 143: 315-320.
- Myneni, R. B., and G. Asrar. 1994. Atmospheric effects and spectral vegetation indices. *Remote Sensing of Environment* 47: 390-402.
- Nilson, T. 1971. A theoretical analysis of the frequency of gaps in plants stands. *Agricultural Meteorology* 8: 25-38.

- Odi, M., F. Paz, y M. Bolaños. 2010. Limitaciones en la estimación de variables biofísicas en cultivos usando índices de vegetación espectrales: efecto de la densidad del follaje. *Agrociencia* 44: 807-819
- Pascual, F., F. Paz, y M. Bolaños. 2012. Estimación de biomasa aérea en cultivos con sensores remotos. *Terra Latinoamericana* 30: 17-28
- Paz, F., E. Palacios, E. Mejía, M. Martínez, y L.A. Palacios. 2005a. Análisis de los espacios espectrales de la reflectividad del follaje de los cultivos. *Agrociencia* 39: 293-301.
- Paz, F., E. Palacios, L.A. Palacios, L. Tijerina, y E. Mejía. 2005b. Correcciones atmosféricas usando patrones invariantes en el espacio del rojo e infrarrojo cercano. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales* 1:51-64.
- Paz, F., E. Palacios, E. Mejía, M. Martínez, y L.A. Palacios. 2006. Determinación del estado de crecimiento de cultivos usando la transformada de Hough de las reflectividades del follaje. *Agrociencia* 40: 99-108.
- Paz, F., E. Palacios, M. Bolaños, L.A. Palacios, M. Martínez, E. Mejía y A. Huete. 2007. Diseño de un índice espectral de la vegetación: NDVI_{cp}. *Agrociencia* 41: 539-554.
- Paz, F., M. Bolaños, E. Palacios, L.A. Palacios, M. Martínez, y A. Huete. 2008. Optimización del índice espectral de la vegetación NDVI_{cp}. *Agrociencia* 42: 925-937.
- Paz, F., M. Reyes, y E. Medrano. 2011. Diseño de índices espectrales de la vegetación usando curvas iso-suelo. *Agrociencia* 45: 121-134.
- Paz, F., M. Casiano, A. Zarco, y M. Bolaños. 2013. Estimación de las propiedades ópticas de la vegetación usando medios radiativos equivalentes y espacios n-paramétricos. *Terra Latinoamericana* 31: 119-134.

- Paz, F., E. Romero, E. Palacios, M. Bolaños, R. Valdez, y A. Aldrete. 2014. Alcances y limitaciones de los índices espectrales de la vegetación: marco teórico. *Terra Latinoamericana* 3: 177-194.
- Paz, F., E. Romero, E. Palacios, M. Bolaños, R. Valdez, y A. Aldrete. 2015. Alcances y limitaciones de los índices espectrales de la vegetación: análisis de índices de banda ancha. *Terra Latinoamericana* 33: 27-49.
- Pinty, B., N. Gobron, J.L. Widlowski, T. Lavergne, and M.M. Verstraete. 2004. Synergy between 1-D and 3-D radiation transfer models to retrieve vegetation canopy properties from remote sensing data. *Journal of Geophysical Research* Vol. 109. D21205. doi:10.1029/2004JD005214.
- Price, J.C. 1992. Estimating vegetation amount from visible and near infrared reflectances. *Remote Sensing of Environment* 41: 29-34
- Price, J.C., and W.C. Basuch. 1995. Leaf area index estimation from visible and near-i.
- Purevdorj, T., R. Tateishi, T. Ishiyama, and Y. Honda. 1998. Relationships between percent vegetation cover and vegetation indices. *International Journal Remote Sensing* 19: 3519-3535.
- Qi, J., A. R. Huete, F. Cabot, and A. Chehbouni. 1994. Bidirectional properties and utilization of high-resolution spectra from a semiarid watershed. *Water Resources Research* 30: 1271-1279.
- Reyes, M., F. Paz, M. Casiano, F. Pascual, M.I. Marín, y E. Rubiños. 2011. Caracterización del efecto de estrés usando índices espectrales de la vegetación para la estimación de variables relacionadas con la biomasa aérea. *Agrociencia* 45: 221-233.
- Richardson, A.J., and C.L. Wiegand. 1977. Distinguishing vegetation from soil background information. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 43: 1541-552.

- Romero, E., F. Paz, E. Palacios, M. Bolaños, R. Valdez, y A. Aldrete. 2009. Diseño de un índice espectral de la vegetación desde una perspectiva conjunta de los patrones exponenciales y lineales del crecimiento. *Agrociencia* 43: 291-307.
- Ross, J. 1981. *The radiation regime and architecture of plant stands*. W. Junk, Norwell, MA.
- Rouse, J.W., R.H. Haas, J.A. Schell, D.W. Deering, and J.C. Harlan. 1974. Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation, MASA/GSFC, Type III, Final Report, Greenbelt, MD. pp: 1-371.
- Sinclair, T.R., R.M. Hoffer, and M.M. Schreiber. 1971. Reflectance and internal structure of leaves from several crops during a growing season. *Agronomy Journal* 63: 864-868.
- Specht, R.L. 1972. Water use by perennial evergreen plant communities in Australia and Papua New Guinea. *Australian Journal of Botany* 20: 273-299.
- Specht, R.L., and A. Specht. 1989. Canopy structure in Eucalyptus-dominated communities in Australia along climatic gradients. *Acta Oecologica* 10: 191-213
- Tucker, C.J. 1979. Red and photographics infrared linear combination for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment* 8: 127-150.
- Van Leeuwen, W.J.D., A. R. Huete, C.L. Walthall, S.D. Prince, A. Bégué, and J.L. Roujean. 1997. Deconvolution of remotely sensed spectral mixtures for retrieval of LAI, fPAR and soil brightness. *Journal of Hydrology* 188-189: 697-724
- Verhoef, W. 1984. Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modeling: The SAIL model, *Remote Sensing of Environment* 16: 125-141.
- Verstraete, M.M., B. Pinty, and R.B. Myneni. 1996. Potential and limitations of information extraction on the terrestrial biosphere from satellite remote sensing. *Remote Sensing of Environment* 58: 201-214.

- Villa, A., F. Paz, M.J. Pérez, C. Rojas, M. Rodríguez, S. Ortiz, M. Casiano, y H. Díaz. 2014. Estimación de la capacidad de carga animal en agostaderos usando un índice de vegetación de pendientes normalizadas. *Agrociencia* 48: 599-614.
- Wanjura, D.F., and Bilbao, J.D. 1986. Ground cover and weathering effects on reflectances of three crop residues. *Journal Agronomy* 78: 694-698.
- Yoshioka, H. 2004. Vegetation isoline equations for an atmosphere-canopy-soil system. *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing* 42:166-175.
- Yoshioka, H., T. Miura, A.R. Huete, and B.D. Ganapol. 2000. Analysis of vegetation isolines in RED-NIR reflectance space. *Remote Sensing of Environment* 74: 313-326.
- Xia, L. 1994. A two-axis adjusted vegetation index (TWVI). *International Journal of Remote Sensing* 15: 1447-1458.

CAPITULO 4: MUESTREO DEL SISTEMA DE MONITOREO TERRESTRE ORIENTADO A LA GANADERIA EN MEXICO (Red básica, Red complementaria, Red-helicóptero-radio control).

4.1 GENERALIDADES

En el año 2008 se implementó el Sistema Nacional de Monitoreo Satelital Orientado a la Ganadería (SIMSOG) y posteriormente el Sistema Nacional de Monitoreo Terrestre Orientado a la Ganadería (SIMTOG), se propuso establecer una red de Sitios Permanentes de Muestreo (SPM) distribuidos en los 31 Estados del territorio Nacional y que fueran representativos de los diferentes tipos de vegetación y productividad forrajera del país para la validación, calibración de productos.

Los objetivos de monitoreo terrestre fueron los siguientes:

1. Establecimiento de un sistema nacional de monitoreo terrestre que sea representativo de los diferentes ecosistemas donde se desarrolla la ganadería en México (principalmente en matorrales y pastizales).
2. Calibrar y validar los productos satelitales del monitoreo, en las diferentes escalas espaciales y temporales de representación.
3. Establecer sitios demostrativos de tecnologías de asistencia satelital a nivel de predios o Unidades de Producción Pecuaria (UPP).

La estrategia del SIMTOG se desarrolló para tener información complementaria a diferentes escalas y variables de medición y se estructuró usando tres redes de muestreo: **Red básica, Red complementaria y Red de monitoreo con helicóptero de radio control.**

4.2 Red básica de monitoreo.

La red básica de muestreo, se estableció en las zonas ganaderas del país, sin muestrear en superficies de carácter forestales (Sierra Madre Occidental, Sierra Madre Oriental, Eje

Neovolcánico Transversal y Sierra Madre del Sur, principalmente), agrícolas (Valle del Yaqui-Mayo, Valle de Culiacán, Región Lagunera, Bajo Río Bravo-Bajo Río San Juan, etc.) y urbanas (Valle de México, Guadalajara, Monterrey, etc.).

Para hacer funcional el muestreo, los 504 puntos de la red básica de muestreo se distribuyeron en grupos de trabajo por entidad federativa (Figura 4.1).

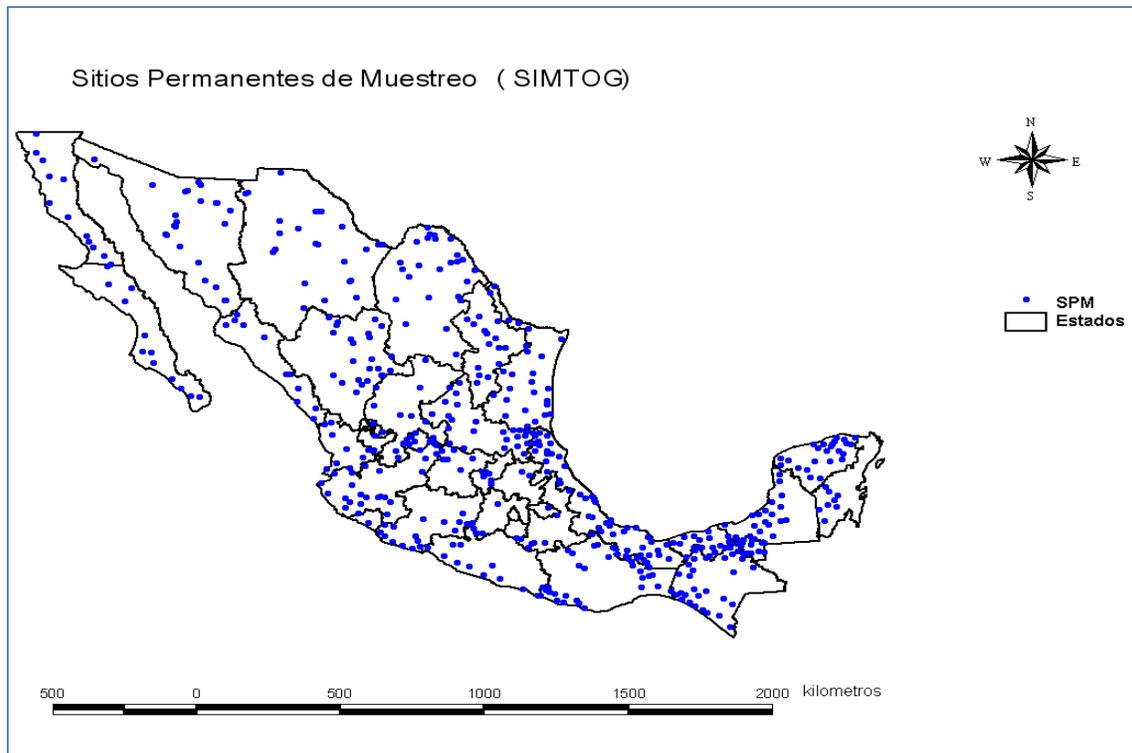


Figura 4.1. Distribución de los sitios permanentes de muestreo en la República Mexicana.

El establecimiento de los Sitios Permanentes de Muestreo se realizó en base al tamaño de cada estado, la representatividad de los ecosistemas y las condiciones particulares de cada zona; la distancia mínima entre SPM fue de 30 km de distancia, sin importar el diseño a utilizar, los cuales se describen a continuación.

4.2.1 Diseño básico: muestreo sistemático

Se entiende por muestreo sistemático al ejecutado de manera ordenada siguiendo un patrón establecido.

Un SPM, es un área cuadrangular de 225 ha (1.5 km x 1.5 km), los cuales en su interior contienen 9 estaciones de muestreo (EM) y una estación de muestreo excluida de la ganadería (EMEG). Cada estación de EM es de 1 ha (100 m x 100 m), los centros entre estaciones de muestreo se ubicaron a cada 300 m, las EM se numeran de Norte a Sur y de Este a Oeste, dentro de los SPM, tal como se observa en la Figura 4.2.

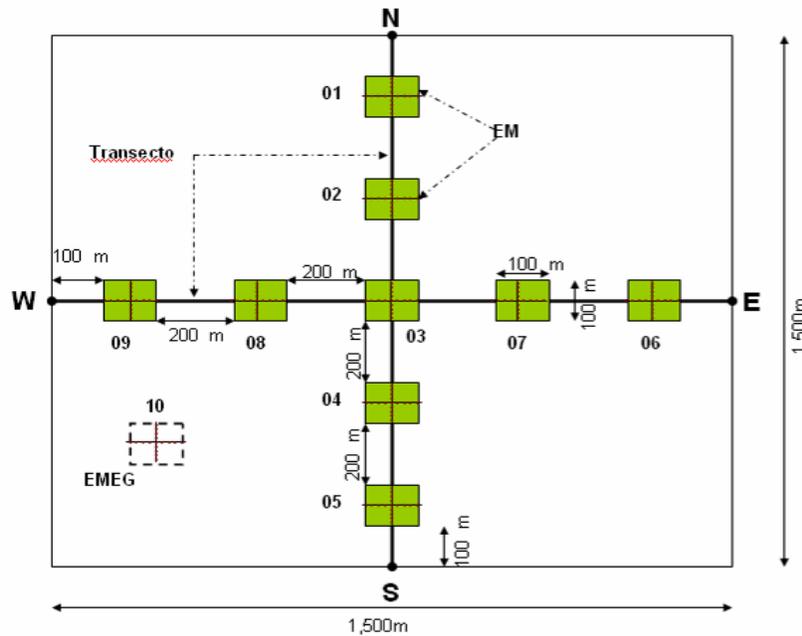


Figura 4.2. Representación esquemática de un SPM, del SIMTOG.

Las estaciones de muestreo son subsitios de 1 ha (100 m x 100 m), que en su interior se distribuyen 17 puntos generales de muestreo (PGM), separados a 12.5 m entre sí; y en cada cuadrante se establece un punto denominado punto de muestreo de biomasa (PMB) (Figura 4.3).

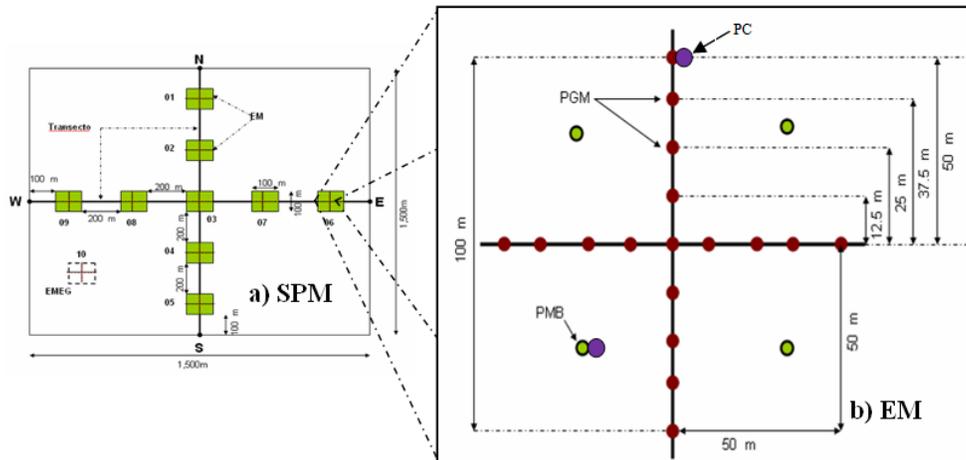


Figura 4.3. Distribución de las estaciones de muestreo en un sistema permanente de muestreo.

4.2.2 Diseño alternativo: muestreo no sistemático

Cuando los criterios de representatividad y homogeneidad de la vegetación, además de la accesibilidad, no se cumplían, el establecimiento de las EM se hizo en función de las diferencias en estructura y composición de la vegetación, de tal forma que representaran la vegetación en el SPM; de esta manera las nueve estaciones de muestreo, además de la EMEG, quedaron distribuidas en el SPM manteniendo sus dimensiones.

Se tuvo en cuenta que la distancia entre estaciones no debió de ser menor a 300 m (entre los puntos centrales), por lo que se distribuyeron dentro del límite del SPM de 1500 m X 1500 m (Figura 4.4).

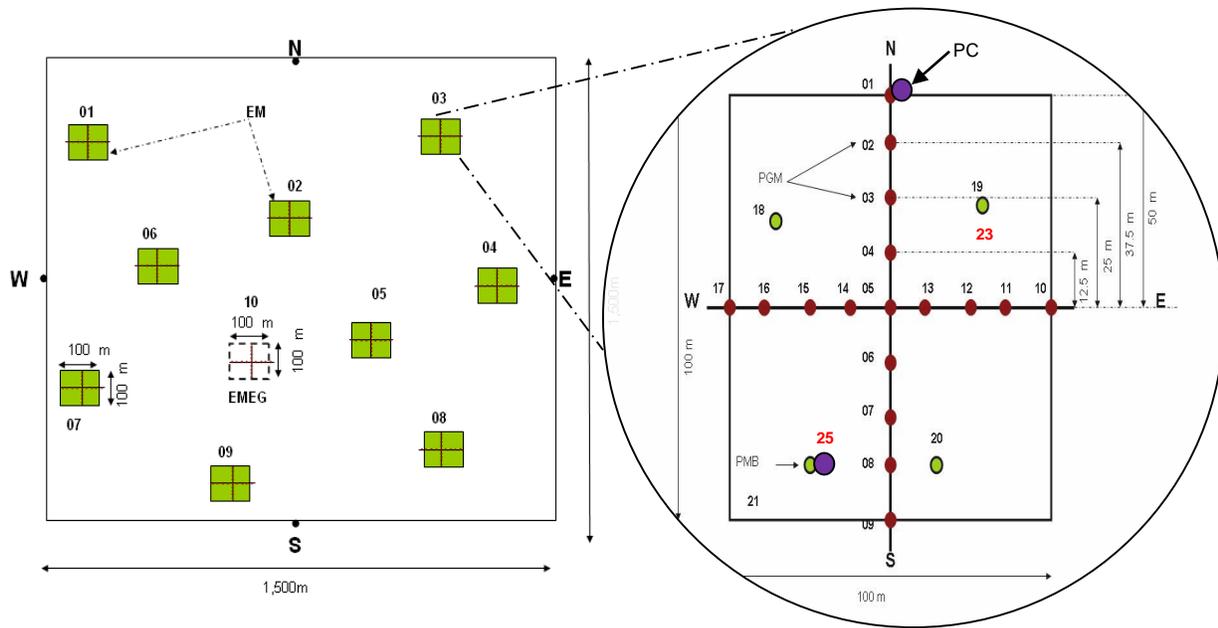


Figura 4.4. Estaciones de muestreo en un SPM con diseño alternativo.

Las variables de campo en muestreo se enfocó al levantamiento de datos radiométricos, fotográficos y biomasa del estrato herbáceo y arbustivo.

En cada PGM se realizaron mediciones de reflectancias (mismas bandas espectrales que el sensor TM5 del satélite Landsat) usando un radiómetro multi-espectral modelo MSR16R de CropscanMR y mediciones de la cobertura vegetal usando una cámara digital modelo Cyber-shot DSC-V1 de SonyMR con resolución de 5.0 megapíxeles, un dataloger Datalogger MEX-V1.0 y demás material necesario, el cual se muestra en la siguientes Figuras 4.5 y 4.6.

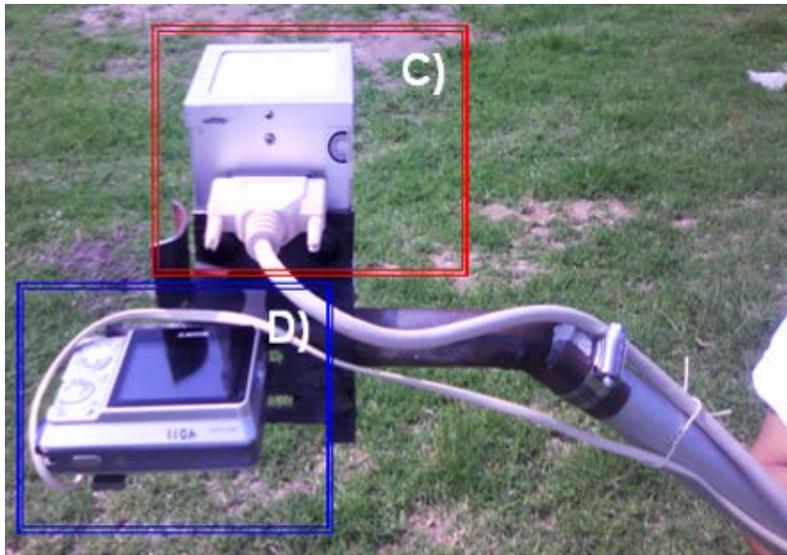


Figura 4.5. Radiómetro multi-espectral y cámara digital para toma de datos en muestreos en campo



Figura 4.6. Equipo de muestreo: a) Lap Top/PC, b) Cable convertidor de serial a USB(Manhatan), c) Cable serial machihembra, d) Baterías, e) Datalogger MEX-V1.0, f) Cable Serial Puerto Paralelo, g) Radiómetro CropScan ® .

En los PMB, adicionalmente a las mediciones radiométricas y de cobertura vegetal, se colectó y pesó en fresco el total del estrato herbáceo en una área de un círculo de 1.6 m de diámetro (misma área de visión que el radiómetro). Además se realiza el peso en fresco de las especies forrajeras y no forrajeras en este estrato. Los pesos frescos se convirtieron a pesos secos al llevar las muestras de biomasa a peso constante en el secado en horno. La biomasa de cada SPM es el promedio de 18 (2 PMB por EM) o 36 (4 PMB por EM) muestras individuales (Figura 4.7).



Figura 4.7. Proceso de medición de reflectancia, colecta y pesado de forraje en los puntos de muestreo de biomasa.

4.2.3 Imágenes panorámicas.

En cada visita se tomaron cuatro fotografías panorámicas, orientadas a cada uno de los puntos cardinales, tomada desde el punto central de cada una de las EM, con el fin de registrar la evolución del ciclo de crecimiento de la vegetación. La secuencia de las fotografías fueron Norte, Este, Sur y oeste (Figura 4.8).

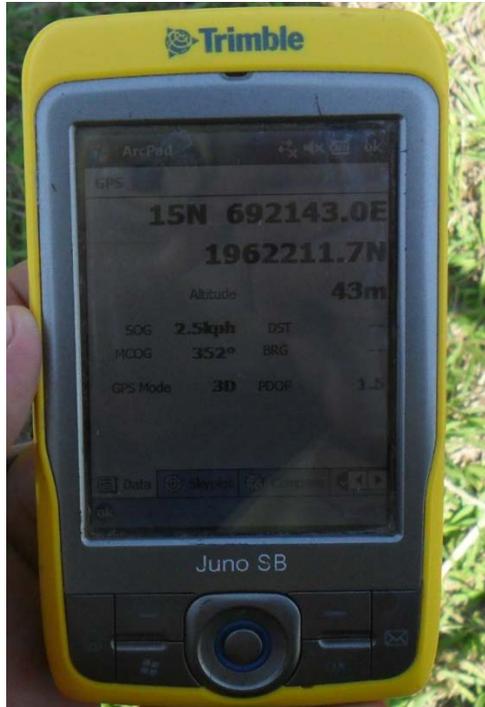


Figura 4.9. Registro de coordenadas de los puntos centrales y extremas de cada estación de muestreo

4.3 Red complementaria de monitoreo.

La Red Complementaria consistió en puntos de muestreos (PM) de rápida ejecución y están orientados a obtener datos para escalar (interpolarse) la información terrestre a una mayor cobertura espacial. Dicha red se integra por 5,000 sitios en todo el país, para ello se llevaron a cabo dos campañas de muestreo que corresponden a los años 2010 y 2011.

La obtención de los datos de los puntos de muestreo correspondientes a la Red Complementaria se inició con la planeación y el trazo de las rutas a través del sistema de red de carreteras en los diferentes Estados de la República (Figura 4.10).

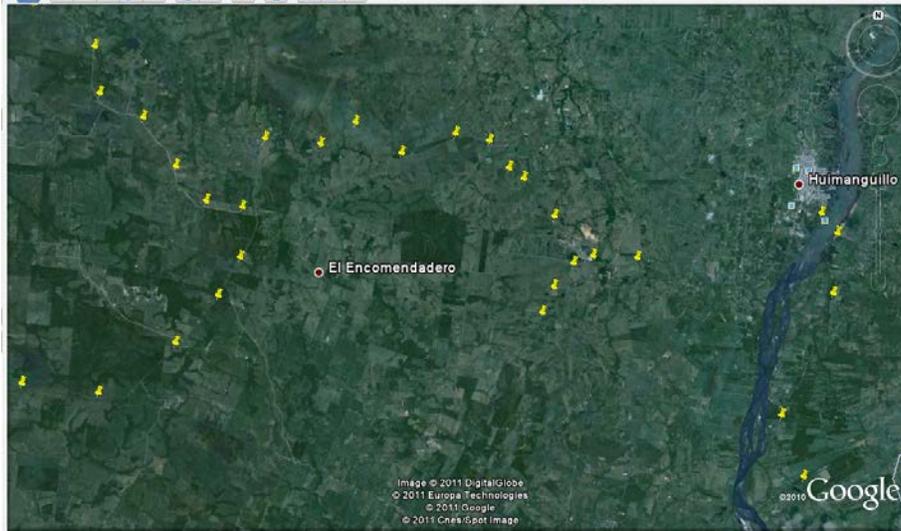


Figura 4.10. Visualización de rutas por medio de Google Earth®.

El levantamiento de datos en campo del muestreo inmediato del estrato herbáceo bajo el esquema diseñado para la red complementaria, consistió en la toma de datos de coordenadas, radiométricos (tres registros por punto), fotográficos (una fotografía panorámica y una fotografía a nadir por punto) y de biomasa. Por lo que el equipo que se usó para la obtención de datos, fue el mismo que se ocupó para el levantamiento de datos de red básica.

La red complementaria se diseñó para tener una gran cobertura espacial de puntos de medición, por lo que éstos se establecieron durante los trayectos a los sitios permanentes de muestreo (SPM) de la Red Básica (fuera de las unidades de producción pecuaria, donde se establecieron los SPM). En sitios de fácil acceso, es decir, muy próximos a las carreteras o caminos por donde se viaja, pero que fueran representativos del tipo de vegetación predominante en la zona; se tuvo el cuidado en realizar las mediciones en un área que no tuviera perturbaciones debidas a la cercanía con la carretera o camino Figura 4.11.



Figura 4.11. Sitio representativo para la toma de datos de red complementaria.

En la ruta de levantamiento de datos, el 10% correspondió a puntos de muestreo de biomasa (PMB); es decir, por cada 9 puntos generales de muestreo (PMG) y hubo 1 PMB (Figura 4.12).

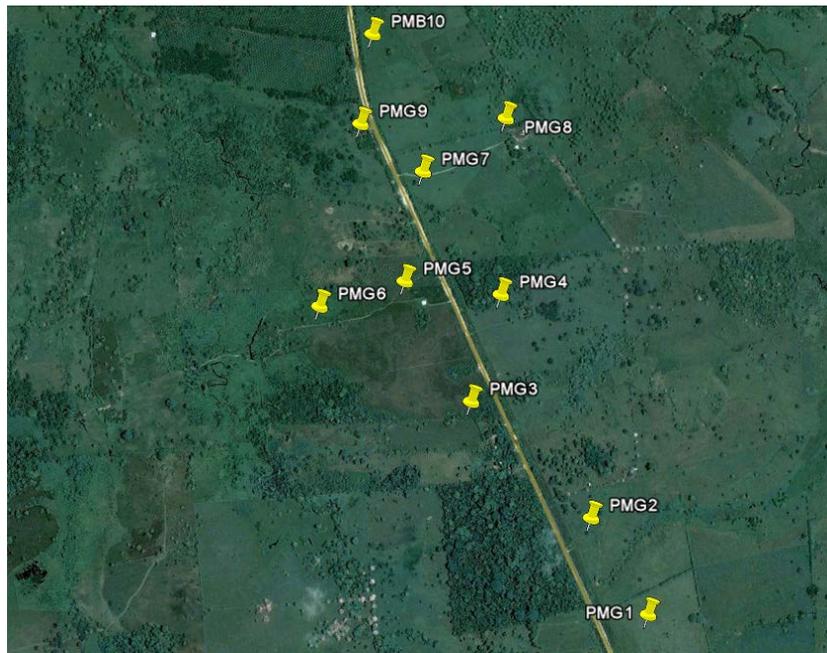


Figura 4.12. Planeación de ruta para tomar puntos de la red complementaria.

La distancia mínima entre punto y punto de muestreo en las rutas fue de 500 metros, tomando en cuenta que fueran diferentes condiciones de vegetación. Además, que los puntos totales para cada estado estuvieran distribuidos en todo el estado para que fuera representativo del mismo.

De acuerdo a la actividad ganadera de cada Estado, se muestreo un determinado número de puntos de la Red Complementaria, misma que se llevó a cabo en 30 estados (Cuadro 4.1).

Cuadro 4.1 Puntos de muestreo en cada Estado.

ESTADO	No. DE PUNTOS	PUNTOS EFECTIVOS TOTALES	PMB
AGUASCALIENTES	-	-	-
BAJA CALIFORNIA	77	77	8
BAJA CALIFORNIA SUR	120	114	11
CAMPECHE	371	371	25
CHIAPAS	438	437	37
CHIHUAHUA	247	247	12
COAHUILA	267	267	26
COLIMA	44	44	8
DURANGO	282	282	24
GUANAJUATO	6	6	-
GUERRERO	31	31	-
HIDALGO	65	65	5
JALISCO	181	181	18
EDO. DE MEXICO	3	3	-
MICHOACAN	203	203	19

MORELOS	-	-	-
NAYARIT	95	95	9
NUEVO LEON	187	187	5
OAXACA	252	252	18
PUEBLA	47	47	3
QUERETARO	72	68	7
QUINTANA ROO	93	92	9
SAN LUIS POTOSI	117	103	8
SINALOA	22	22	2
SONORA	240	240	23
TABASCO	307	307	22
TAMAULIPAS	245	245	24
TLAXCALA	18	18	1
VERACRUZ	803	803	68
YUCATAN	346	346	22
ZACATECAS	9	9	1
TOTAL	5,188	5,162	415

Finalmente se muestra como ejemplo en la siguiente Figura 4.13 la distribución total de los puntos que se muestrearon a nivel Nacional para la campaña 2010.



Figura 4.13. Puntos muestreados para red complementaria.

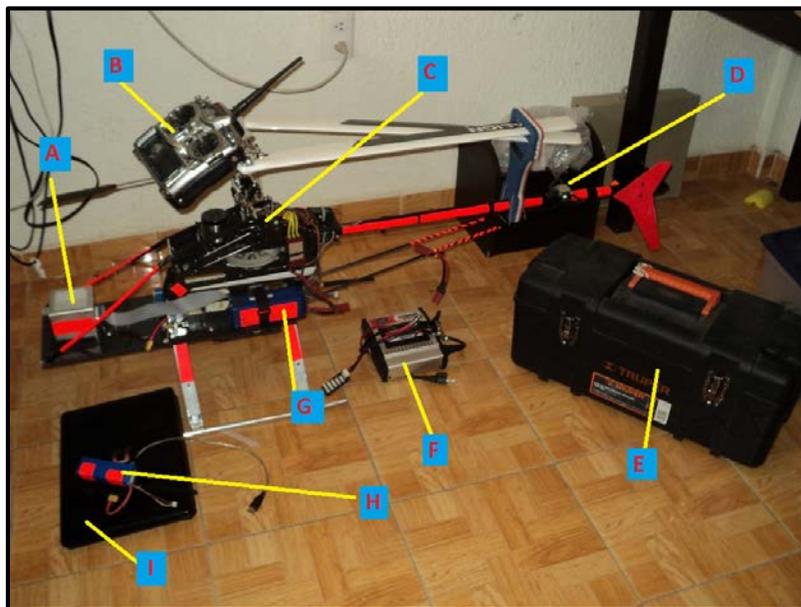
4.4 Red de monitoreo por helicóptero de radio control

La toma de información radiométrica y de cobertura vegetal, utilizando como plataforma de medición un Helicóptero de Radio Control (HRC). Se llevó a cabo en la superficie de los sitios Permanentes de Muestreo (SPM) de la Red Básica de monitoreo que fueron establecidos durante la campaña de medición de campo a nivel de superficie. Para ello, se implementó una campaña de medición que utilizó un HRC de tal forma que fue posible medir en los SPM a una altura aproximada de 40 m con respecto al nivel del suelo y obtener información de todos los estratos vegetales: herbáceo, arbustivo y arbóreo (Figura 4.14).



Figura 4.14. Fotografía aérea tomada con Helicóptero Radio Control.

Para el levantamiento de datos en campo se requirieron de una cantidad diversa de materiales. En la Figura 4.15 se muestran los materiales que se utilizaron en el monitoreo por helicóptero de radio control.



A) Radiómetro, B) Radio Control, C) Helicóptero, D) GPS, E) Caja de Herramientas, F) Cargador de baterías Li-Po, G) Batería Li-Po, H) Antena de Transmisión de Datos, I) Laptop

Figura 4.15. Equipo de muestreo en la toma de datos con helicóptero.

4.4.1 Mediciones en campo

Los vuelos con el HRC se realizaron en cada una de las Estaciones de Muestreo, siguiendo las líneas trazadas previamente, una con dirección Norte a Sur y otra con dirección Este a Oeste, tal como se muestra en la Figura 4.16.

Dentro de un SPM se tienen establecidas 9 Estaciones de Muestreo (EM), por lo que para cada una de las mismas se llevaron a cabo los vuelos correspondientes, siendo en consecuencia 9 vuelos en un SPM (18 líneas de vuelo), Figura 4.16.

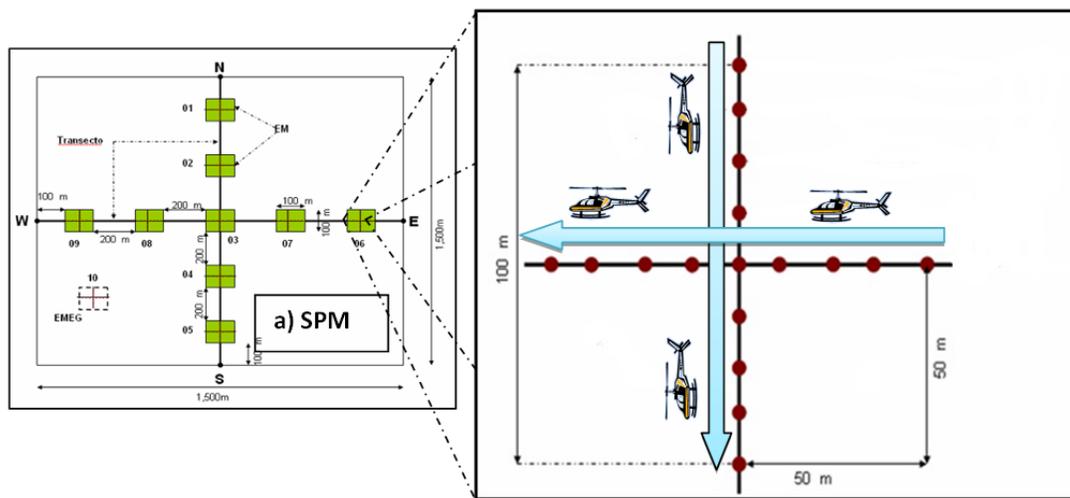


Figura 4.16. Dirección y vuelos correspondientes para casa estación de muestreo

Las características de la información adquirida con el HRC fueron las siguientes:

- Las mediciones con el helicóptero se realizaron a una altura promedio de 40 m.
- Por cada EM se tomaron 9 puntos de medición, a una distancia de 20 m en promedio, con dirección Norte a Sur, posteriormente de Este a Oeste.
- Se utilizaron conos de plástico naranja en el centro y extremos de la estación para su fácil ubicación visual, lo que permitió orientar la dirección del vuelo, ayudando al piloto a tener una referencia de donde inicia y termina la estación de muestreo y, por lo tanto, inicia y finaliza la línea de vuelo.
- El equipo de medición que se usó para este monitoreo fue un radiómetro de 16 bandas espectrales, dos cámaras fotográficas digitales (midieron la misma escena,

pero con ángulos de visión diferentes) y un receptor de GPS, que conectó a un datalogger montado en el mismo HRC. El datalogger transmite la información vía ondas de radio a un receptor en tierra, que se conecta a una computadora portátil (laptop) y mediante el programa RadControl_H se llevó a cabo la comunicación y manejo del equipo, incluyendo la configuración, lectura de estatus y disparo del mismo.

Al momento de hacer el disparo para la adquisición de los datos, se obtuvieron tres lecturas de radiometría, dos fotografías digitales y las coordenadas de la ubicación del equipo (x, y, z y altura sobre la superficie del suelo medida con un barómetro digital incorporado al GPS).

CAPITULO 5: ESTIMACIÓN DE LA CAPACIDAD DE CARGA ANIMAL EN AGOSTADEROS POR MEDIO DE UN INDICE DE VEGETACIÓN DE PENDIENTES NORMALIZADAS

5.1 INTRODUCCIÓN

La estimación de la capacidad de carga animal en un tipo de vegetación dado es un elemento necesario para el manejo ganadero sustentable (Holencheck *et al.*, 1989). En México la única referencia de este tipo de estimaciones a escala Nacional es la desarrollada por la Comisión Técnica Consultiva para la determinación de Coeficientes de Agostadero (COTECOCA, 1967), cuyos estudios en su gran mayoría datan de la época de los 60 y 70. En esta perspectiva, la falta de información sobre este parámetro crítico de manejo ganadero limita los esfuerzos que se asocian al establecimiento de programas de apoyo ganadero del gobierno base en los resultados (ajuste de capacidad de carga animal), tal como está planteado en el PROGAN (SAGARPA, 2007 y 2008). Independientemente del uso de metodologías más actuales a las utilizadas por la COTECOCA (1967) en relación a la dinámica sucesional de la vegetación (NRCS, 1997), los tiempos y costos asociados a la caracterización de la biomasa forrajera en los ecosistemas de México impone serias restricciones para su viabilidad operacional, particularmente si se considera la capacidad de carga como algo dinámico que varía en función del clima, suelo, geoforma, etc. (Holencheck *et al.*, 1989). Una posibilidad interesante, particularmente cuando está asociada a información satelital, es el uso de modelos biofísicos simples del crecimiento de la vegetación, que puedan ser parametrizados con datos climáticos existentes normalmente (Diaz-Solis *et al.*, 2003).

La tecnología de los sensores remotos se puede utilizar para el desarrollo de relaciones de datos espectrales con la biomasa aérea a escalas espaciales y temporales útiles para el manejo de los hatos ganaderos. El estado de la vegetación se puede caracterizar por el contraste alto entre la banda espectral del rojo (R) y el infrarrojo cercano (IRC), que la distingue de otros objetos terrestres (Tucker, 1979). Estas dos bandas están disponibles en la mayoría de los satélites públicos y comerciales, por lo que han servido de base en

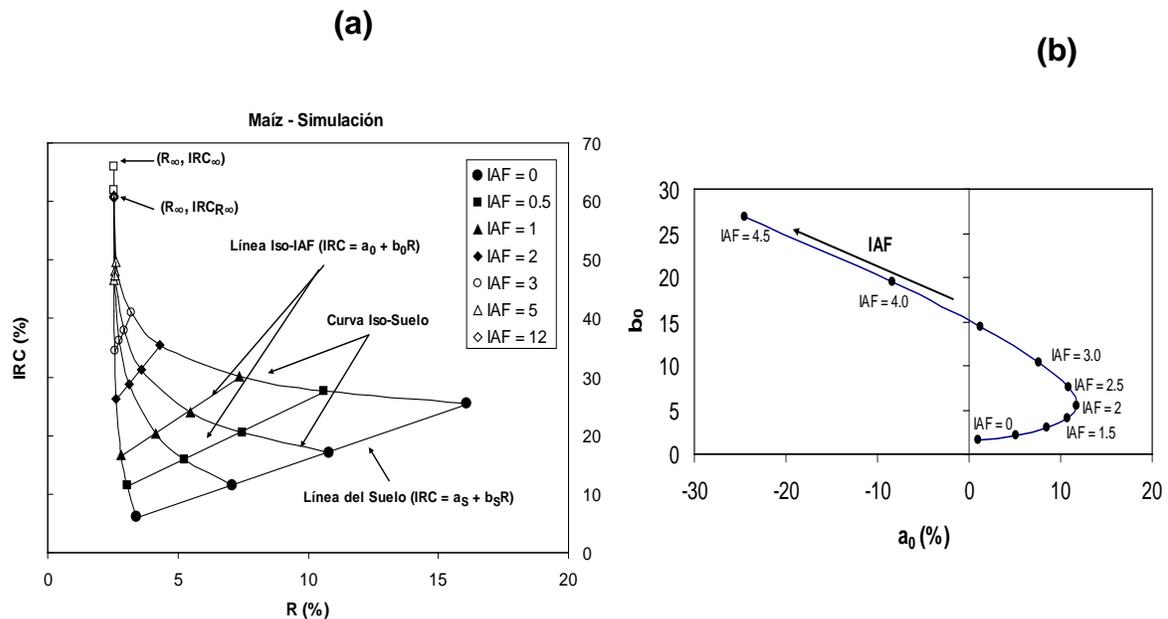
el desarrollo de índices espectrales de la vegetación o IV. Así, se han desarrollado un gran número de IV (Verstraete y Pinty, 1996; Gilabert *et al.*, 2001; Paz *et al.*, 2007) para su uso en la generación de relaciones con variables biofísicas (biomasa aérea o Bm, índice de área foliar o IAF y cobertura aérea o fv, principalmente). Entre estos, el NDVI (Rouse *et al.*, 1974) o índice de vegetación de diferencias normalizadas, $= (IRC - R)/(IRC + R)$, es uno de los más utilizados; aunque su aplicación operacional en términos de percepción de los productores ha sido cuestionada (Rowley *et al.*, 2007). Paz *et al.* (2007) han revisado la estructura matemática de los IV, incluido el NDVI y han propuesto el NDVI_{lcp} para realizar estimaciones del IAF y la Bm, dado que este índice tiene una relación lineal con estos parámetros y tiene las bases teóricas y experimentales que soportan su diseño. Este tipo de IV está con base en curvas iso-IAF, en el espacio espectral del R-IRC, por lo que puede resultar útil en los muestreos de una o dos ocasiones en un determinado tipo de vegetación. Aunque el NDVI_{lcp} fue propuesto para hacer que el NDVI normal tuviera bases teóricas y experimentales, tiene sus limitaciones. Así, el objetivo en este trabajo es revisar las hipótesis del NDVI_{lcp} como punto de partida para el desarrollo de un nuevo índice (IVPN o índice de vegetación de pendientes normalizadas), que mantiene los mismos requerimientos de patrones lineales con el IAF y la Bm de la vegetación, por lo que esta hipótesis se analizó usando datos de experimentos internacionales y en forma extensiva en pastizales y matorrales del estado de Coahuila, México.

5.2 MARCO CONCEPTUAL

5.2.1 Índices espectrales de la vegetación

Con la intención de introducir las bases del diseño de IV, es importante entender la dinámica del crecimiento de la vegetación que se asocia al espacio espectral del R-IRC (reflectancias). En la Figura 5.1a se muestran simulaciones radiativas (mismos patrones que los experimentos) de un cultivo, donde el crecimiento de la vegetación está definido por las líneas iso-IAF (misma cantidad de vegetación). El cultivo simulado está sobre cuatro suelos con propiedades ópticas diferentes (cambios en la humedad, rugosidad, textura, materia orgánica u óxido de hierro). Paz *et al.* (2005) detallan estas simulaciones.

Las líneas iso-IAF ($IRC = a_0 + b_0R$; a_0 y b_0 dependen del IAF), Figura 5.1a, van desde la línea del suelo ($IRC = a_s + b_sR$; a_s y b_s son constantes) con $IAF = 0$ hasta el punto de saturación (las reflectancias que no cambian de valor) de las bandas (R_∞, IRC_∞), donde el medio es ópticamente denso o de reflectancias en el infinito (Ross, 1981). Para un suelo fijo (propiedades ópticas), el crecimiento (IAF) sigue líneas iso-suelo (Figura 5.1a). En relación al patrón entre los parámetros a_0 y b_0 de las líneas iso-IAF hay una primera fase tipo exponencial y después un cambio a una lineal (con cambio de pendiente), con una transición entre ellas (Figura 5.1b).



Patrones espectrales que se asocian al espacio del R-IRC y b) patrones que se asocian al espacio a_0 - b_0 de las líneas iso-IAF

Figura 5.1. Simulaciones radiativas del crecimiento (IAF) de un cultivo.

Para realizar las estimaciones del IAF o la Bm, es necesario saber a qué línea iso-IAF el punto (R, IRC) pertenece, problema que implica conocer la reflectancia del suelo. Dado que la cantidad de vegetación en un pixel es independiente de las propiedades ópticas del suelo o de sus cambios, el diseño de los índices de vegetación es con base en la

minimización del efecto del suelo (Huete, 1988). Para hacer esto es necesario conocer o, aproximar, la relación entre a_0 y b_0 , Figura 5.1b. En esta perspectiva, Paz *et al.* (2007) desarrollaron el índice NDVI_{cp}:

$$NDVI_{cp} = \frac{(IRC - a_0) - R}{(IRC - a_0) + R} = \frac{b_0 - 1}{b_0 + 1} \quad (5.1)$$

donde b_0 (pendiente de las curvas iso-IAF) se aproxima de la relación:

$$\frac{1}{b_0} = c + da_0 \quad (5.2)$$

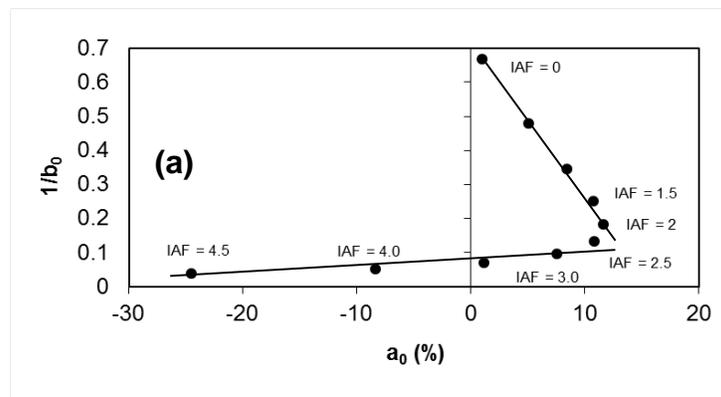
con c y d como constantes empíricas más o menos generales ($c = 1.0$ y $d = -0.024$). La relación para las simulaciones radiativas y experimentos de algodón de Huete *et al.* (1985) y de maíz de Bausch (1993), discutidos por Paz *et al.* (2007), se muestra en la Figura 5.2. En términos operacionales, el valor de b_0 se estima de (Paz *et al.*, 2007):

$$b_0 = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (5.3)$$

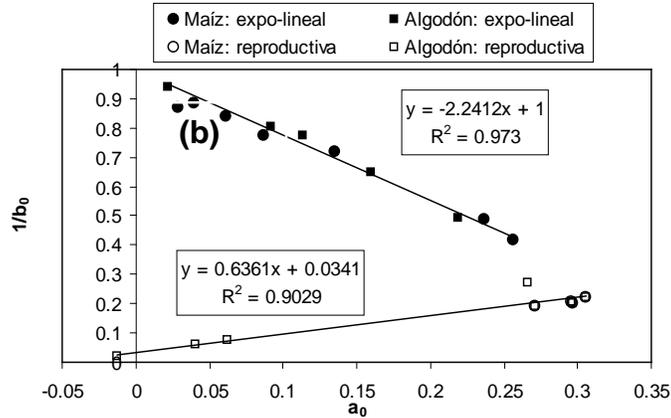
$$A = R$$

$$B = -\left(\frac{c}{d} + IRC\right)$$

$$C = \frac{1}{d}$$



a) Simulaciones radiativas de la Figura 5.1b



Datos de los experimentos de maíz y algodón

Figura 5.2. Patrones entre a_0 y $1/b_0$ de las líneas iso-IAF.

Para su uso en pastizales y matorrales, el NDV_{cp} cumple razonablemente su función y genera estimaciones confiables hasta alrededor de un IAF de 3.0 (Paz *et al.*, 2007). El NDV_{lcp} tiene una relación lineal con el IAF (Paz *et al.*, 2007), por lo que suponiendo una relación lineal entre el IAF y la biomasa aérea o B_m (Goudriaan y van Laar, 1994) se pueden hacer estimaciones confiables de esta última variable. Cuando la vegetación pasa cierto nivel de estrés, la relación entre el IAF y la B_m se desacopla (las plantas incrementan sus reservas de fotosintatos en la parte subterránea), relajando la relación entre biomasa aérea y producción foliar (Stockle *et al.*, 2003). La mayoría de los IV publicados en la literatura usan una relación lineal entre a_0 y b_0 para la fase exponencial y la transición exponencial a lineal, (Figura 5.1b). El NDV_{lcp} se diseñó para caracterizar el patrón no lineal de esta región. Ninguno de los IV publicados aproxima en forma completa el patrón exponencial-transición-lineal (a excepción del IV_CIMAS de Romero *et al.*, 2009) y sólo las dos primeras fases.

La curva de crecimiento de la biomasa aérea viva (verde) en matorrales y pastizales (crecimiento unimodal) antes del crecimiento anual se asocia al periodo de lluvias presentó un meseta (Figura 5.3, región A). Después de un crecimiento caracterizado por un patrón expo-lineal en la etapa vegetativa hasta llegar a una meseta de igual B_m verde o IAF (región B), para posteriormente entrar en la etapa de senescencia caracterizada por un patrón exponencial que termina en una meseta asociada a la latencia (región C).

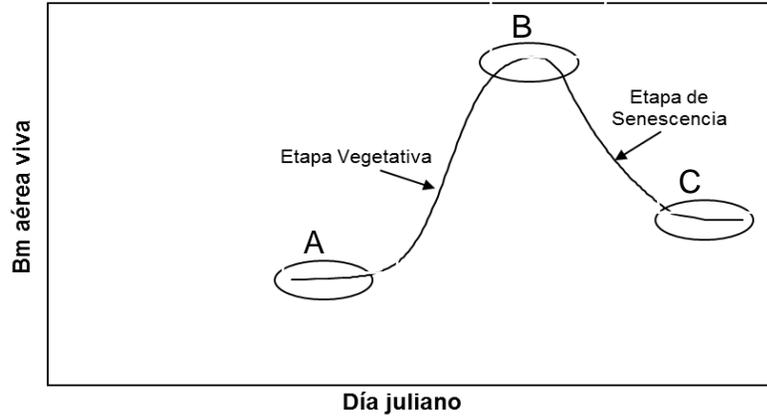


Figura 5.3. Patrón del crecimiento de la biomasa aérea viva en matorrales y pastizales con crecimiento unimodal.

El NDVI_{cp}, relación (5.1), es un IV con base solo en las pendientes de las líneas iso-IAF que supone implícitamente (hipótesis asociada al NDVI original) una línea del suelo con $a_s=0$ y $b_s = 1$ (NDVI_{cp} = 0). Para líneas del suelo (IAF = 0) con $b_s < 1$, el NDVI_{cp} es negativo. Aparte de este problema de suponer la pendiente y a_s de la relación (5.2), de la línea del suelo, la relación entre el NDVI_{cp} y el IAF es del tipo empírico.

Las relaciones entre el IAF y los parámetros de las líneas iso-IAF para las simulaciones radiativas de la Figura 5.1 se muestran en la Figura 5.4. En términos analíticos, aproximaciones de interacciones de primer orden (los fotones que entran al medio suelo-vegetación solo chocan una vez con él) y medios turbios (radiativamente homogéneos e infinitesimales), se puede establecer (Huete, 1987; Yoshiaka *et al.*, 2000) que:

$$a_0 = IRCv + a_s T_{IRC}^2 - Rvb_0 \tag{5.4}$$

$$b_0 = b_s \left(\frac{T_{IRC}^2}{T_R^2} \right)$$

Dónde: v se refiere a un medio compuesto solo por vegetación (follaje), donde el suelo es negro (absorbe todos los fotones que chocan con él) y T es la transmitancia. Las relaciones de las ecuaciones (5.4) (Figura 5.4) son aplicables al caso de medios

radiativos tridimensionales (Gao *et al.*, 2000), pero los parámetros deben interpretarse en términos de medios radiativos equivalentes.

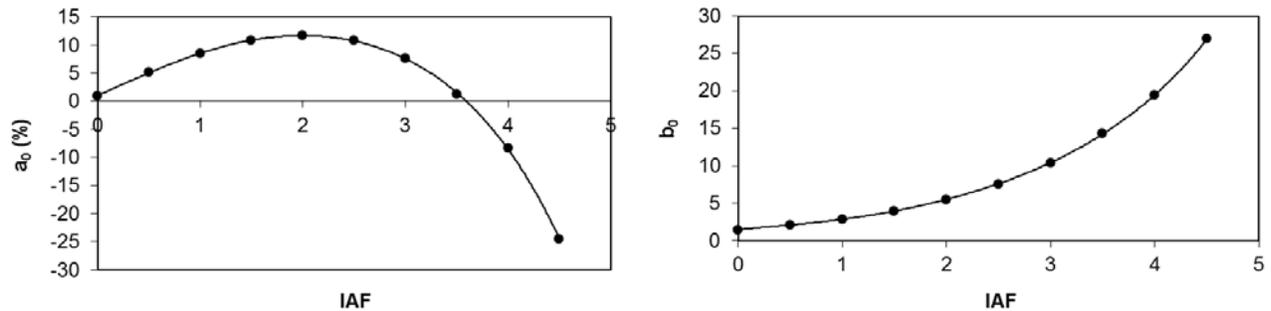


Figura 5.4. Relación entre el IAF y los parámetros a₀ y b₀ de las líneas iso-IAF.

Un patrón más complejo de a₀ con relación al IAF (Figura 5.4 y de las relaciones (5.4)) se pueden analizar con la ley de Beer-Lambert, $T = \exp(-KIAF)$, donde K es un coeficiente de extinción, para establecer la relación entre b₀ y IAF:

$$\frac{b_0}{b_s} = \left(\frac{T_{IRC}^2}{T_R^2} \right) = \frac{\exp(-2K_{IRC}IAF)}{\exp(-2K_RIAF)} = \exp[2(K_R - K_{IRC})IAF] \quad (5.5)$$

De evidencia experimental restringida (Rodskey, 1972; Huete, 1987) se puede usar $K_{IRC} = 0.5 K_R$, por lo que la relación (5.5) queda como:

$$\frac{b_0}{b_s} \approx \exp[K_R IAF] \quad (5.6)$$

$$\frac{b_0}{b_s} \geq 1$$

La ventaja de la relación (5.6) es que ésta se puede calibrar fácilmente en campo para estimar el valor de K_R con un ceptómetro o cámara de “ojo de pescado” (Breda, 2003; Weiss *et al.*, 2004)) y b_s estimada con un radiómetro espectral. Así, de la relación (5.6) se puede proponer un índice de vegetación de pendientes normalizadas (IVPN) como:

$$IVPN = \ln\left(\frac{b_0}{b_s}\right)$$

$$IAF = \left(\frac{1}{K_R}\right)IVPN$$
(5.7)

que bajo la hipótesis de $Bm = pIAF$, donde p es una constante empírica, entonces se obtiene:

$$Bm = \left(\frac{p}{K_R}\right)IVPN$$
(5.8)

Es importante enfatizar que IAF y Bm se refieren solo a la componente viva (verde) de la vegetación y no a la mezcla de material muerto y vivo o solo muerto.

Los ángulos de visión e iluminación (geometría sol-sensor) en las mediciones de reflectancias modifican los valores de las pendientes de las líneas iso-IAF, por lo que es necesario estandarizarlos a una geometría fija, para así comparar patrones temporales en un tipo de vegetación. El modelo desarrollado por Bolaños y Paz (2010) se usa para este fin y está definido como:

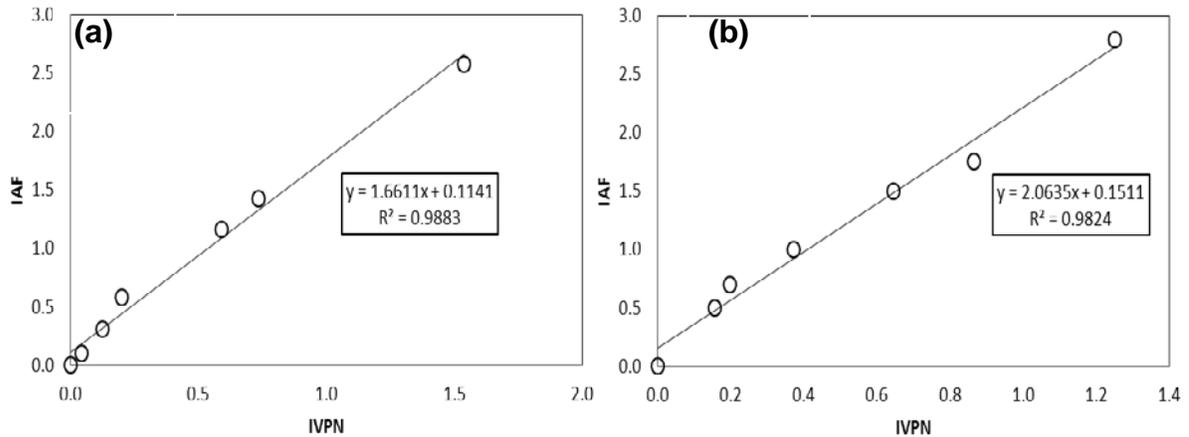
$$\chi = (90 - \theta_v) + \theta_s$$

$$\chi = 90 + gRn$$
(5.9)

donde θ es un ángulo cenital (sin signo), v se refiere a visión y s a solar; Rn representa una reflectancia, R o IRC, normalizada [multiplicada por $\cos(\chi)$] y χ es una variable angular de posición que reduce la complejidad de la geometría sol-sensor al usar simetrías angulares. La ventaja del modelo de la relación (5.9) es que solo requiere un dato, por lo que la constante g se puede ser estimar de la reflectancia medida.

5.2.2 Validación del IVPN

La Figura 5.5 muestra la relación entre el IVPN y el IAF para los experimentos de maíz y algodón, donde el ajuste experimental soporta la aproximación utilizada.

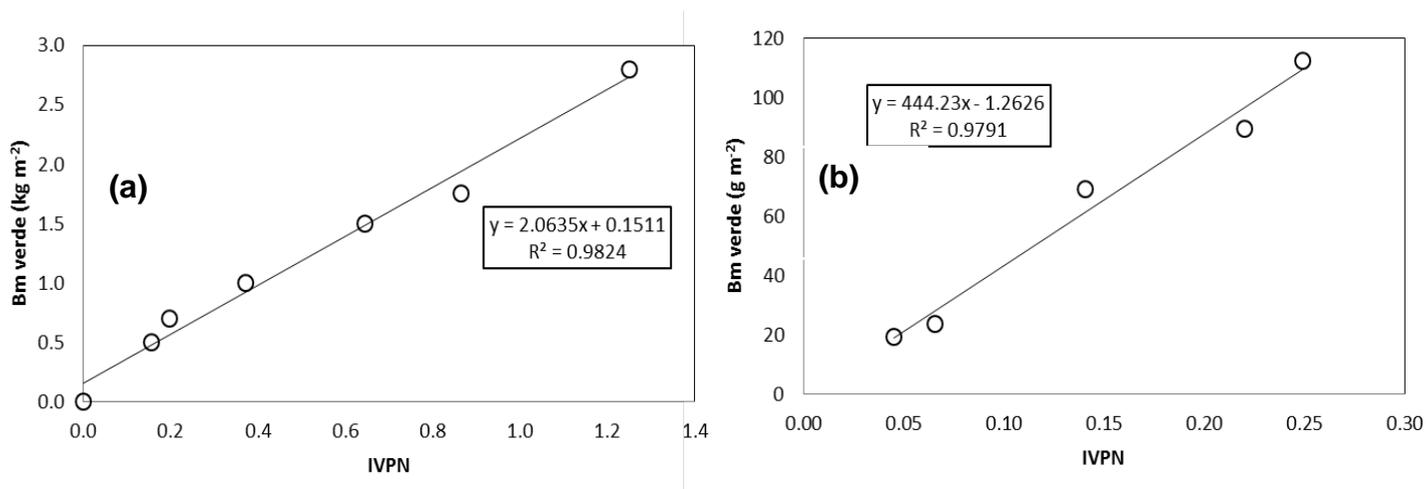


a) Cultivo de maíz

b) Cultivo de algodón

Figura 5.5. Relación entre el IVPN y el IAF en los cultivos de maíz y algodón.

La relación experimental entre el IVPN y la Bm verde para el experimento de algodón (Figura 5.6a) soporta la relación (5.8), etapa vegetativa-reproductiva. Otro experimento es el analizado por Bolaños y Paz (2010). Los datos de este experimento se recolectaron durante el verano de 1990 como parte del experimento Monzón 90 en la cuenca experimental Walnut Gulch en el sureste de Arizona, Estados Unidos. El sitio de muestreo consistió de pastizales (*Bouteloua spp.*) sobre pendientes variantes menores del 5%. El follaje del pastizal fue homogéneo con una cobertura máxima del 40% y consistió de cantidades variantes de material verde, senescente y muerto dependiendo del estado de crecimiento (Huete *et al.*, 1992; Chehbouni *et al.*, 1994; Qi *et al.*, 1994). El ajuste experimental en este pasto (Figura 5.6b), donde se observa que la relación (5.8) es adecuada para el caso de la curva completa del crecimiento (etapa vegetativa y de senescencia).



a) Cultivo de algodón

b) Pastizal natural.

Figura 5.6. Relación entre el IVPN y la Bm verde en los

5.2.3 Estimación de la capacidad de carga animal

La capacidad de carga animal (CC), en unidad animal o UA, está relacionada con la biomasa aérea fresca total (Bm) por:

$$CC = \frac{\text{Oferta de Alimento}}{\text{Demanda de Alimento}}$$

$$CC = \frac{(Bm)(FH)(FA)(FAG)(FAA)}{4,927.5} \quad (5.10)$$

$$CC = qBm = \left(\frac{pq}{K_R} \right) IVPN$$

$$q = \frac{(FH)(FA)(FAG)(FAA)}{4,927.5}$$

donde FH es un factor de conversión de biomasa fresca a húmeda, FA es el factor de aprovechamiento de la biomasa (generalmente 0.5), FAG es el factor de biomasa forrajera o aprovechable por el ganado (dependiente de la composición florística y disponibilidad en cada sitio; de 0 a 1), FAA es el factor de ajuste abiótico (pendiente del terreno y cercanía a cuerpos de agua, principalmente (Holencheck *et al.*, 1989) y 4,927.5

(kg M.S.) es el requerimiento de alimento para mantener una unidad animal todo el año (3% de ingesta diaria de alimento en relación a su peso, vaca de 450 kg) (COTECOCA, 1967).

5.2.4 Campaña de muestreo en el estado de Coahuila, México

Durante el 2009 y 2010 se realizó una campaña de muestreo de pastizales y matorrales en el Estado de Coahuila, el cual cuenta con una extensión de 151,563 km², ocupa el tercer lugar a nivel nacional en cuanto a extensión y tiene coordenadas geográficas extremas al Norte 29°53', al Sur 24° 32' de latitud Norte; al Este 99°51', al Oeste 103°58' de longitud Oeste.

El muestreo se enfocó al levantamiento de datos radiométricos, fotográficos y de biomasa del estrato herbáceo y arbustivo.

Para esta campaña se establecieron 24 Sitios Permanentes de Muestreo (SPM) en el Estado de Coahuila, los cuales se ubicaron de tal forma que se cubriera la mayor parte de los ecosistemas forrajeros de la entidad (Figura 5.7).

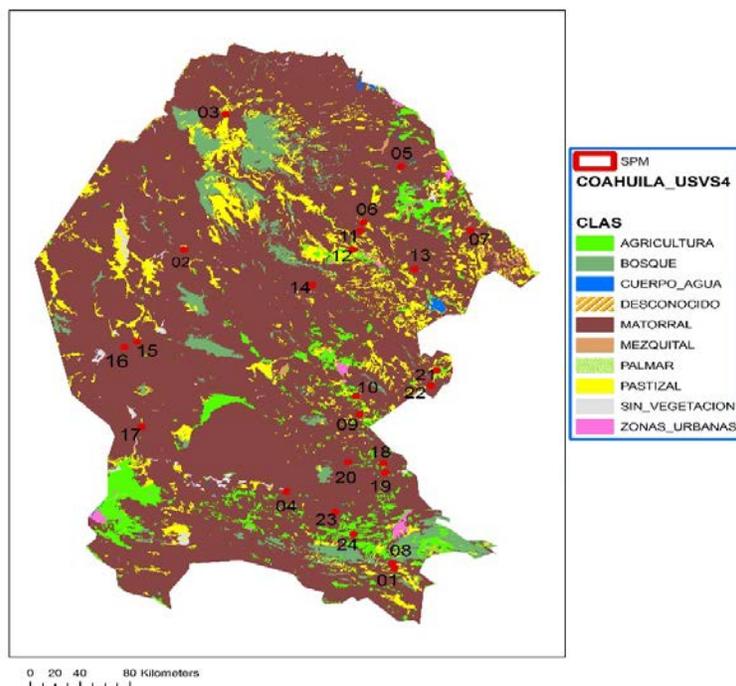


Figura 5.7. Distribución de los sitios permanentes de muestreo en el Estado de Coahuila.

Un SPM es un área cuadrangular de 225 ha (1.5 km x 1.5 km), en su interior contiene 9 Estaciones de Muestreo (EM), donde los centros entre estaciones se ubican cada 200 m. Con el objeto de llevar un mejor control y estandarizar la nomenclatura, las EM se enumeraron de Norte a Sur y de Este-Oeste dentro de los SPM (Figura 5.8).

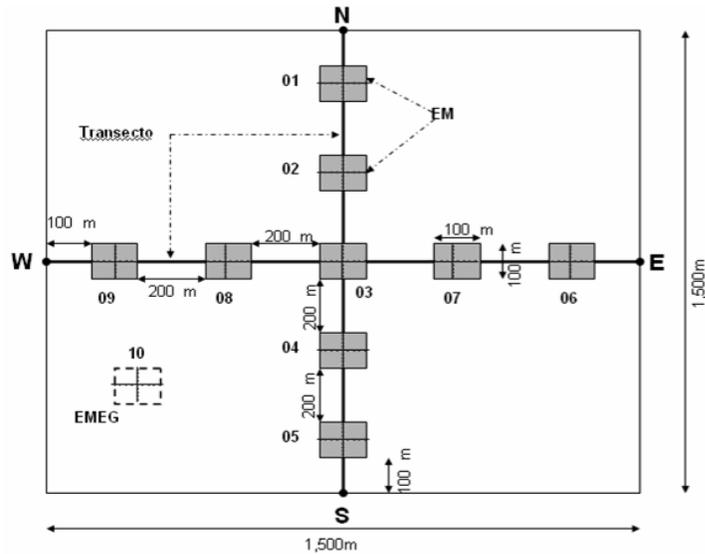


Figura 5.8. Representación esquemática de un SPM y la distribución de las EM.

Las EM son subsitios de 1 ha (100 m x 100 m), donde en su interior se distribuyeron 17 Puntos Generales de Muestreo (PGM), separados 12.5 m entre sí y, en cada cuadrante se estableció un punto denominado Punto de Muestreo de Biomasa (PMB), Figura 5.9.

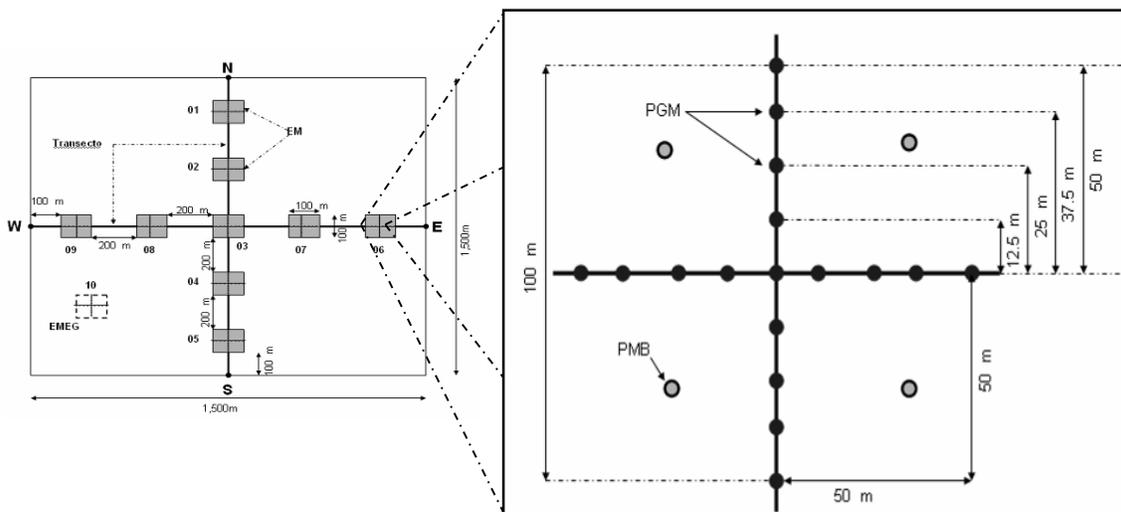


Figura 5.9. Distribución de los puntos de muestreo en una EM de un SPM

En cada PGM se realizaron mediciones de reflectancias (mismas bandas espectrales que el sensor TM del satélite Landsat 5) al usar un radiómetro multi-espectral modelo MSR16R de CropscanMR y mediciones de la cobertura vegetal usando una cámara digital modelo Cyber-shot DSC-V1 de SonyMR con resolución de 5.0 megapíxeles. En los PMB, adicionalmente a las mediciones radiométricas y de cobertura vegetal, se pesó en fresco el total del estrato herbáceo en un área circular de 1.6 m de diámetro (misma área de visión que el radiómetro), además se pesaron en fresco las especies forrajeras y no forrajeras en este estrato. Los pesos frescos se convirtieron a pesos secos al llevar las muestras de biomasa a peso constante al secarse en horno. La biomasa de cada SPM es el promedio de 18 (2 PMB por EM) o 36 (4 PMB por EM) muestras individuales, por visita.

5.3 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

La discusión de este apartado se centra en la escala de SPM, bajo la consideración de que en la mayoría de las 24 distribuidas en el Estado de Coahuila solo se realizó una visita y máximo dos, por lo que no hay información multi-temporal suficiente para un análisis a escala de EM o puntos de muestreo. En esta perspectiva, el desarrollo teórico del IVPN permite analizar los patrones espectrales por SPM al usar líneas de igual vegetación. En el caso de la estimación de la capacidad de carga animal, ésta es aproximada solo por el estrato herbáceo y no considera la parte arbustiva (ramoneo). Asociado a esto, un problema de la metodología de muestreo de los PMB es que en muchos casos la Bm colectada no representó el total, ya que existían cactáceas o pequeños arbustos que definían un valor mayor de la biomasa. Las mediciones radiométricas y de la cobertura vegetal consideraron todo tipo de plantas en el área de medición, por lo que se espera que en algunas EM de las SPM analizadas (particularmente en matorrales) la relación entre el IVPN y la Bm se vea enmascarada por esta situación. No obstante esto, se realizó una revisión de las mediciones realizadas y se detectó en que SPM ocurría con mayor gravedad este problema, por lo que estos fueron eliminados de los análisis espectrales.

5.3.1 Relaciones entre las biomases de los SPM

La Figura 5.10 muestra la relación entre el Peso Fresco Total (PFT) y el Peso Seco Total (PST) de los promedios de la biomasa colectada en los SPM. Asimismo, en esta misma figura se muestra la relación entre el PST y el Peso Seco Total Forrajero (PSTF). Las relaciones mostradas fueron hechas con regresiones lineales, forzadas a pasar por el origen. Así, de la relación (5.10) se tiene que $FH = PST/PFT$ y $FAG = PSTF/PST$. El factor FA puede dejarse como igual a 0.5 y FAA es dependiente de la topografía y cuerpos de agua de áreas específicas en el Estado de Coahuila.

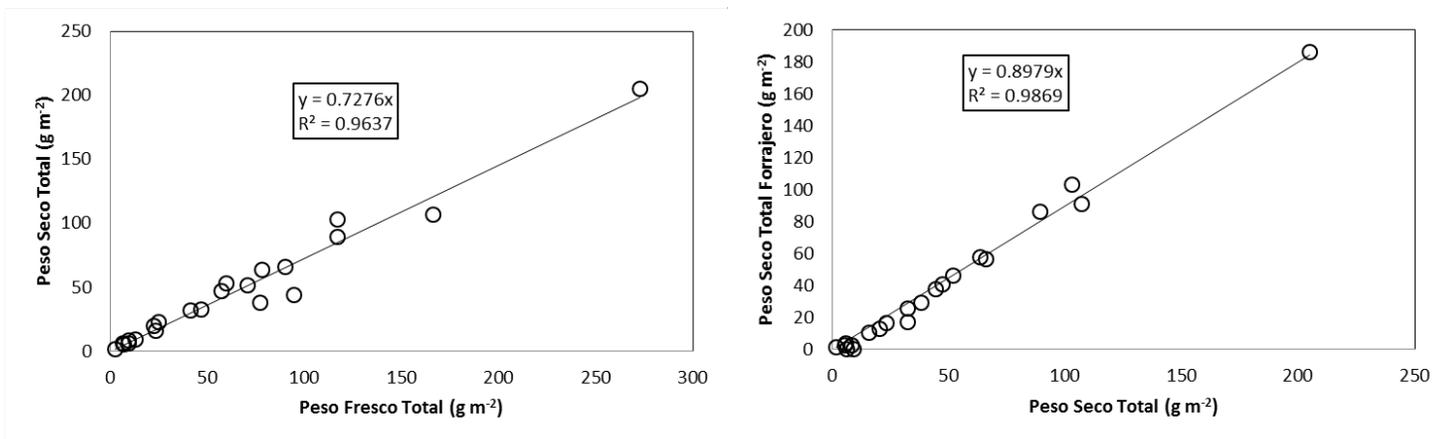


Figura 5.10. Relación entre las diferentes fracciones de la biomasa promedio de las SPM.

En la Figura 5.10 se consideró que FH permanece constante durante todo el periodo de crecimiento de la vegetación, lo cual es no necesariamente cierto por lo que deben realizarse ajustes estacionales para considerar diferentes contenidos de agua de la biomasa (NRCS, 1997).

5.3.2 Patrones entre a_0 y b_0 en las SPM

Con las mediciones de reflectancia de las bandas del R e IRC, estandarizadas a un ángulo cenital de iluminación de 30°, de los PMB en las estaciones de muestreo de los SPM, se estimaron en forma directa por regresión lineal los parámetros a_0 y b_0 de las líneas igual de vegetación en toda la SPM. Para analizar la relación entre a_0 y $1/b_0$,

ecuación (5.2), se revisaron las SPM que tenían información que se asocian a la etapa vegetativa del estrato herbáceo. La Figura 5.11 muestra esta situación para las únicas SPM con estos datos. Se observa en esta figura que la constante c es aproximadamente 0.8 y la d es -0.025 , donde esta última aproxima bien el valor de $d = -0.024$ definido en la Figura 2b.

La situación de una pendiente de la línea del suelo (b_s) menor que 1 fue planteada como motivación para el desarrollo del IVPN. Después de revisar y analizar la información que se asocian al suelo desnudo en las SPM, se decidió usar un valor de $b_s = 0.85$ como representativo de las diferentes condiciones encontradas en los SPM del estado de Coahuila.

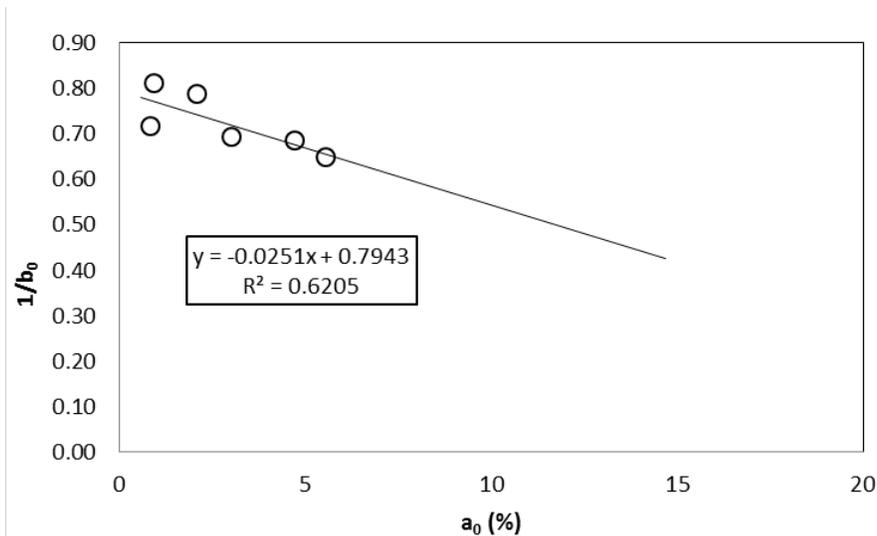


Figura 5.11. Relación entre a_0 y $1/b_0$ para SPM muestreados durante la etapa vegetativa del crecimiento del estrato herbáceo.

5.3.3 Relación entre el IVPN y el peso fresco total del estrato herbáceo en los SPM

El PFT (peso fresco total) medido en los PMB de los SPM no representa necesariamente la biomasa verde, ya que muchas mediciones se realizaron sobre mezclas de vegetación verde y muerta (senescente); además de lo discutido en relación a la mezcla de otras especies no herbáceas en las mediciones de reflectancias (que se refleja en el IVPN). No obstante lo anterior, la relación lineal entre el IVPN y la Bm aérea total fresca (Figura 5.12), regresión lineal forzada al origen, en los SPM para el caso de matorrales y pastizales es adecuada. Las relaciones (Figura 5.12) implican que $(p/K_R) = 2,877.3$ en la estimación de la capacidad de carga en pastizales y 1,112.2 en matorrales. Los resultados mostrados en la Figura 5.12 muestran un buen ajuste estadístico, por lo que se pueden considerar como adecuados para los fines de estimaciones a escala estatal de capacidad de carga.

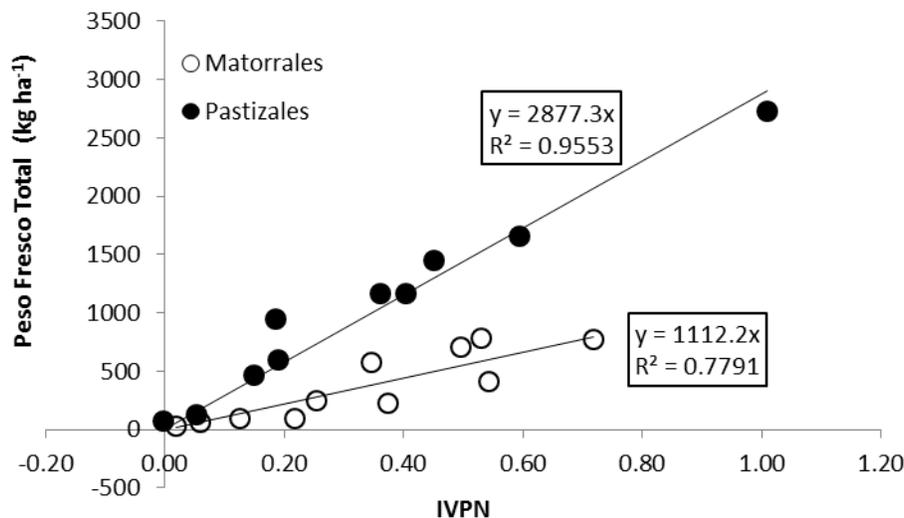


Figura 5.12. Relación entre el IVPN y la Bm fresca total del estrato herbáceo en los SPM.

De la relación (5.10), y de los resultados obtenidos en su calibración en Coahuila, México, se puede establecer (FAA=1.0, FA=0.5, FH=0.73, FAG=0.90):

$$CC = \left(\frac{pq}{K_R} \right) IVPN$$

$$q = 6.66667E - 05, \text{ pastizales y matorrales}$$

$$\frac{P}{K_R} = 2877.3, \text{ pastizales}$$

$$\frac{P}{K_R} = 1112.2, \text{ matorrales}$$

$$CC = 0.192IVPN, \text{ pastizales}$$

$$CC = 0.074IVPN, \text{ matorrales}$$

(5.11)

Las relaciones (5.11) implican que para condiciones excelentes del agostadero, entonces los pastizales ($IVPN = 1.0$) tienen un coeficiente de agostadero de alrededor de 5 ha UA^{-1} y los matorrales ($IVPN = 0.75$) de alrededor de 18 ha UA^{-1} . Que pasa por sitio, es el mismo IVPN

Para analizar la incertidumbre de las relaciones desarrolladas, el Cuadro 5.1 muestra los promedios y desviaciones estándares por SPM analizado.

Cuadro 5.1. Promedios y desviaciones estándares de las variables medidas por SPM

SPM	Tipos de vegetación predominante	Desv. Est. PFT (g ha ⁻¹)	Promedio PFT (g ha ⁻¹)	Promedio PST (g ha ⁻¹)	Desv. Est. PST (g ha ⁻¹)	Promedio PST forrajero (g ha ⁻¹)	Desv. Est. PST forrajero (g ha ⁻¹)	Promedio IVPN Mat	Desv. Est. IVPN Mat
01	Matorral	78.28	52.92	63.33	43.08	57.67	44.15	0.531	0.035
02	Pastizal	46.92	44.66	32.33	27.12	25.42	22.75	0.150	0.057
03	Pastizal	116.91	91.67	102.68	76.80	102.68	76.80	0.403	0.024
04	Matorral	2.61	4.44	1.70	2.50	1.02	2.35	0.018	0.014
05	Matorral	41.13	29.44	32.24	22.49	17.28	10.76	0.542	0.051
06	Pastizal	116.88	76.44	89.01	55.24	86.26	55.32	0.360	0.034
07	Matorral	77.21	32.85	38.23	17.67	29.13	18.91	0.718	0.056
08	Matorral	70.65	46.19	51.73	41.24	45.90	44.60	0.495	0.028
09	Pastizal	94.44	58.92	44.24	29.63	37.37	31.95	0.185	0.067
11	Pastizal	166.16	77.55	107.04	51.59	90.57	51.69	0.595	0.038
12	Pastizal	272.67	83.33	205.08	37.93	186.07	41.42	1.010	0.073
13	Matorral	57.04	52.80	47.19	43.16	40.67	40.89	0.347	0.020
14	Pastizal	144.57	80.35			45.84	36.78	0.450	0.092
15	matorral	24.67	20.85	23.02	19.47	16.18	19.57	0.254	0.014
16	Matorral	22.31	20.71	20.12	18.52	13.01	15.05	0.374	0.010
17	Matorral	6.57	11.00	5.88	9.81	3.96	9.77	0.060	0.011
18	Matorral	9.10	14.93	6.07	10.37	0.01	0.08	0.217	0.011
19	Pastizal	13.00	15.52	8.88	8.18	0.18	0.61	0.052	0.018
20	Pastizal	59.83	27.25	53.22	24.20			0.189	0.017
23	Matorral	9.31	9.16	8.14	7.76	2.72	3.59	0.126	0.020
24	Pastizal	6.78	8.27	5.39	6.46	2.25	2.88	-0.003	0.022

5.4 CONCLUSIONES

La principal aportación de este trabajo fue generalizar el desarrollo de un índice espectral (IVPN), más allá de las limitaciones del índice NDVI_{cp} publicado, bajo la consideración de que el índice debe tener una relación lineal con el índice de área foliar o biomasa del follaje.

Las estimaciones de la biomasa total, en todos los estratos, se pueden relacionar con los valores del IVPN satelital, de tal manera que se puedan establecer relaciones funcionales que permitan expandir las estimaciones en forma espacial y temporalmente exhaustiva en todo el estado de Coahuila; además de permitir tener estimaciones de la curva de crecimiento de la vegetación para caracterizar a la capacidad de carga animal en términos dinámicos. Los desarrollos mostrados permiten su aplicación extensiva en el país para obtener actualizaciones, y series temporales, del uso de la vegetación forrajera y así realizar una planeación del uso ganadero.

Los desarrollos teóricos y la evidencia experimental presentada permiten obtener una estimación aproximada de la capacidad de carga animal en los pastizales y matorrales del Estado de Coahuila. Para realizar estimaciones completas en un multi-estrato, es necesario relacionar la biomasa del estrato herbáceo con la biomasa total.

Es importante enfatizar que las estimaciones realizadas son promedio de los sitios de 1.5 km x 1.5 km (225 ha) y que tienen errores asociados a cada factor de calibración discutido. Así, es necesario realizar un análisis de incertidumbre (propagación de errores) que se asocian a la estimación de las capacidades de carga animal a otras escalas espaciales.

5.5 LITERATURA CITADA

- Bausch, W.C. 1993. Soil background effects on reflectance-based crop coefficients for corn. *Remote Sensing of Environment* 46: 213-222.
- Bolaños, M., y F. Paz. 2010. Modelación general de los efectos de la geometría de iluminación-visión en la reflectancia de pastizales. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias* 1: 349-361.
- Breda, J. J. N. 2003. Ground-based measurements of leaf area index: a review of methods, instruments and current controversies. *Journal of Experimental Botany* 392: 2403-2417.
- Chebouni, A., Y.H. Kerr, J. Qi, A.R. Huete, and S. Sorooshian. 1994. Toward the development of a multidirectional vegetation index. *Water Resources Research* 30: 1281-1286.
- COTECOCA. 1967. Metodología para determinar tipos vegetativos, sitios y productividad de sitios. Publicación No. 8. México, D.F. 84 p.
- Diaz-Solis, H., Kothmann, M.M., Hamilton, W.T. y Grant, W.E. 2003. A simple ecological sustainability simulator (SESS) for stocking rate management on semi-arid grazinglands, *Agricultural System* 76: 655-680.
- Gao, X., A.R. Huete, W. Ni, and T. Miura. 2000. Optical-biophysical relationships of vegetation spectra without background contamination. *Remote Sensing of Environment* 74: 609-620.
- Gilabert, M.A., J. González, F.J. García, and J. Meliá. 2001. A generalized soil-adjusted vegetation index. *Remote Sensing of Environment* 82:303-310.
- Goudriaan, J., and H.M. van Laar. 1994. Modelling potential crop growth processes. textbook with exercises. *Current Issues in Production Ecology*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht 238 p.

- Holenchek, J.L., R.D. Pieper, and C.H. Herbel. 1989. Range management, principles and practices. Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J. 501 p.
- Huete, A.R. 1987. Soil-dependent spectral response in a developing plant canopy. *Agronomy Journal* 79: 61-68.
- Huete, A.R. 1988. A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). *Remote Sensing of Environment* 25: 295-309.
- Huete, A.R., R.D. Jackson, and D.F. Post. 1985. Spectral response of a plant canopy with different soil backgrounds. *Remote Sensing of Environment* 17: 35-53.
- Huete A.R., G. Hua, J. Qi, and A. Chehbouni. 1992. Normalization of multidirectional red and nir reflectances with SAVI. *Remote Sensing of Environment* 41: 143-154.
- NRCS. 1997. National Range and Pasture Handbook, Natural Resources Conservation Service, United States Department of Agriculture, Washington, D.C. 472 p.
- Paz, F., E. Palacios, E. Mejía, M. Martínez, y L.A. Palacios. 2005. Análisis de los espacios espectrales de la reflectividad del follaje de los cultivos. *Agrociencia* 39:293-301.
- Paz, F., E. Palacios, M. Bolaños, L.A. Palacios, M. Martínez, E. Mejía, y A. Huete. 2007. Diseño de un índice espectral de la vegetación: NDVI_{lcp}. *Agrociencia* 41: 539-554
- Qi J., A.R. Huete, F. Cabot, and A. Chehbouni 1994. Bidirectional properties and utilization of high-resolution spectra from a semiarid watershed. *Water Resources Research* 30: 1271-1279.
- Rodskjer, N. 1972. Measurements of solar radiation in barley and oats. *Swed. J. Agricultural Research* 2: 71-81.
- Romero, E., F. Paz, E. Palacios, M. Bolaños, R. Valdez, y A. Aldrete. 2009. Diseño de un índice espectral de la vegetación desde una perspectiva conjunta de los patrones exponenciales y lineales del crecimiento. *Agrociencia* 43: 291-307.

- Ross, J. 1981. The radiation regime and architecture of plant stands. W. Junk, Norwell, MA, 391 p.
- Rouse, J.W., R.H. Haas, J.A Schell, D.W. Deering, and J.C. Harlan. 1974. Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation. MASA/GSFC. Type III. Final Report, Greenbelt, MD. 371 p.
- Rowley, R. J., K.P. Price, and J.H. Kastens. 2007. Remote sensing and the rancher: linking perception and remote sensing. *Rangeland Ecology and Management* 60: 359-368
- Stockle, C. O., M. Donatelli, and R. Nelson. 2003. CropSyst, a cropping systems simulation model. *Eur. Journal of Agronomy* 18: 289-307.
- SAGARPA. 2007 Acuerdo por el que se Establecen las Reglas de Operación de los Programas de la Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Diario Oficial de la Federación del 31 de diciembre de 2007. 132 p.
- SAGARPA. 2008. Lineamientos Específicos del Componente Producción Pecuaria Sustentable y Ordenamiento Ganadero y Avícola (PROGAN) del Programa de Uso Sustentable de Recursos Naturales para la Producción Primaria de las Reglas de Operación de los Programas de la Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Diario Oficial de la Federación del 10 de marzo de 2008. 27 p.
- Tucker, C.J. 1979. Red and photographic infrared linear combination for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment* 8: 127-150.
- Verstraete, M. M., and B. Pinty. 1996. Designing optical spectral indexes for remote sensing applications. *IEEE Transactions in Geoscience and Remote Sensing* 34: 1254-1265.
- Weiss, M., F. Baret, G. J. Smith, I. Jonckheere, and P. Coppin. 2004. Review of methods for in situ leaf area index (LAI) determination Part II. Estimation of LAI, errors and sampling. *Agricultural and Forest Meteorology* 121: 37-53

Yoshiaka, H., T. Miura, A.R. Huete, and B.D. Ganapol. 2000. Analysis of vegetation isolines in red-NIR reflectance space. *Remote Sensing of Environment* 74: 313-326.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con base a lo planteado anteriormente, es posible obtener las siguientes conclusiones y recomendaciones generales.

Es posible llevar a cabo la implementación de nuevas metodologías para el monitoreo (SIMTOG) de vegetación al usar sensores remotos, así como su validación en campo para la estimación de variables biofísicas con el objetivo de estimar biomasa aérea para fines en actividades de ganadería.

Al usar la tecnología de sensores remotos permite tener estimaciones de la curva de crecimiento de la vegetación para caracterización de carga animal en los sistemas de producción pecuario en términos dinámicos. Estos desarrollos permiten su aplicación extensiva en el país para obtener actualizaciones en serie temporal en usos de vegetación forrajera para tener una mejor planeación en un uso ganadero.

Es posible ahorrar tiempo y esfuerzo al usar metodologías de sensores remotos para estimaciones de biomasa aérea mediante variables biofísicas.

Recomendaciones:

Se recomienda continuar en la investigación de nuevas tecnologías en el uso de sensores remotos para la estimación de biomasa aérea mediante variables biofísicas para minimizar errores y obtener resultados más confiables.

Con base a los resultados obtenidos en campo de la campaña de monitoreo satelital (SIMTOG), se sugiere hacerla extensiva a nivel nacional para actualizar coeficientes de agostadero en los sitios de muestreo.

Es recomendable implementar este mismo esquema de monitoreo (SIMTOG) para estimación de vegetación para continuar la validación de tecnología en el uso de sensores remotos.