



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO EN HIDROCIENCIAS

**MARCO METODOLÓGICO DE LA ESTIMACIÓN DE
RENDIMIENTOS UTILIZANDO SENSORES REMOTOS**

FERMÍN PASCUAL RAMÍREZ

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA
OBTENER EL GRADO DE:

DOCTOR EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO

2011

LA PRESENTE TESIS, TITULADA: **MARCO METODOLOGICO DE LA ESTIMACIÓN DE RENDIMIENTOS UTILIZANDO SENSORES REMOTOS**, REALIZADA POR EL ALUMNO: **FERMÍN PASCUAL RAMÍREZ**, 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

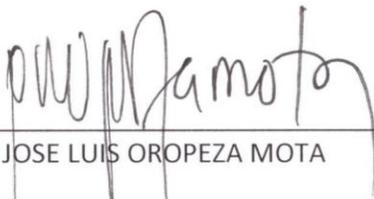
CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO: 

DR. FERNANDO PAZ PELLAT

ASESOR: 

DR. MARIO R. MARTÍNEZ MENES

ASESOR: 

DR. JOSÉ LUIS OROPEZA MOTA

ASESOR: 

DR. MARTÍN A. BOLAÑOS GONZÁLEZ

ASESOR: 

DR. JUAN ENRIQUE RUBIÑOS PANTA

Montecillo, Texcoco, México, 06 de Octubre de 2011

MARCO METODOLÓGICO DE LA ESTIMACIÓN DE RENDIMIENTOS UTILIZANDO SENSORES REMOTOS

Fermín Pascual Ramírez, Dr.

Colegio de Postgraduados, 2011

RESUMEN

El presente trabajo detalla el uso exclusivo de la información de reflectancia en la banda del Infrarrojo Cercano (IRC) como herramienta de análisis para el monitoreo del estado de desarrollo de los cultivos y la estimación de rendimientos. Comienza por analizar el comportamiento de la reflectancia del IRC con respecto a algunas variables biofísicas; posteriormente analiza la relación entre los Índices de Vegetación y el IRC, concluyendo que éste se puede utilizar en sustitución aquel sobre todo a partir de la etapa de crecimiento lineal. Se utiliza la información multitemporal de la reflectancia del IRC para la modelación de la curva de crecimiento, lo cual se realizó utilizando datos mediciones radiométricas y biofísicas en cinco cultivos. Basado en la evolución temporal de los valores de reflectancia, se propuso un estimador lineal para fines predictivos, que funciona a partir de la etapa lineal del desarrollo del cultivo analizado. Los resultados mostraron que para fines de predicción de rendimiento potencial, se puede utilizar confiablemente la información de la banda del IRC.

Palabras Clave: Estimación de Rendimientos, Modelación del Desarrollo de Cultivos, Reflectancia del IRC, Índices de Vegetación

METHODOLOGICAL FRAMEWORK FOR YIELD ESTIMATION USING REMOTE SENSING

Fermín Pascual Ramírez, Dr.

Colegio de Postgraduados, 2011

RESUMEN

This paper details the exclusive use of the information of reflectance in the band of Near Infrared (NIR) as an analytical tool for monitoring the state of crop growth and yield estimation. It begins by analyzing the behavior of the reflectance of the NIR with respect to some biophysical variables, and subsequently analyzed the relationship between vegetation index and NIR reflectance, concluding that it can be used to replace that from the linear growth stage. Multitemporal NIR reflectance is used for modeling the growth curve, which was performed using radiometric and biophysical data on five crops. Based on the temporal evolution of the reflectance values, suggested a linear estimator for predictive purposes, which runs from the linear stage of crop development analysis. The results showed that for purposes of prediction of potential yield can be used reliably in the spectral window of the NIR.

Keywords: Estimating Yields, Crop Development Modeling, NIR Reflectance, Vegetation Index

DEDICATORIA

A **Ángel Alejandro y Andrei Arturo**

Por todo el tiempo robado a ustedes, en la realización de los estudios doctorales y culminación de éste trabajo para la obtención del grado. Que nada los detenga en la obtención de sus objetivos, sin afectar a terceros.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por concederme la gracia de la vida y todo lo que tengo

A mis padres, Jacinta Ramírez y Valente Pascual, por todo el tiempo que han cuidado de mí y que aún hoy, siguen pendientes de mí.

Al Pueblo de México, que a través de diferentes instancias, han financiado mis estudios desde la secundaria.

Al CONACYT, por el financiamiento de los estudios doctorales.

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

A los Doctores Fernando Paz, Mario Martínez, José Luis Oropeza, Martín Bolaños y Enrique Rubiños, por haber aceptado formar parte de mi consejo asesor doctoral y por confiar en mí para el desarrollo del presente trabajo. Es de destacar también, la siempre total disposición a colaborar con un servidor, brindando el total apoyo a todas las iniciativas emprendidas tanto académicas como de servicio planteadas y desarrolladas durante mi estancia de estudios doctorales.

A los Doctores David del Valle y Abel Quevedo, cuyo apoyo en situaciones adversas, fue fundamental para la culminación de estos estudios.

Al Dr. Enrique Palacios Vélez, quien fungió en un principio como profesor orientador y responsable académico, por la confianza depositada en mi persona y la disposición de colaborar, a pesar de no figurar en el consejo asesor.

A la Hma. Flor Ramos Villada, Directora General del “Instituto Hidalgo” y, Profra. Julia Espinoza, del Jardín de Niños “Fernando de Alva Ixtlixóchitl” por el apoyo otorgado tanto económico como moral que permitieron combinar satisfactoriamente mis obligaciones de Papá Soltero y estudiante doctoral, en el cuidado y educación de mis hijos desde el inicio del programa doctoral.

A todas las personas que directa o indirectamente contribuyeron a que la combinación de mi estancia como alumno doctoral y Papá Soltero, fuera de manera agradable.

A mis amigos, Jesús Rodríguez, Genaro Contreras, Arturo Salgado, Isabel Marín, Teresa Vázquez, Alejandro Romero y Martín Bolaños por todo el apoyo incondicional que siempre me han brindado, especialmente a Dinora Vázquez. Mención aparte, a Carlos Castañeda y Salvador Esparza, por la amistad y confianza total en las inquietudes académicas a pesar del corto tiempo de conocernos.

Finalmente, a Dulce María, aunque las circunstancias hayan cambiado, siempre le estaré agradecido por darme este par de hijos maravillosos que siempre me dan alegría.

CONTENIDO

CONTENIDO.....	viii
ÍNDICE DE CUADROS	xii
ÍNDICE DE FIGURAS	xiv
CAPÍTULO 1. ESTIMACIÓN DE RENDIMIENTOS UTILIZANDO SENSORES REMOTOS	1
1.1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.2 OBJETIVOS.....	5
1.2.1 OBJETIVO GENERAL	5
1.2.2 OBJETIVOS PARTICULARES.....	5
1.3 HIPOTESIS.....	6
1.4 GENERALIDADES	6
1.4 LITERATURA CITADA	8
CAPÍTULO 2. BASES PARA EL ANÁLISIS ESPECTRAL DEL DESARROLLO DE CULTIVOS	10
2. 1 INTRODUCCIÓN.....	10
2.2 MATERIALES Y MÉTODOS.....	13
2.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	13
2.4 CONCLUSIONES	25

2.5 LITERATURA CITADA	26
CAPÍTULO 3. ANÁLISIS ESPECTRAL MULTITEMPORAL DEL DESARROLLO DE CULTIVOS	28
3.1 INTRODUCCIÓN.....	28
3.2 MATERIALES Y MÉTODOS.....	31
3.2.1. Ubicación del área de estudio	32
3.2.2. Mediciones realizadas.....	32
3.2.3 Procesamiento de la información	33
3.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	34
3.3.1 Análisis de la reflectancia en la banda del IRC y los valores de IAF en maíz y algodón.....	35
3.3.2 Análisis de las Etapas de Desarrollo de Cultivos en el Valle del Yaqui.	41
3.4 CONCLUSIONES	53
3.5 LITERATURA CITADA	55
CAPÍTULO 4. MODELACIÓN DEL DESARROLLO DE CULTIVOS UTILIZANDO INFORMACIÓN SATELITAL	57
4.1 INTRODUCCIÓN.....	58
4.2 MATERIALES Y MÉTODOS.....	60
4.2.1 Área de trabajo para cultivos homogéneos en grandes extensiones	61
4.2.2. Área de trabajo de otros cultivos homogéneos establecidos en grandes extensiones libres de nubosidad con uniformidad de desarrollo	68

4.2.3 Área de trabajo para cultivos heterogéneos en superficie pequeña y altas perturbaciones atmosféricas.....	69
4.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	74
4.3.1 Cultivos homogéneos en grandes extensiones.....	75
4.3.2 Otros cultivos homogéneos en grandes extensiones con uniformidad de desarrollo.	87
4.3.3 Cultivos heterogéneos en superficies pequeñas con perturbaciones atmosféricas frecuentes	91
4.4 CONCLUSIONES	95
4.5 LITERATURA CITADA	96
CAPÍTULO 5. UNA APROXIMACIÓN AL SEGUIMIENTO DEL ESTADO DE DESARROLLO DE CULTIVOS Y LA ESTIMACIÓN DE RENDIMIENTOS.....	98
5.1 INTRODUCCIÓN.....	99
5.2 MATERIALES Y MÉTODOS.....	100
5.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	102
5.3.1 Estado de desarrollo relativo del cultivo por fecha	103
5.3.2 Crecimiento relativo del cultivo entre fechas	109
5.3.3 Cálculo del Rendimiento Potencial.....	113
5.3.4 Análisis de los errores de estimación.....	128
5.4 CONCLUSIONES	132
5.5. LITERATURA CITADA	133

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	134
---	-----

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 3.1. Detalle de las condiciones de medición de la Campaña de Muestreo Yaqui 2008	33
Cuadro 3.2. Descripción de las etapas indicadas en la Figura 7	43
Cuadro 3.3. Etapas del Desarrollo del Sorgo del a Figura 8	45
Cuadro 3.4. Etapas del desarrollo del garbanzo, descritas en la Figura 9	47
Cuadro 3.5. Descripción de las etapas mostradas en la Figura 10	49
Cuadro 3.6. Descripción de las etapas finales del desarrollo del trigo de la Figura 12	53
Cuadro 4.1. Detalle de las imágenes utilizadas.....	62
Cuadro 4.2. Imágenes utilizadas para el análisis en Morelos	70
Cuadro 4.3. Etapas del desarrollo del frijol, presente en la Figura 3	77
Cuadro 4.4. Etapas de desarrollo visibles del sorgo	79
Cuadro 4.5. Descripción de algunas etapas de desarrollo del garbanzo	83
Cuadro 4.6. Descripción de algunas etapas del desarrollo del cártamo.....	85
Cuadro 4.7. Descripción de las etapas muestreadas del desarrollo del trigo	87
Cuadro 5.1. Estadística descriptiva de los Errores de Estimación en unidades de Reflectancia (%)	129
Cuadro 5.2. Estadística descriptiva de los Errores de Estimación en unidades de Reflectancia (%)	130

Cuadro 5.3. Estadística Descriptiva del error, expresado en porcentaje respecto del valor en la imagen	131
--	-----

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Relación entre IAF y NDVI	14
Figura 2.2. Relación entre IAF e IVIS.....	15
Figura 2.3. Relación entre el IAF y la reflectancia en el R.....	17
Figura 2.4. Relación entre el IAF y la Reflectancia en el IRC.....	17
Figura 2.5. Relación entre la Reflectancia del IRC y el IVIS. a) Suelo Claro Húmedo, b) Suelo Claro Seco, c) Suelo Oscuro Húmedo y d) Suelo Oscuro Seco	18
Figura 2.6. Ajustes lineales entre IRC e IVIS. a) Suelo Claro Húmedo, b) Suelo Claro Seco, c) Suelo Oscuro Húmedo y d) Suelo Oscuro Seco.....	20
Figura 2.7. Ajustes lineales entre IRC e IVIS, con IAF mayor de 0.31. a) Suelo Claro Húmedo, b) Suelo Claro Seco, c) Suelo Oscuro Húmedo y d) Suelo Oscuro Seco.....	21
Figura 2.8. Relación entre IRC e IVIS, para el cultivo de algodón. a) Suelo seco 1, b) Suelo seco 2, c) Suelo seco 3 y d) Suelo seco 4	22
Figura 2.9. Ajustes lineales del IRC e IVIS, en todos los valores de IAF en algodón. a) Suelo seco 1, b) Suelo seco 2, c) Suelo seco 3 y d) Suelo seco 4	23
Figura 2.10. Ajustes lineales del IRC e IVIS, usando valores iniciales de IAF de algodón mayores de 0. a) Suelo seco 1, b) Suelo seco 2, c) Suelo seco 3 y d) Suelo seco 4.....	24
Figura 3.1. Modelo expo-lineal del desarrollo general de cultivos cíclicos	30

Figura 3.2. Desarrollo temporal de cultivos y su relación con el IAF. a) Algodón y b) Maíz	35
Figura 3.3. Relación de IAF y Cobertura en el cultivo de algodón.....	36
Figura 3.4. Relación entre IRC y IAF, para el cultivo de algodón en cuatro suelos secos diferentes. a) Suelo seco 1, b) Suelo seco 2, c) Suelo seco 3 y d) Suelo seco 4.....	37
Figura 3.5. Ajuste doble de IRC y el IAF. a) Suelo seco 1, b) Suelo seco 2, c) Suelo seco 3 y d) Suelo seco 4	39
Figura 3.6. Ajuste de los valores de IRC y el IAF, para el cultivo de maíz. a) Suelo claro húmedo, b) Suelo claro seco, c) Suelo oscuro húmedo y d) Suelo oscuro seco.....	40
Figura 3.7. Etapas del desarrollo del frijol	42
Figura 3.8. Etapas tempranas del desarrollo del sorgo	45
Figura 3.9. Etapas del desarrollo del garbanzo	46
Figura 3.10. Etapas de desarrollo del cártamo.....	49
Figura 3.11. Floración del cártamo y visto de manera conjunta desde las reflectancias del R e IRC.....	51
Figura 3.12. Etapas finales del desarrollo del trigo.....	52
Figura 4.1. Cobertura del área de estudio con imágenes del sensor TM	65
Figura 4.2. Cobertura del área de estudio con imágenes del sensor ETM+.....	66
Figura 4.3. Ubicación de otros cultivos en el Valle del Yaqui	69

Figura 4.4. Imagen con nubosidad de fecha 28 de Enero de 2010	73
Figura 4.5. Imagen libre de nubosidad, fecha 15 de Enero de 2011	74
Figura 4.6. Algunas etapas del desarrollo del Frijol. a) con base en información satelital, b) con base en información de radiometría de campo	76
Figura 4.7. Etapas del desarrollo del sorgo.....	79
Figura 4.8. Etapas del desarrollo del garbanzo.....	81
Figura 4.9. Desarrollo multi-temporal del cártamo.....	84
Figura 4.10. Desarrollo multi-temporal del trigo en la reflectancia del IRC.....	86
Figura 4.11. Dos casos de trigo a) 99 ha y b) 25 ha.....	88
Figura 4.12. Desarrollo multi-temporal del cultivo de naranja.....	89
Figura 4.13. Desarrollo multi-temporal de un cultivo de papa. a) Con relación al IRC, b) Con relación a dos IV.....	90
Figura 4.14. Desarrollo multi-temporal en caña de azúcar. a) con respecto a la reflectancia del IRC y, b) con respecto a dos IV.....	92
Figura 4.15. Desarrollo multi-temporal de otro cultivo de caña, a) con respecto al IRC, b) con respecto a dos IV	94
Figura 5.1. Delimitación de Sub-Parcela, para análisis	101
Figura 5.2. Etapas visibles del frijol en la sub-parcela de análisis.....	102
Figura 5.3. Desarrollo Relativo del Frijol al DJ 103, 45 DDS.....	104
Figura 5.4. Desarrollo Relativo del Frijol al DJ 111	105
Figura 5.5. Desarrollo Relativo del Frijol al DJ 119	106

Figura 5.6. Desarrollo Relativo del Frijol al DJ 127	108
Figura 5.7. Crecimiento Relativo del Frijol entre el DJ 103 y el DJ 111.....	110
Figura 5.8. Crecimiento Relativo del Frijol entre el DJ 111 y el DJ 119.....	111
Figura 5.9. Crecimiento Relativo del Frijol entre el DJ 119 y el DJ 127.....	112
Figura 5.10. Desarrollo temporal de la Bm fresca en frijol.....	114
Figura 5.11. Relación entre IRC y Bm.....	115
Figura 5.12. Relación entre Bm fresca aérea y Bm seca aérea	115
Figura 5.13. Desarrollo temporal de la Bm seca aérea y reproductiva en frijol ...	116
Figura 5.14. Relación entre Bm seca total y el ln de la Bm reproductiva	118
Figura 5.15. Relación Bm seca total vs Bm seca reproductiva del DJ 114 al DJ 133	119
Figura 5.16. Desarrollo temporal del IC.....	120
Figura 5.17. Comportamiento del valor promedio de IRC en el tiempo.....	122
Figura 5.18. Ajustes lineales a diferentes fechas	123
Figura 5.19. Relación entre IRC satelital y el IRC estimado.....	124
Figura 5.20. Relación entre pendiente e intersección de estimadores lineales individuales a nivel pixelar.....	125
Figura 5.21. Relación IRC satelital calculado vs IRC estimado con el modelo....	126
Figura 5.22. Mapa del probable Estado de Desarrollo, Estimado al DJ 127	127

CAPÍTULO 1. ESTIMACIÓN DE RENDIMIENTOS UTILIZANDO SENSORES REMOTOS

1.1 INTRODUCCIÓN

La agricultura mexicana, se lleva a cabo principalmente en 22 millones de hectáreas, de las cuales, aproximadamente ocho millones son de riego, organizadas en Distritos y Unidades de Riego, donde se produce el 80% de la producción agrícola nacional, siendo el resto de temporal. Uno de los problemas que se tiene en las superficies cultivadas, es conocer con anticipación, el volumen de producción a obtener y al mismo tiempo el rendimiento esperado del cultivo. Reviste igual importancia, conocer con el mayor detalle posible en términos espaciales y temporales, el estado de desarrollo de los cultivos con el fin de controlar las variables que pueden afectar la producción.

Con el relativo abaratamiento del uso de la tecnología de sensores remotos, a bordo de plataforma satelitales, cada vez se plantean mayores aplicaciones para éstos, trabajando en diferentes rangos del espectro electromagnético. Uno de los primeros usos, ha sido monitoreo de los recursos naturales, para lo cual se ha sacado ventaja de los contrastes entre la reflectancia espectral en la banda del Rojo (R) y del Infrarrojo Cercano (IRC), generando así los Índices de Vegetación (IV) (Tucker, 1979).

Con este antecedente, se ha planteado que una de las alternativas para realizar monitoreo masivos a bajo costo, en parcelas de cultivo, lo constituye el uso de los sensores remotos instalados a bordo de plataformas satelitales, las cuales cada vez existen en mayor número y mejorando las características de resolución espacial, radiométrica y temporal.

Sin embargo, el uso de la tecnología satelital, requiere de los insumos adecuados hablando en términos de la resolución espacial y temporal, con las condiciones adecuadas, refiriéndonos con esto último, a la calidad de la información y las correcciones o en su defecto minimización de los efectos distorsionantes de la información.

El siguiente problema a resolver antes de implementar masivamente la tecnología satelital a nivel de predios, consiste en encontrar la manera de relacionar los valores de los datos obtenidos por los sensores satelitales, con respecto a lo que ocurre a nivel parcelario. En este contexto, bajo la premisa que las trayectorias temporales de los IV, se asemejan a los patrones de los coeficientes de cultivo, se ha planteado el uso de los IV, para estimar el Coeficiente de Desarrollo (K_c) de cultivos (Heilman et al., 1982). Con esta consideración, algunos autores (Bausch y Neal, 1987 y 1989) utilizaron la estimación de valores de K_c , basados en un IV para hacerlo operativo en la programación del riego.

Debido a las interacciones entre el objeto terrestre y la atmósfera, la información que lleva al sensor instalado en una plataforma satelital, tiene demasiado ruido, por lo que se hace necesario plantear esquemas de corrección o minimización de

éstos efectos. Así, plantear un índice que ocupa dos valores con estas características de ruido, implica necesariamente que se incluyen los dos efectos distorsionantes, por lo que la incertidumbre de la información es aún mayor.

Para minimizar los efectos tanto atmosféricos, como los debidos a la geometría iluminación visión (BRDF, por sus siglas en idioma inglés), se han planteado diferentes esquemas que se pueden encontrar en la literatura; en lo específico, con respecto a la BRDF, el desarrollo que plantearon Bolaños et al. (2007) reviste importancia por la sencillez y fácil implementación para la corrección éstos efectos. Por otro lado, con respecto a la corrección de las distorsiones atmosféricas, existen varios modelos que minimizan su efecto, Palacios (2007), hace una revisión de la mayoría de ellos, cuando plantea un algoritmo de corrección.

El presente trabajo, que consta de cuatro capítulos principales, analiza las potencialidades y empleo de la reflectancia de la vegetación en el rango espectral del IRC, para el monitoreo y estimación de rendimientos. En el primer capítulo, se analizan las relaciones entre el Índice de Área Foliar (IAF), con respecto a dos IV, posteriormente, se analiza la relación que guarda el IAF con respecto a la banda espectral del R y por separado, la relación con respecto a la banda del IRC. Finalmente, es objeto de análisis, la relación entre el IRC y un par de IV.

El segundo capítulo, comienza analizando el desarrollo temporal del IAF en cultivos, medidos en condiciones controladas, posteriormente aborda la relación del IAF y continúa para analizar la relación entre IRC y IAF. Posteriormente, se

centra en analizar el comportamiento temporal de datos obtenidos en una campaña de muestreo sobre una variedad de cultivos de diferente tipo pero con condiciones homogéneas al interior de la parcela con respecto a la reflectancia en la banda del IRC.

El tercer capítulo, se ocupa de realizar un análisis similar a lo presentado al final del segundo capítulo, en las mismas parcelas donde se llevaron a cabo las mediciones de campo, pero utilizando información obtenida con los sensores TM y ETM+. Posteriormente, se analiza la reflectancia temporal del IRC en cultivos no incluidos en la campaña de muestreo, pero con las mismas tomas de imágenes satelitales. Finalmente, analiza el caso de otro tipo de cultivos, con condiciones muy diferentes a las primeras, con altas perturbaciones atmosféricas y fraccionamiento de la tenencia de la tierra. Esta información, sirve para terminar de soportar el uso de la reflectancia del IRC para el monitoreo de cultivos.

El cuarto capítulo, se apoya en los capítulos anteriores, para establecer un mecanismo de monitoreo de la condición de desarrollo de los cultivos bajo dos enfoques: el primero, considera el estado de desarrollo relativo de la parcela realizando para ello, un análisis pixel a pixel de la información y estimando el porcentaje de desarrollo basado en los máximos locales por parcela encontrados en cada imagen; el segundo, considera la tasa de crecimiento observado entre dos fechas de toma de imagen, para conocer las condiciones de crecimiento. Finalmente, se analizan las opciones para proponer un esquema de estimación de rendimientos, basado en la estimación de la producción de biomasa a través de un seguimiento multitemporal.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GENERAL

Modelar el desarrollo de los cultivos a través del uso de información espectral especialmente de la reflectancia en la banda del IRC, para proponer un esquema de monitoreo del estado de desarrollo de los cultivos y estimación de rendimientos.

1.2.2 OBJETIVOS PARTICULARES

Analizar el comportamiento de las variables biofísicas con respecto a los IV y la reflectancia de la banda del IRC.

Mostrar las fortalezas de un esquema de monitoreo de las etapas de desarrollo de los cultivos, basado en la información de la reflectancia en la banda del IRC.

Comprobar uso de la reflectancia del IRC como herramienta para el monitoreo de cultivos utilizando información obtenida con sensores satelitales.

Modelar la producción potencial de un cultivo utilizando la reflectancia en la banda del IRC.

1.3 HIPOTESIS

Bajo el supuesto que a mayor cantidad de vegetación, mayor reflectancia en la banda del IRC, la reflectancia en la banda del IRC, puede ser utilizada confiablemente para el monitoreo del estado de desarrollo de los cultivos y para la estimación del potencial productivo del mismo, siempre que se cuente con un catastro confiable.

1.4 GENERALIDADES

El uso de información espectral para la estimación de biomasa aérea y rendimientos de los cultivos, implica comprender que los IV espectrales, o las reflectancias de bandas específicas, dependen del IAF, fracción de cobertura, y las propiedades ópticas y geométricas del follaje, así como las ópticas del suelo.

Para la estimación de rendimientos en México, algunos autores (Baez *et. al*, 2002; Baez *et al*, 2005; entre otros) han utilizado las relaciones existentes entre los IV, en este caso el NDVI y el Índice de Área foliar medido en campo, complementando la información con resultados obtenidos al correr modelos de simulación de crecimiento y desarrollo de cultivos como el EPIC (Sharpley y Williams, 1990). La primera parte de este enfoque está ampliamente estudiado en la literatura tradicional sobre sensores remotos, mientras que al tener pocos resultados, se optado por la segunda, que consiste en el acoplamiento con modelos de simulación.

En la porción Noroeste del País, algunos autores (Palacios *et. al*, 2010; Palacios *et. al*, 2011) han estado trabajando, con el acoplamiento de información de los sensores TM y ETM+, para la estimación de índices de interés a los productores; esto incluye, IV, Índice de Estrés de Humedad. Posteriormente, relacionaron los valores promedio de los índices y del consumo de agua con los rendimientos de trigo en el Distrito de Riego Río Mayo.

En general, la mayor parte de las estimaciones de rendimientos se hacen a través de la correlación entre variables como Bm, LAI y fPAR e IV de dos bandas. Otro, establecen acoplamientos entre modelos de simulación y sensores remotos a fin de darle mayor certeza a sus predicciones. Sin embargo, los resultados no han sido los esperados hasta ahora, puesto que las investigaciones al respecto continúan. El trabajo aquí presentado, requiere de estudios sobre el rendimiento máximo potencial de cultivos en condiciones óptimas y el desarrollo que éste observa. Para la implementación de lo que aquí se plantea en varios cultivos analizados de manera simultánea, se requiere el contar con un catastro confiable.

1.4 LITERATURA CITADA

Báez-González, A. D.; Chen, P.; Tiscareño-López, M. and Srinivasan, R. R. 2002. Using satellite and field data with crop growth modeling to monitor and estimate corn yield in Mexico. *Crop Sci.* 42: 1943-1949.

Báez-González, A. D.; Kiniry J., R.; Maas S., J.; TiscareñoLópez, M.; Macias C., J.; Mendoza C., J. L.; Richarson, W.; Salinas G., J. and Manjares J., R. 2005. Large-area maize yield forecasting using leaf area index based yield model. *Agron. J.* 97:418-425.

Bausch, W. C. y Neale, C. M.U. 1987. Crop coefficients derived from reflected canopy radiation: A concept. *Transactions of ASAE*, 30:703-709.

Bausch, W. C. y Neale, C. M.U. 1989. Spectral inputs improve corn crop coefficients and irrigation scheduling. *Transactions of ASAE*, 46:1901-1908.

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.

Heilman, J. L., W. E. Heilman y D. G. Moore. 1982. Evaluating the crop coefficient using spectral reflectance. *Agronomy Journal*, 74:967-971

Palacios, L. A. 2007. Corrector Atmosférico en Imágenes Landsat. Tesis Doctoral. Colegio de Postgraduados. 92 pp.

Palacios V. Enrique, J. E. Palacios y L. A. Palacios. 2011. Agricultura de Riego Asistida con Satélites. *Tecnología y Ciencias del Agua*. 2011(2):69-81.

Palacios V. Enrique, L. Palacios, J. C. Rodríguez y J.S. Palacios. 2010. Earth Observation as a Support to Improve Water Use in Irrigated Agriculture. Journal of Agriculture Science and Technology. 2010(6):1-9.

Sharpley, A.N. y Williams, J.R. (Eds.), 1990, EPIC – Erosion/Productivity Impact Calculator, 1. Model documentation, USDA Technical Bulletin No. 1768

Tucker, C.J. 1979. Red and photographics infrared linear combination for monitoring vegetation. Remote Sensing of Environment 8:127-150.

CAPÍTULO 2. BASES PARA EL ANÁLISIS ESPECTRAL DEL DESARROLLO DE CULTIVOS

RESUMEN

El modelaje del crecimiento de cultivos, obliga por principio de cuentas, a conocer el comportamiento de las variables biofísicas en el tiempo. Después de conocer el funcionamiento de las variables, se plantea escenarios para conocer el comportamiento anticipado. Existe gran cantidad de estudios sobre las relaciones de los IV que trabajan en dos ventanas del espectro electromagnético con respecto a las variables biofísicas. Este trabajo exploró el potencial del uso de un índice de una sola banda, el IRC, como primer paso para el modelación de cultivos. Al analizar el comportamiento del IRC con respecto a los IV, se determinó que se puede usar confiablemente en sustitución éste.

Palabras clave: Modelación de cultivos, Índice de Vegetación, Infrarrojo cercano, Relación IAF vs IRC

2. 1 INTRODUCCIÓN

Mucho se ha escrito con respecto a la modelación del crecimiento de cultivos a través del uso de los sensores remotos. Hasta ahora, la mayor parte de los desarrollo se han enfocado a la obtención de indicadores de la cantidad de vegetación presente en un medio, comúnmente conocidos como Índices de

Vegetación (IV). Así, uno de los más ampliamente usados, es el Índice de Vegetación de Diferencias Normalizadas (NDVI) (Tucker, 1979). Sin embargo, a pesar de ser utilizado en diferentes estudios, al grado de considerarse como un referente en todo estudio que involucre sensores remotos y su relación con la cantidad de vegetación, diversos trabajos (Verstraete and Pinty, 1996; Paz *et al.*, 2011, Romero *et al.*, 2009, Gilabert *et al.*, 2001; Paz *et al.*, 2007) ha puesto en entredicho el uso de este índice, toda vez que de acuerdo con estos autores, tiene problemas de saturación de la información a etapas tempranas del desarrollo de la vegetación y por si fuera poco, también tiene problemas al dejar de considerar la reflectancia del suelo en etapas iniciales, dejando a ésta a segundo término.

Algunos trabajos (Huete, 1988; Paz *et al.*, 2011; Paz *et al.*, 2007, entre otros), han tratado de superar estas deficiencias, la mayoría de ellos, preocupados por la línea del suelo y la modelación del índice de área foliar (IAF) como indicador de desarrollo de cultivos, generalmente asociados a un índice de vegetación.

La mayor parte de esto estudios, se han realizado partir de información espectral tomada en experimentos, donde los efectos atmosféricos, prácticamente son despreciables. Por ejemplo, los desarrollos asociados al IVIS (Paz *et al.*, 2011), fueron a partir de simulaciones radiativas sin atmósfera y probados con mediciones radiométricas de campo, en días soleados. De manera similar, el SAVI (Huete, 1988) fue obtenido a través de intensas mediciones en campo de reflectancia e índice de área foliar, en un clima árido con condiciones controladas de cultivos e igualmente sobre mediciones radiométricas de campo a muy baja

altura, donde al igual que en el caso anteriormente mencionado, los efectos atmosféricos, revisten poca importancia.

Tradicionalmente, los IV han sido relacionados empíricamente con la Bm, obteniéndose resultados más o menos buenos (Tucker *et al.*, 1981; Calera *et al.*, 2004). Este tipo de enfoque presume una relación fija y el supuesto de medios física y radiativamente homogéneos

Generalmente, la modelación del crecimiento de los cultivos, utilizando sensores remotos, se lleva a cabo utilizando información en la banda del Rojo (R) y del Infrarrojo Cercano (IRC). En este sentido, Paz *et al.* (2005), realizan este análisis en el espacio del R e IRC utilizando simulaciones radiativas de un cultivo, donde muestran los comportamientos de diferentes condiciones de suelo e Índice de Área Foliar (IAF) en dicho espacio. De acuerdo con las aseveraciones de Huete (1988) la cantidad de vegetación en un píxel es independiente de las propiedades ópticas del suelo o de sus cambios; por ello, el diseño de los índices de vegetación se ha basado en la minimización del efecto del suelo.

Sin embargo, en la mayor parte de los desarrollos hasta aquí citados con relación a los IV, realizados en condiciones controladas, la reflectancia del R, tiene una marcada influencia sobre los resultados obtenidos. Así, ligeras variaciones en el R, dan como resultado, saltos abruptos en la modelación del desarrollo de la vegetación, este efecto, es mucho más notorio cuando se trata de aproximar curvas de crecimiento en las zonas no-desérticas, donde la exagerada cobertura de nubosidad y bruma, dificultan contar con imágenes totalmente libres de nubes;

sin embargo, en el monitoreo del estado de desarrollo de cultivos, es especialmente crítico, maximizar el uso de la información, por lo que los efectos de estos problemas, se ven exagerados.

2.2 MATERIALES Y MÉTODOS

En este trabajo, se presentan una serie de análisis de información de reflectancia espectral del experimento en cultivo de maíz, *Zea mays L.*, (Bausch, 1993), medidos en dos tipos de suelo, claro y oscuro, en condición totalmente húmedo y totalmente seco, al menos en la parte superficial.

Posteriormente, se utilizan datos mediciones de diferentes coberturas de AIF de algodón *Gossypium hirsutum L.*, (Huete *et al.*, 1985) para valores que van de 0 condición de suelo desnudo a valores de IAF de 3.6.

En ambos casos se analiza el comportamiento de la reflectancia de la banda del IRC comparado con valores de un IV. Para el uso del IV IVIS, los resultados se obtuvieron considerando $a_s = 0$, $b_s = 1$ y suponiendo un IRC^∞ de 65%

2.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 2.1, muestra la relación existente entre el NDVI, multiplicado por 100 y el desarrollo del IAF. Se observa claramente que con valores de IAF mayores de 2, éste índice de vegetación, deja de tener sensibilidad, por ello, cuando se trate de coberturas mayores de éste valor, deberá evaluarse seriamente su uso con fines de monitoreo de los cultivos.

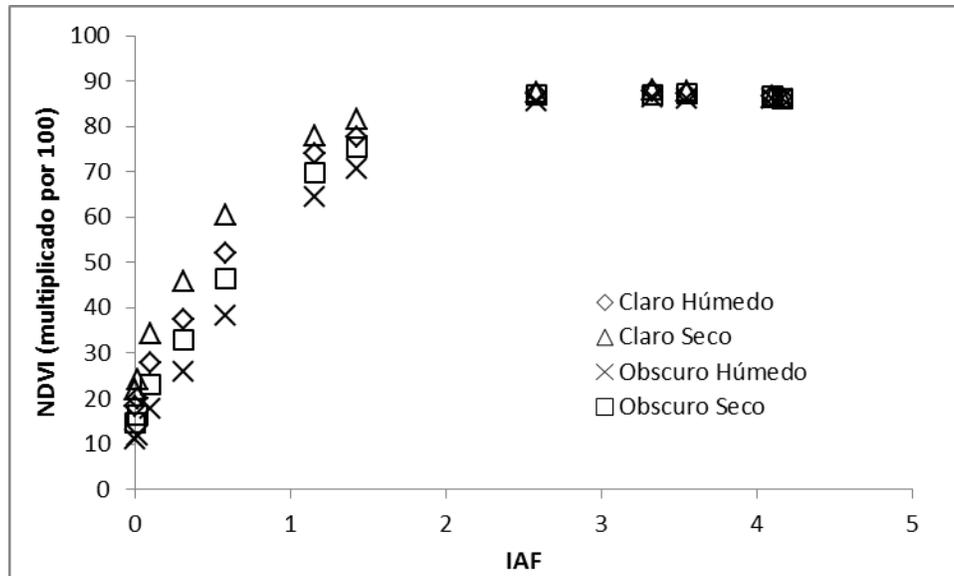


Figura 2.1. Relación entre IAF y NDVI

De lo mostrado en la Figura 2.1, dejando de lado las implicaciones relativas a los ruidos atmosféricos y la reflectancia de los suelos, el NDVI, puede ser útil con valores menores o iguales a 2, ésta condición, es posible que se presente sobre todo cuando se trata de información proveniente de sensores a bordo de plataformas satelitales, sobre cultivos, que no alcanzan la totalidad de cobertura del suelo al llegar a la madurez fisiológica.

Por otro lado, la Figura 2.2, muestra los resultados obtenidos de graficar el IAF y el IVIS, es importante resaltar en este punto, que sus autores aclaran que éste IV, minimiza, mas no elimina el efecto del suelo. Resulta confuso, que los diferentes tipos de suelos y contenidos de humedad, aparentemente tengan un valor de reflectancia muy cercanos entre sí, sin embargo, a medida que se da el desarrollo de la vegetación, el IV muestra sensibilidad a diferentes contenidos de IAF, hasta valores mayores de 4, donde tiende a perder sensibilidad éste índice.

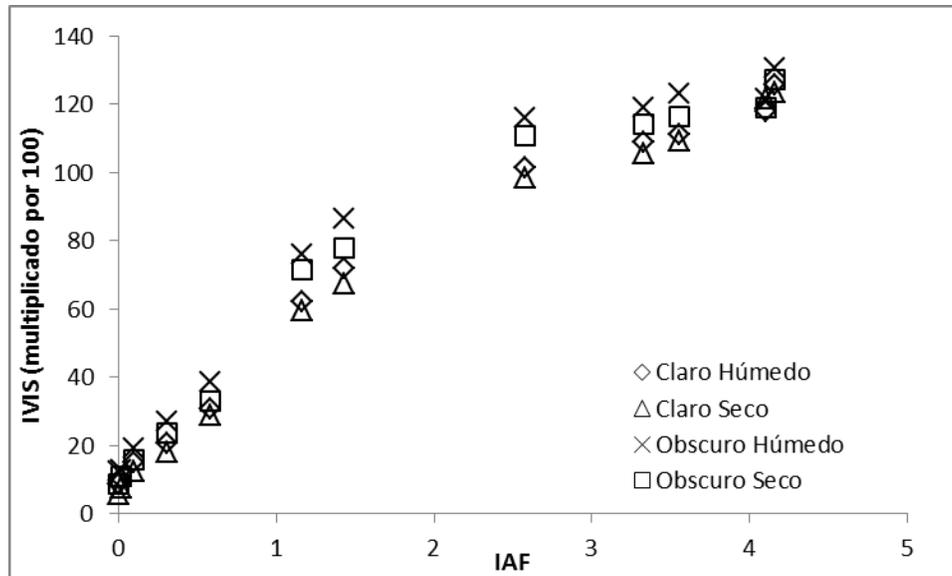


Figura 2.2. Relación entre IAF e IVIS

Analizando por separado los componente del IV, en la Figura 2.3, se puede apreciar el comportamiento de la reflectancia del R, con respecto al IAF, mientras que la Figura 2.4, muestra de manera análoga, la reflectancia del IRC con respecto al IAF.

La banda del R, tiene un comportamiento descendente independientemente del tipo de suelo, hasta valores de IAF de 2, cuando comienza a tener valores constantes y posteriormente, después de valores de IAF de 4, se observa un muy ligero incremento en el valor de la reflectancia. Por otro lado, con respecto al IRC, a medida que incrementa el IAF, se ve incrementada la reflectancia. Para valores de IAF mayores de 2, los incrementos aunque menores comparados con los iniciales, siguen presentándose.

Un análisis de manera conjunta entre la información presentada en las Figura 2.1 y Figura 2.3, permite observar una marcada influencia de la reflectancia del R

sobre el NDVI, de tal manera que en diferente escala, pero con comportamiento similar, la falta de sensibilidad del NDVI, se debe principalmente a la tendencia a la saturación de la reflectancia del R con respecto al IAF.

En general, analizando el par de bandas R, IRC, los suelos claros, tienen menor reflectancia que los oscuros, mientras que el contenido de humedad, se manifiesta con valores mayores de reflectancia con respecto a los suelos secos.

De las observaciones anotadas en las Figura 2.3 y Figura 2.4, es posible destacar el efecto del suelo sobre las reflectancias en las bandas del R e IRC. En el caso del R, para valores de IAF mayores de 2, el suelo deja de representar un factor de ruido, pero al mismo tiempo, se observa saturación de la banda, por lo cual, también deja de ser útil para fines de monitoreo del estado de desarrollo del cultivo. Por otro lado, para el caso del IRC, con valores de IAF mayores de 2, se estabiliza la información ya que se alcanza cobertura del suelo, por lo que su efecto puede considerarse despreciable, además, se observa que mantiene sensibilidad hasta valores de IAF mayores de 4, por lo cual podría plantearse como un elemento a considerar para el monitoreo de la cantidad de IAF.

Procediendo de manera similar al análisis del R e IVIS, es posible analizar conjuntamente las Figura 2.2 y Figura 2.4, donde, se observa que el comportamiento del IVIS, está más influenciado por la reflectancia del IRC, cuando el IRC es mayor de 1. En general, el IVIS, tiene un patrón tal que sigue la curva del IRC, toda vez, que a medida que crece el IAF, el R, deja de tener influencia sobre el resultado final.

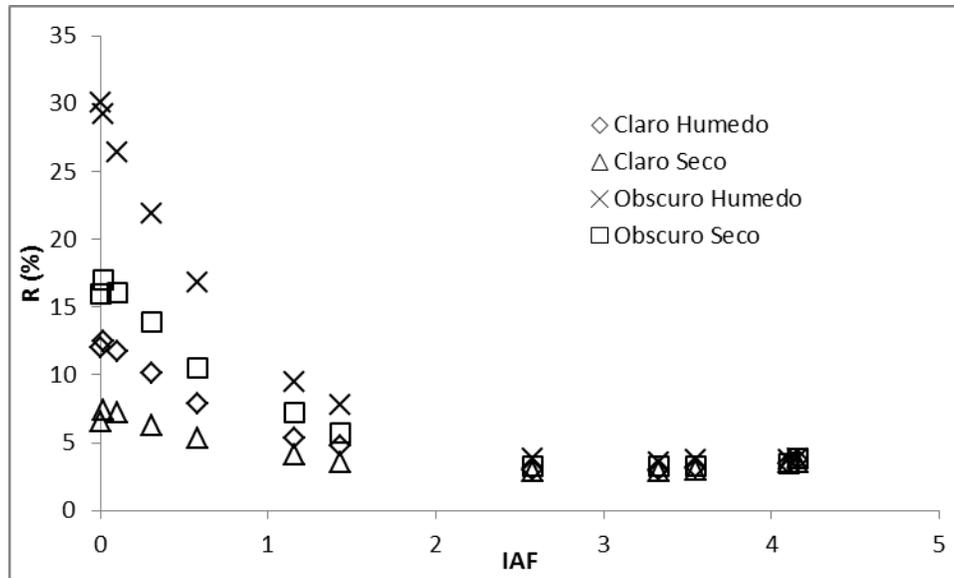


Figura 2.3. Relación entre el IAF y la reflectancia en el R

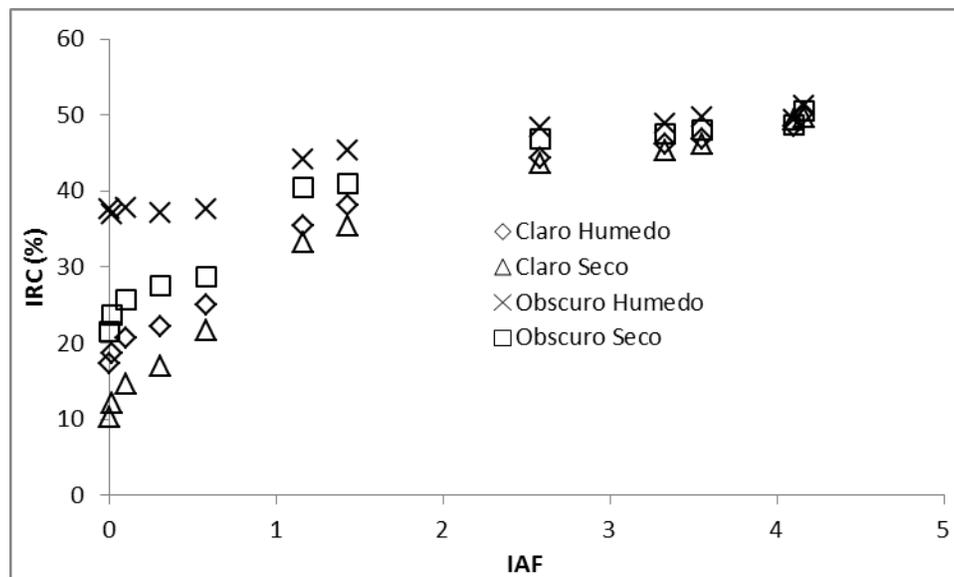


Figura 2.4. Relación entre el IAF y la Reflectancia en el IRC

La Figura 2.5, muestra la relación que existe entre la reflectancia de la vegetación en la banda del IRC y el IVIS a lo que en lo sucesivo llamaremos, espacio IRC-

IVIS, medido en diferentes tipos de suelo. En suelos claros, se observan comportamientos entre estos conjuntos de datos, que pueden aproximarse razonablemente a través de una línea recta. Sin embargo, en el caso del suelo oscuro húmedo, el comportamiento lineal, no es claro a primera vista, mientras que el mismo suelo analizado en este mismo espacio, puede ser aproximado de manera razonable a través de una línea recta.

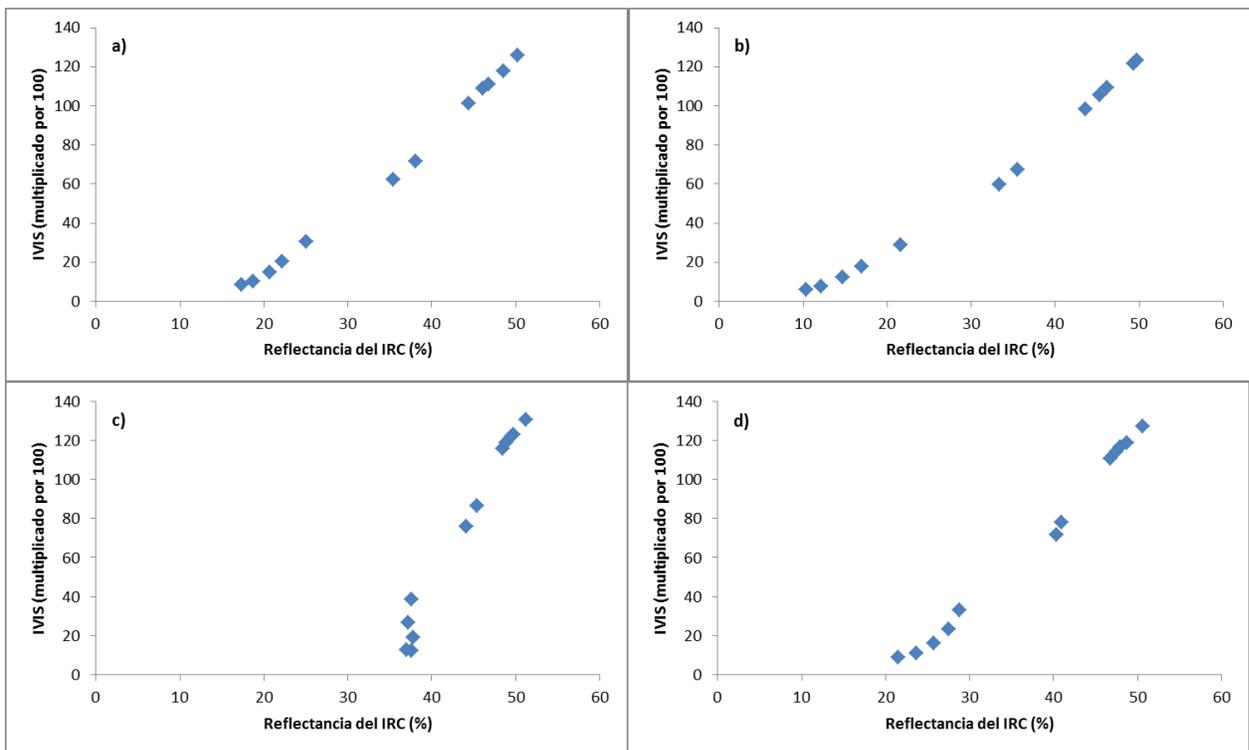


Figura 2.5. Relación entre la Reflectancia del IRC y el IVIS. a) Suelo Claro Húmedo, b) Suelo Claro Seco, c) Suelo Oscuro Húmedo y d) Suelo Oscuro Seco

De lo mostrado en la Figura 2.5, exceptuando el caso de la Figura 2.5C, en los demás casos, pueden establecerse relaciones lineales entre la reflectancia del IRC y el IVIS, de tal manera que permita conocer el estado de desarrollo de

cultivos, a través del conocimiento de la reflectancia en el IRC, y poder relacionarlo directamente con el IAF.

Continuando con el análisis presentado en la Figura 2.5, la Figura 2.6, muestra los resultados al realizar ajustes entre la reflectancia del IRC y el IVIS, cuyas ecuaciones y grado de ajuste de los datos, se muestran en la misma figura. Los resultados pueden considerarse razonablemente aceptables para los casos de suelos claros sin importar el contenido de humedad.

Para los casos de suelos oscuros, a pesar de que en general es posible encontrar buenos ajustes, el suelo oscuro húmedo, tiene un comportamiento que podría considerarse como anormal, sin embargo, para el caso de suelo oscuro seco, el comportamiento es más parecido al de los suelos claros.

Lo anterior, permite establecer las bases para utilizar la información de la reflectancia en la banda del IRC, como herramienta de monitoreo del estado de desarrollo de los cultivos. Con el fin de precisar los resultados, la Figura 2.7, muestra los resultados obtenidos al tomar en cuenta solo las reflectancias y valores de índice de vegetación, cuando el IAF, es mayor de 0.31.

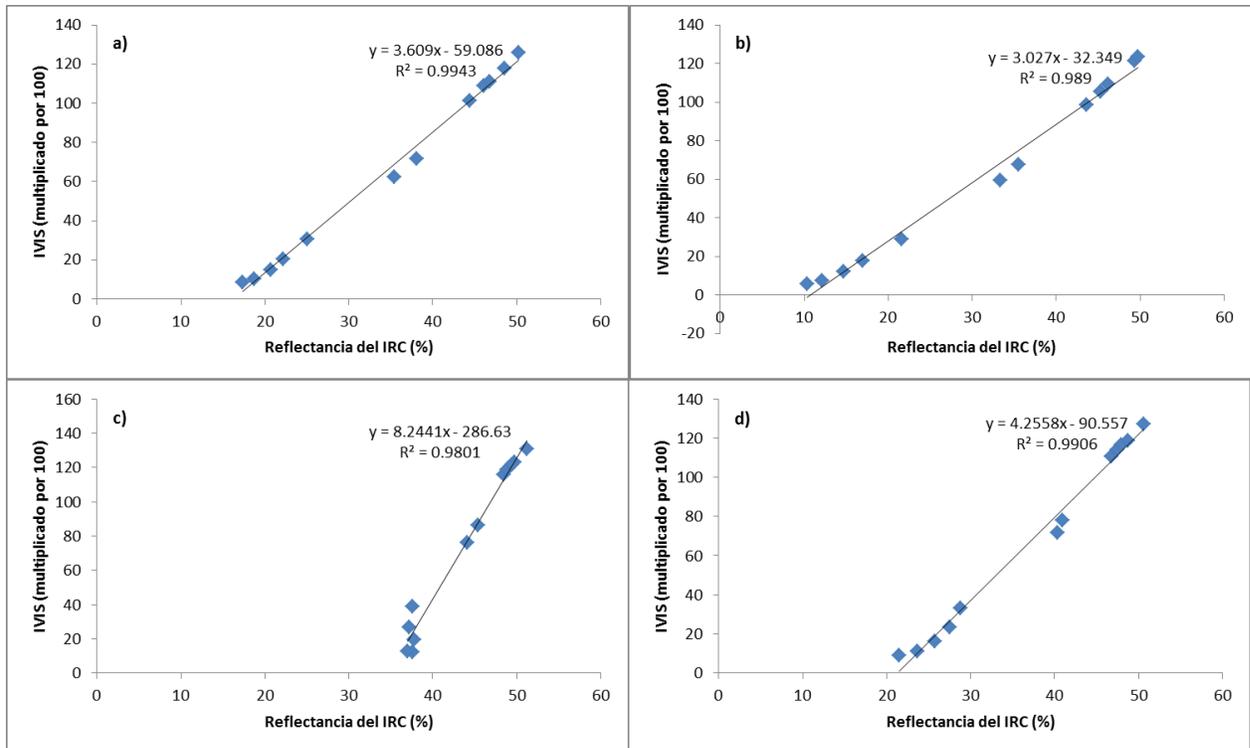


Figura 2.6. Ajustes lineales entre IRC e IVIS. a) Suelo Claro Húmedo, b) Suelo Claro Seco, c) Suelo Oscuro Húmedo y d) Suelo Oscuro Seco

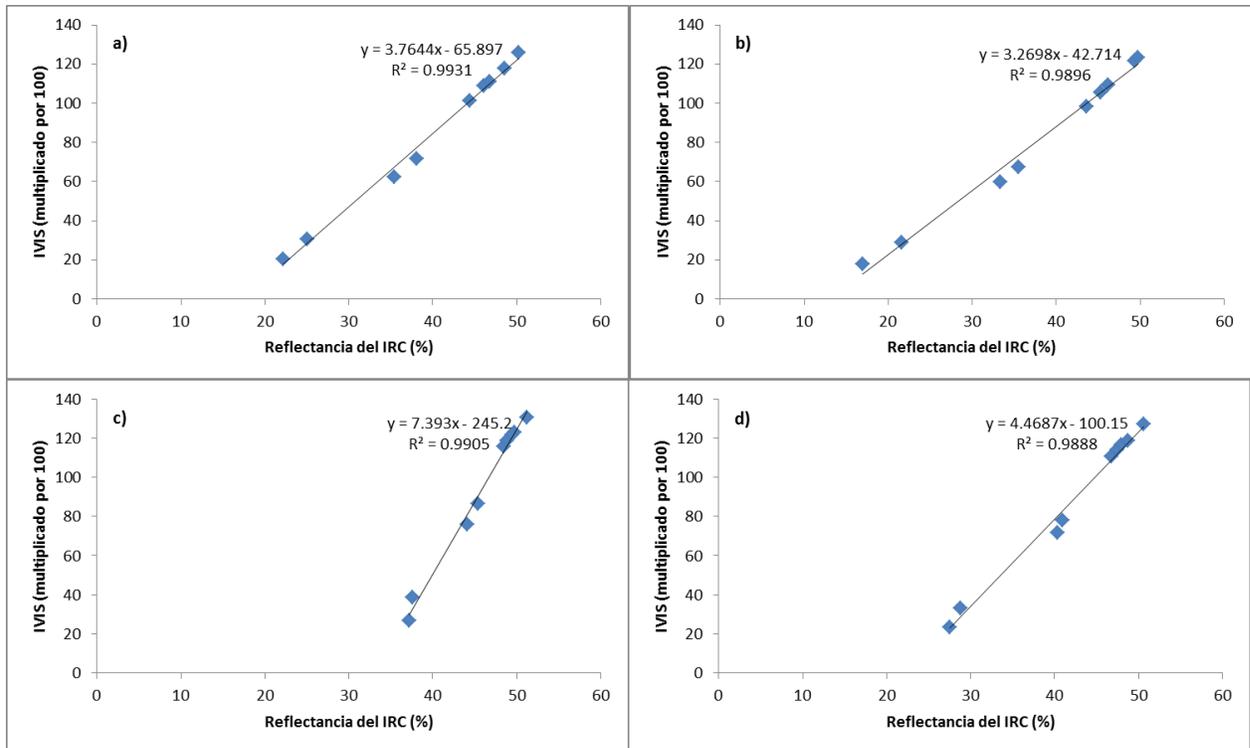


Figura 2.7. Ajustes lineales entre IRC e IVIS, con IAF mayor de 0.31. a) Suelo Claro Húmedo, b) Suelo Claro Seco, c) Suelo Oscuro Húmedo y d) Suelo Oscuro Seco

Después de analizar los datos del cultivo de maíz, en la Figura 2.8, se puede observar en el mismo espacio IRC-IVIS, los resultados para diferentes coberturas de IAF que van de 0, suelo desnudo a valores de IAF de 3.6, para el cultivo de algodón, *Gossypium hirsutum* L., (Huete *et al.*, 1985). En este caso, se muestran mediciones sobre cuatro tipos diferentes de suelo totalmente secos; las mediciones en suelo húmedo, no se muestran, ya que al haber pocos datos, de tres a cuatro por lo general, es fácil inducir un comportamiento lineal, y no describen totalmente el fenómeno que interesa mostrar para fines de extrapolación.

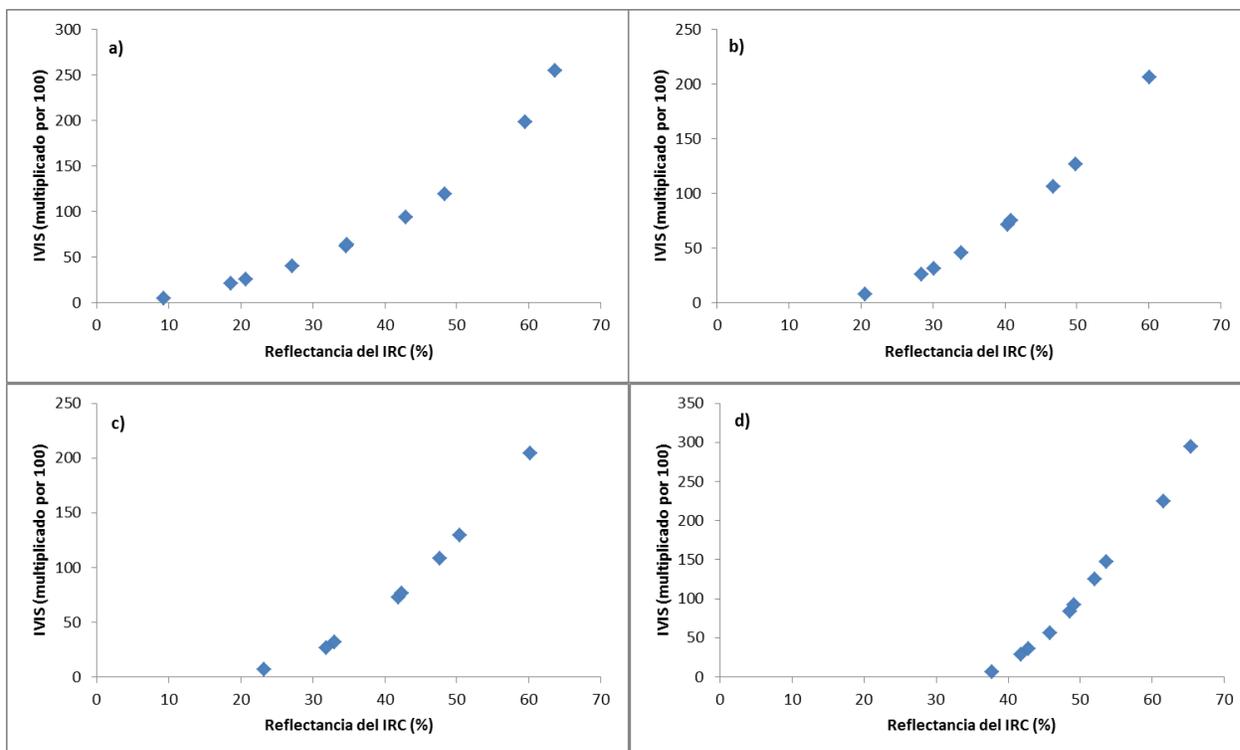


Figura 2.8. Relación entre IRC e IVIS, para el cultivo de algodón. a) Suelo seco 1, b) Suelo seco 2, c) Suelo seco 3 y d) Suelo seco 4

Procediendo de manera similar al análisis realizado para el caso de maíz, la Figura 2.9, muestra los resultados de realizar un ajuste lineal entre IRC e IVIS, utilizando la totalidad de valores reportados de IAF. Los datos mostrados por la Figura 2.9a, parecen tener inconsistencias en términos de los ajustes que aquí se buscan, ya que no parecen obedecer a un comportamiento lineal entre la reflectancia del IRC y los valores de IVIS, más bien, podría prestarse este conjunto de información a un ajuste polinomial.

Por otro lado, la Figura 2.10, muestra los resultados de los ajustes, tomando en cuenta la variación del IAF. Exceptuando el caso del Suelo Seco 1, en el resto de los casos, se tomaron valores de reflectancia del IRC e IVIS, para todos los

valores de IAF mayores de 0.5. En el caso del Suelo Seco 1, los datos aquí mostrados, corresponden a valores de IAF a partir de 0.7 para lograr el ajuste reportado.

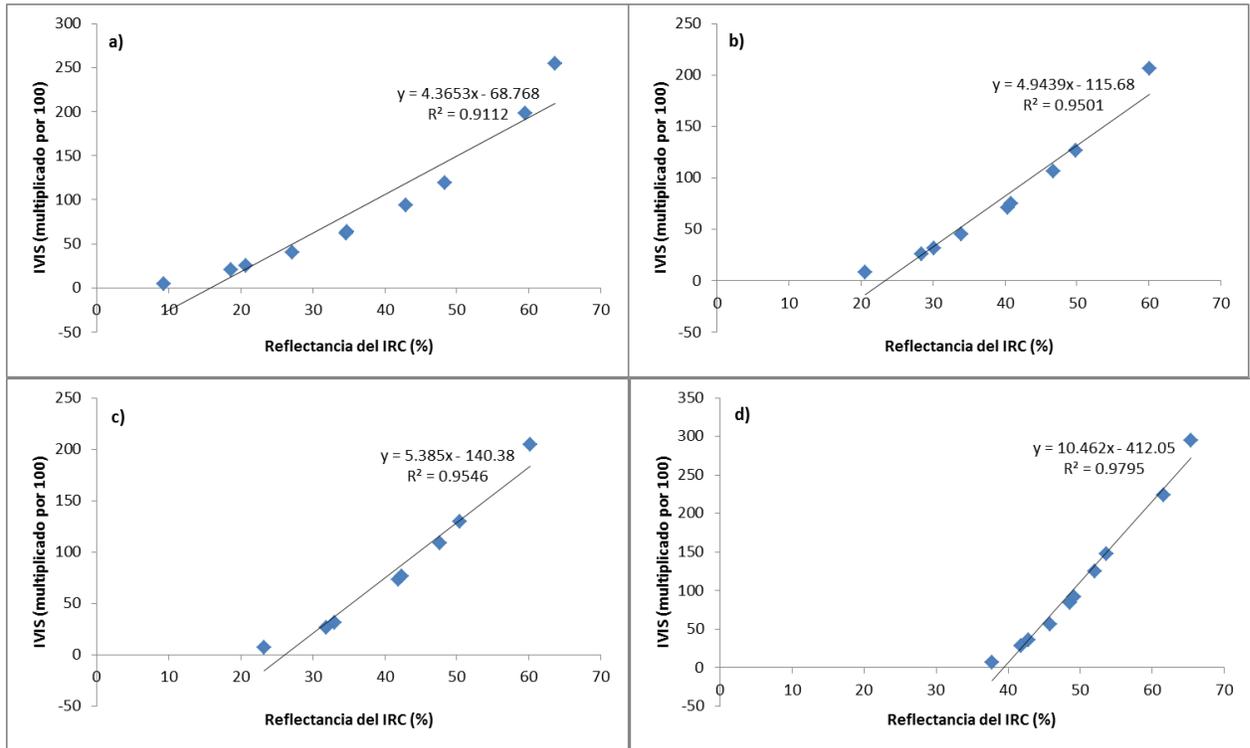


Figura 2.9. Ajustes lineales del IRC e IVIS, en todos los valores de IAF en algodón.

a) Suelo seco 1, b) Suelo seco 2, c) Suelo seco 3 y d) Suelo seco 4

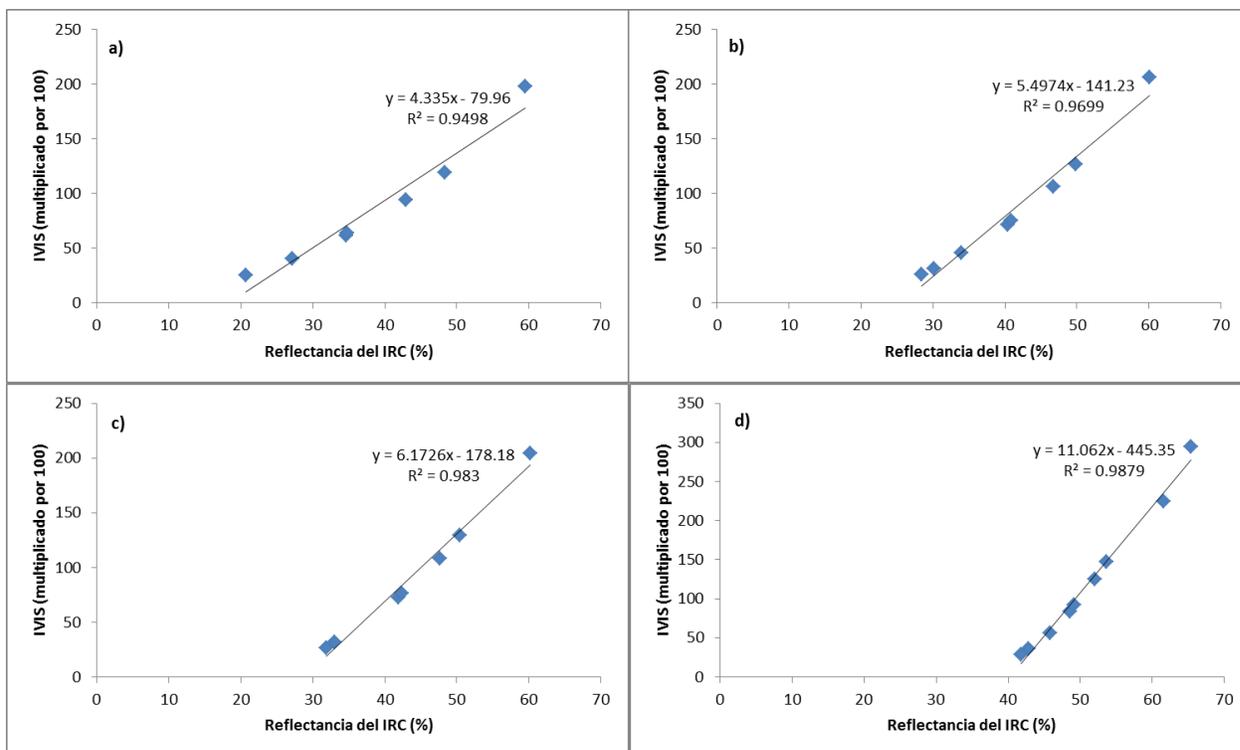


Figura 2.10. Ajustes lineales del IRC e IVIS, usando valores iniciales de IAF de algodón mayores de 0. a) Suelo seco 1, b) Suelo seco 2, c) Suelo seco 3 y d) Suelo seco 4

Los casos discutidos aquí con anterioridad, han sido ajustados por modelos lineales, por la facilidad de implementación e interpretación para fines prácticos. Sin embargo, es posible realizar otro tipo de ajustes, por ejemplo, lo exponenciales o bien plantear otros ajuste por etapas plenamente identificadas. Por lo pronto lo hasta aquí mostrados sirve para ilustrar el uso de la reflectancia del IRC con fines de monitoreo del estado actual de desarrollo de los cultivos, en ausencia, por conveniencia o bien en sustitución del uso de los IV.

2.4 CONCLUSIONES

En este apartado, mediante un análisis de reflectancia de dos cultivos diferentes, se relacionó un IV con la reflectancia de la banda del IRC, para mostrar el posible uso de ésta como elemento de monitoreo del estado de desarrollo de cultivos.

Al tener relaciones lineales de alto ajuste ($R^2 > 0.9$) entre IRC e IVIS, se puede utilizar la reflectancia del IRC de forma robusta en el monitoreo de cultivos, a partir de valores de IAF cercanos a uno, que dependiendo del tipo de cultivo, esto podría significar, la salida de la fase exponencial y entrada a la fase lineal del desarrollo.

En análisis multitemporal del desarrollo de cultivos, resulta conveniente el uso de la reflectancia del IRC, por sobre el IVIS, al tener por descontado la influencia de la reflectancia de la banda del R, incluida en la mayoría de los IV, que presentan mayor afectación por las condiciones atmosféricas.

2.5 LITERATURA CITADA

Bausch, W.C. 1993. Soil background effects on reflectance-based crop coefficients for corn. *Remote Sensing of Environment* 46: 213-222.

Calera, A., J. Gonzalez and J. Meliá. 2004. Monitoring barley and corn growth from remote sensing data at field scale. *Int. J. Remote Sens.* 25:97-109

Gilabert, M.A., J. González, F.J. García, and J. Meliá. 2002. A generalized soil-adjusted vegetation index. *Remote Sensing of Environment* 82:303-310.

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.

Paz, F. M. Reyes y E. Medrano. 2011. Diseño de Índices Espectrales de la vegetación Usando Curvas Iso-Suelo. *Agrociencia*.

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., 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.

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.

Tucker, C.J. 1979. Red and photographics 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.

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS ESPECTRAL MULTITEMPORAL DEL DESARROLLO DE CULTIVOS

RESUMEN

EL interés principal de la modelación, es conocer con relativa anticipación el comportamiento futuro de seguir con las tendencias actuales. En este trabajo se estudió el comportamiento multitemporal de algunas variables biofísicas. Después de comprobar la relación lineal entre IAF y Bm con los datos de dos experimentos, se procedió de manera similar, para finalmente, mostrar la relación entre IAF y reflectancia en la banda del Infrarrojo Cercano, utilizando datos experimentales del Proyecto PLEIADes-COLPOS. Posteriormente, utilizando los mismos datos experimentales, se mostró el uso de la reflectancia de la banda del IRC, para conocer las diferentes etapas de desarrollo de cultivos mediante un análisis multitemporal.

Palabras clave: Modelación, Desarrollo de cultivos, Etapas de desarrollo, Infrarrojo cercano

3.1 INTRODUCCIÓN

La determinación del estado de crecimiento de los cultivos y las perspectivas de desarrollo de los mismos, siempre ha sido una de las principales interrogantes a responder con el uso de los sensores remotos. Generalmente, se parte de la

estimación de la Biomasa (Bm) como indicador del estado de desarrollo de cultivos. En la mayoría de los casos, el cálculo de la biomasa, en los casos en donde no se puede medir directamente, se ha realizado utilizando modelos biofísicos (Stockle *et al.*, 2003). En la mayor parte de los trabajos publicados actualmente, se asume que hay una relación directa entre los Índices de Vegetación (IV), obtenidos a través de relacionar la reflectancia de la banda del Rojo (R) y del Infrarrojo Cercano (IRC); y el estado de desarrollo de los cultivos a través del conocimiento de la cantidad de Bm. En este sentido, algunos autores (Tucker *et al.*, 1981; Calera *et al.*, 2004, entre otros) reportan haberla relacionado aunque empíricamente, con resultados muy satisfactorios con los IV. Así, este enfoque presume de poder conocer el estado de desarrollo de los cultivos y las condiciones de éste, a través del conocimiento de los valores de IV calculados con información espectral obtenidos por plataformas satelitales.

En general, la mayoría de los cultivos cíclicos y aún algunos anuales, sobre todo los caducifolios, presentan un patrón de comportamiento que se puede aproximar a través del modelo expo-lineal de Goudriaan y Van Laar (1994), el cual permite modelar las dos fases (exponencial y lineal) del crecimiento de la vegetación en el tiempo, donde la variable V , representa la conjugación de los efectos de la Biomasa (Bm), Índice de Área Foliar (IAF), fracción de cobertura de la vegetación (f_v) y la distribución angular de las hojas (h).

Derivado de la aplicación del modelo expo-lineal, la Figura 3.1, muestra el comportamiento típico de un cultivo cíclico, donde se pueden diferenciar las dos

fases principales de desarrollo de la etapa vegetativa: el crecimiento exponencial y el crecimiento lineal.

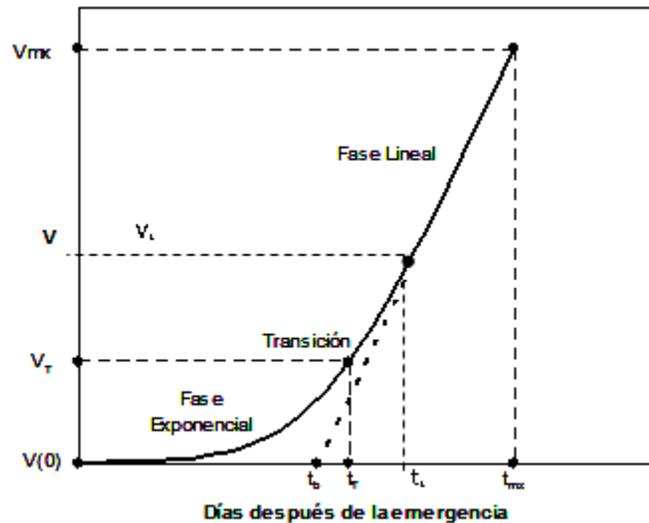


Figura 3.1. Modelo expo-lineal del desarrollo general de cultivos cíclicos

Cuando se trata de relacionar mediciones espectrales obtenidas por sensores remotos, ya sea a nivel terrestre o aquellos que viajan a bordo de plataforma satelitales, es necesario tomar en cuenta en todo momento, que las reflectancias medidas, tienen integrado el efecto del IAF, la f_v , las propiedades ópticas de los fitoelementos y el suelo principalmente (Ross, 1981).

A pesar de que toda medición radiométrica, de origen, tiene poco que ver con la biomasa, ésta se puede estimar en forma a través del establecimiento de relaciones con respecto al IAF y f_v . Usando la hipótesis de relación lineal, entre la B_m y el IAF, se pueden hacer estimaciones de Biomasa (Goudriaan y Monteith, 1990), sin embargo, estas relaciones presentan problemas de ajuste cuando se trata de cultivos sometidos a algún tipo de estrés severo que afecte su crecimiento

y desarrollo; en estas condiciones, las plantas incrementan las reservas energéticas en la parte subterránea, dejando a segundo término la relación entre biomasa y el IAF (Stockle et al., 2003), presumiblemente, esto ocurre en condiciones donde la producción potencial de acuerdo a la fase de desarrollo, podría perderse o en el mejor de los casos verse severamente afectada, en estos casos, los daños son visibles desde antes de que ocurra el desenlace fatal.

En este capítulo, se analizan las diferentes fases del desarrollo de cultivos establecidos en campo, a partir de mediciones radiométricas llevadas a cabo; así, se presenta el uso de la reflectancia en la banda del Infrarrojo Cercano, como elemento de análisis y seguimiento de cultivos, para determinar el estado actual de desarrollo.

3.2 MATERIALES Y MÉTODOS

Para analizar la validez del uso de la reflectancia en la banda del IRC como elemento para el monitoreo de cultivos, se analizaron los datos temporales del experimento de algodón *Gossypium hirsutum* L., con diferentes fondos de suelo (Huete et al., 1985) y de maíz *Zea mays* L., (Bausch, 1993), con diseño similar al del cultivo de algodón, haciendo variaciones del tipo de suelo y contenido de humedad.

Después de establecidas las condiciones de trabajo multitemporal de la reflectancia del IRC, para uso con fines de monitoreo, se probaron las ideas utilizando datos procedentes de una campaña experimental de mediciones biofísicas en cultivos de sorgo, cártamo, frijol, maíz y trigo, que fueron sembradas

en condiciones muy similares entre sí al interior de la parcela a la que se denominó parcela homogénea, una parcela por cultivo.

3.2.1. Ubicación del área de estudio

En el marco del Proyecto COLPOS-PLEIADes durante la primera mitad del año 2008 (febrero a mayo) se realizó una campaña de mediciones experimentales en el Distrito de Riego 041 “Valle del Yaqui” en Sonora, México, donde se midieron variables biofísicas de la vegetación y se tomaron datos de reflectancias en cultivos de sorgo, cártamo, frijol, maíz y trigo.

El Distrito de Riego 041, Río Yaqui, se ubica en el valle del Yaqui, al sur del estado de Sonora, México, con una superficie de 230,000 ha, entre las coordenadas 27°10' y 27°50' latitud norte y 109°55' y 110°36' longitud oeste. La zona de estudio contempla una superficie de 1,600 ha (bloque de 4 km x 4 km) y se localiza entre las coordenadas 27°14'24” y 27°16'48” latitud norte y 109°52'12” y 109°54'36” longitud oeste.

3.2.2. Mediciones realizadas

Para las mediciones realizadas en el Valle del Yaqui se utilizaron parcelas homogéneas (PH), Cuadro 3.1, concepto que se refiere estrictamente a parcelas con un mismo cultivo, misma densidad de siembra, misma separación y dirección de los surcos y misma fecha de siembra (parcelas que sólo difieren en las fechas de siembra se consideraron como diferentes). Los cultivos en cuestión, fueron, frijol (*Phaseolus vulgaris*, L.), Sorgo (*Sorghum bicolor*, Moench), Garbanzo (*Cicer arietinum*, L), Cártamo (*Carthamus tinctorius*, L.) y Trigo (*Triticum spec*, L).

Cuadro 3.1. Detalle de las condiciones de medición de la Campaña de Muestreo Yaqui 2008

Parcela Homogénea	Cultivo	Separación de surcos (m)	Altura del radiómetro (m)	Diámetro del área de medición del radiómetro (m)	No. de hileras dentro del área de medición
PH1	Frijol	1.60	3.20	1.60	1
PH3	Sorgo	0.80	3.20	1.60	2
PH4	Garbanzo	0.80	3.20	1.60	2
PH5	Cártamo	0.80	3.20	1.60	2
PH6	Trigo	1.00	2.00	1.00	1

Para realizar las mediciones se seleccionaron en cada PH dos líneas de plantas representativas del cultivo. Estas líneas se denominaron L1 y L2 y en cada una de ellas se establecieron cinco puntos de muestreo (P1-P5), a los cuales se les dio seguimiento semanal durante el desarrollo del cultivo.

3.2.3 Procesamiento de la información

Debido a que las mediciones se realizaron con condiciones angulares diferentes en términos de la geometría de iluminación-visión, se utilizó un modelo BRDF, para estandarizar las mediciones (Bolaños et al., 2008; Romero et al., 2009), adaptado:

$$\begin{aligned}
 \chi &= 90 - \theta_v + \theta_s \\
 Rn &= \ln(R) \cos(\chi) \\
 \chi &= 90 + gRn
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

donde θ_v es el ángulo cenital de visión y θ_s es el de iluminación o solar. R se refiere a reflectancias en cualquier banda espectral.

En los análisis que se presentan a continuación, la estandarización fue realizada usando un valor de $\theta_s = 30^\circ$ y $\theta_v = 0^\circ$. Después de la estandarización, se procedió a la convolución de las bandas a fin de obtener una banda virtual equivalente a las bandas del sensor Thematic Mapper (TM). Debido a los intereses en la modelación de la vegetación, sólo se realizaron las convoluciones para las bandas del R e IRC. De donde en los análisis sucesivos, se presentan los valores correspondientes a la reflectancia en la banda del IRC principalmente, a menos que se considere necesario mostrar un análisis utilizando la banda del R.

3.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Este apartado se divide en dos partes. En la primera parte se analizan las bases de datos de experimentos de maíz y algodón, relacionando los valores de IRC con valores de IAF, ambos medidos en experimentos.

En la segunda parte, se toma la información de la Campaña de Muestreo en el Valle del Yaqui y se analiza el comportamiento multi-temporal del IRC. Posteriormente los valores encontrados de reflectancia en la banda del IRC son relacionados con las etapas de desarrollo de los cultivos, de acuerdo con la memoria del experimento.

3.3.1 Análisis de la reflectancia en la banda del IRC y los valores de IAF en maíz y algodón

Con los datos experimentales de maíz y algodón, se procedió a ver el comportamiento temporal del IAF, así, la Figura 3.2, muestra el desarrollo temporal de cultivos cíclicos con respecto al IAF. La Figura 3.2a, con valores de IAF de 0 a 3.6 del experimento del cultivo de algodón; por otro lado, la Figura 3.2b, se refiere a valores de IAF de 0 a 4.16 obtenidos experimentalmente, del cultivo de maíz; en ambos casos, es posible apreciar la evolución temporal de los valores obtenidos de IAF.

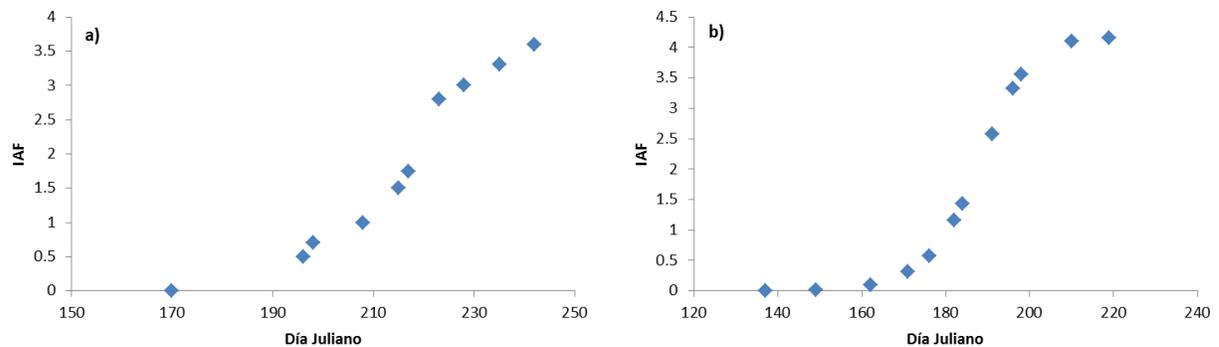


Figura 3.2. Desarrollo temporal de cultivos y su relación con el IAF. a) Algodón y b) Maíz

La Figura 3.2a, muestra un comportamiento desacoplado entre el IAF y el tiempo transcurrido de la etapa de desarrollo del cultivo, el cual podría considerarse dentro de los términos normales, ya que en general, tiene un comportamiento lógico de acuerdo al crecimiento. Por otro lado, la Figura 3.2b, se aprecia un comportamiento demasiado estilizado de la curva de crecimiento del cultivo. En estas condiciones, es posible diferenciar a simple vista las diferentes etapas del

desarrollo del cultivo, así, a primera vista, es posible apreciar el desarrollo exponencial, muy claramente separado de la etapa lineal del desarrollo de la vegetación, con la transición correspondiente a la etapa de meseta. Por otro lado, la Figura 3.3, muestra la relación entre IAF y la cobertura de la vegetación.

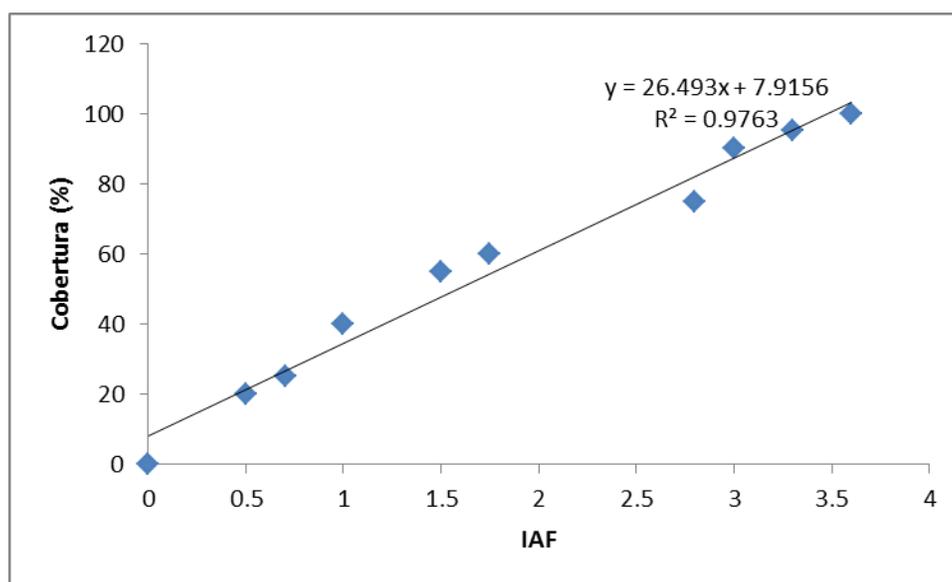


Figura 3.3. Relación de IAF y Cobertura en el cultivo de algodón

Como ya se anticipaba, diversos autores, ha mostrado que existe relación entre los valores de IAF y la cobertura de la vegetación. De lo mostrado por la Figura 3.3, se observa la relación existente entre el IAF y la cobertura del suelo por parte de la vegetación, en este caso con datos del experimento de algodón, de tal manera que la cobertura puede ser calculada a partir de valores de IAF, o bien se puede establecer la relación inversa, dependiendo de los intereses del análisis.

Es práctica común, relacionar los valores de algún IV con los valores IAF, y poder hacer aproximaciones con fines predictivos. Para aligerar el uso de los IV, se propone el uso de la relación directa entre al reflectancia de la banda del IRC, y los valores de IAF, Figura 3.4, evitando de manera directa, la influencia de los problemas de saturación de la banda del R.

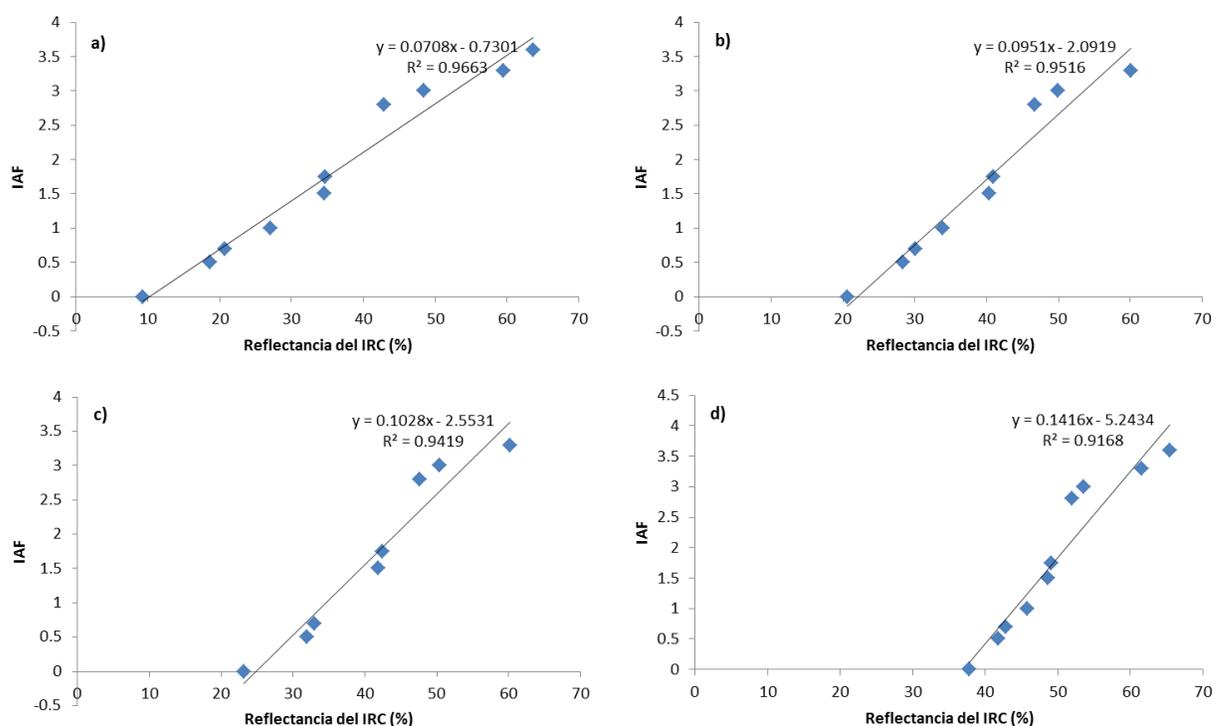


Figura 3.4. Relación entre IRC y IAF, para el cultivo de algodón en cuatro suelos secos diferentes. a) Suelo seco 1, b) Suelo seco 2, c) Suelo seco 3 y d) Suelo seco 4

En general, las relaciones propuestas entre los IV y el IAF o bien la Bm, deberán tomarse con las reservas del caso; por ejemplo, siempre que el IV, muestre sensibilidad a valores altos de IAF, de lo contrario, se puede desechar su uso. En el caso de monitoreo del estado de desarrollo actual de los cultivos utilizando

información obtenida con sensores a bordo de plataformas satelitales, se puede considerar el uso de los IV, aunque presenten problemas de saturación a valores altos de IAF, siempre que la cobertura de los cultivos no alcance a tapar la totalidad de la parcela y la resolución espacial se tal que siempre esté considerando las mezclas del sistema suelo-vegetación, dejando margen con esto, para evitar la saturación, como sucede con cultivos en hilera que no alcanzan a cubrir el espacio entre surcos.

Continuando con lo mostrado en la Figura 3.4, se observa que para el caso particular del cultivo de algodón bajo análisis, cuando el IAF, toma valores mayores de dos, existe desacoplamiento en la relación lineal entre la reflectancia del IRC y el IAF. Posteriormente, la relación parece retomar el ajuste original con valores de IAF, mayores de tres. A pesar de que los ajustes mostrados en la Figura 3.4, pueden considerarse suficientemente robustos como para utilizarlos en la predicción del IAF, como función de los valores de reflectancia en la banda del IRC, la Figura 3.5, muestra el caso del doble ajuste de los valores de IAF como función del IRC. En la Figura 3.5, los ajustes mostrados en la parte inferior, corresponden a valores de IAF que van de cero a menores de dos, posteriormente, la parte superior de la misma, muestra los ajustes, para valores de IAF, mayores de 2.

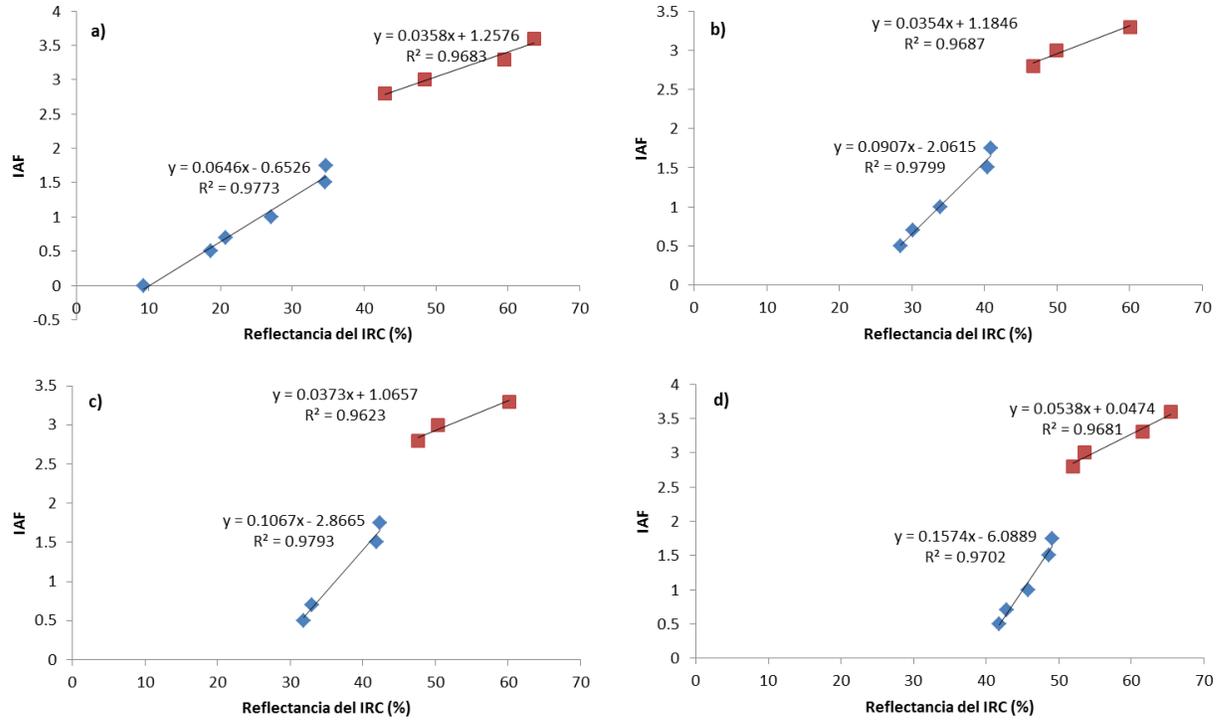


Figura 3.5. Ajuste doble de IRC y el IAF. a) Suelo seco 1, b) Suelo seco 2, c) Suelo seco 3 y d) Suelo seco 4

Con respecto a los datos del experimento de maíz, la Figura 3.6, esquematiza gráficamente, la relación que se puede encontrar entre la reflectancia en la banda del IRC y los valores del IAF, allí mismo, se muestran los ajustes obtenidos al realizar la correlaciones correspondientes.

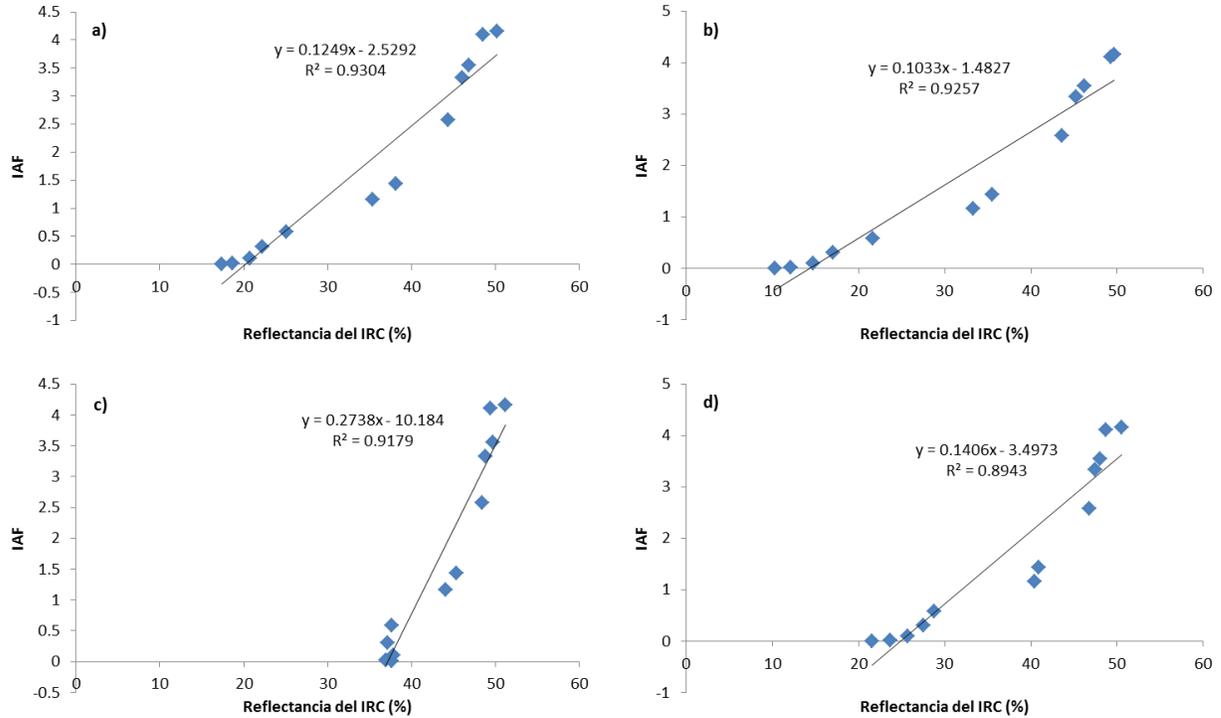


Figura 3.6. Ajuste de los valores de IRC y el IAF, para el cultivo de maíz. a) Suelo claro húmedo, b) Suelo claro seco, c) Suelo oscuro húmedo y d) Suelo oscuro seco

Si bien, los ajustes mostrados en la Figura 3.6, no son del todo elegantes, como los mostrados en la Figura 3.4 y sobre todo la Figura 3.5, muestra que es posible estimar efectivamente el IAF a partir de la reflectancia de una banda espectral en particular, en este caso la reflectancia del IRC. Aunque se pueden plantear ajustes de otro tipo, como los exponenciales y los polinómicos, en este trabajo se abordan solamente los lineales, para facilitar la comprensión e implementación.

Las discusiones hasta aquí presentadas, muestran que existe una relación lineal entre los valores de reflectancia del IRC y los valores de IAF. Por otro lado, también se demostró que existe una relación lineal entre el IAF y la cobertura.

Esto es importante de señalar, ya que sienta las bases, para estimar la cobertura en función de la reflectancia en la banda del IRC. Conocer el valor de la cobertura, puede ayudar a modelar de manera efectiva el crecimiento y el potencial productivo de los cultivos, basado en estimaciones de la producción de biomasa.

Lo hasta aquí mostrado, bosqueja de forma simple, la manera de poder acoplar modelos de simulación que utilizan los datos de cobertura foliar para su funcionamiento, tal es el caso del AquaCrop (Steduto *et al.*, 2009), con información obtenida a través de sensores a bordo de plataformas satelitales y poder conocer el estado actual del desarrollo del cultivo, así como las perspectivas de producción, todo esto mediante análisis multitemporal de sensores remotos.

3.3.2 Análisis de las Etapas de Desarrollo de Cultivos en el Valle del Yaqui

Después de analizar las relaciones entre IAF y la reflectancia en la banda espectral del IRC y, con base en ello, comprobar que es posible utilizar los valores de reflectancia del IRC para estimar el IAF, se procedió a analizar el comportamiento multi-temporal de las reflectancias del IAF durante el desarrollo de los cultivos en los que se realizaron mediciones en el Valle del Yaqui.

La figura 7, muestra los resultados de las mediciones y procesamiento de la información radiométrica obtenidas sobre el cultivo del frijol. De manera complementaria, el Cuadro 3.2, describe las principales etapas marcadas en la Figura 3.7 a fin de hacerla más entendible.

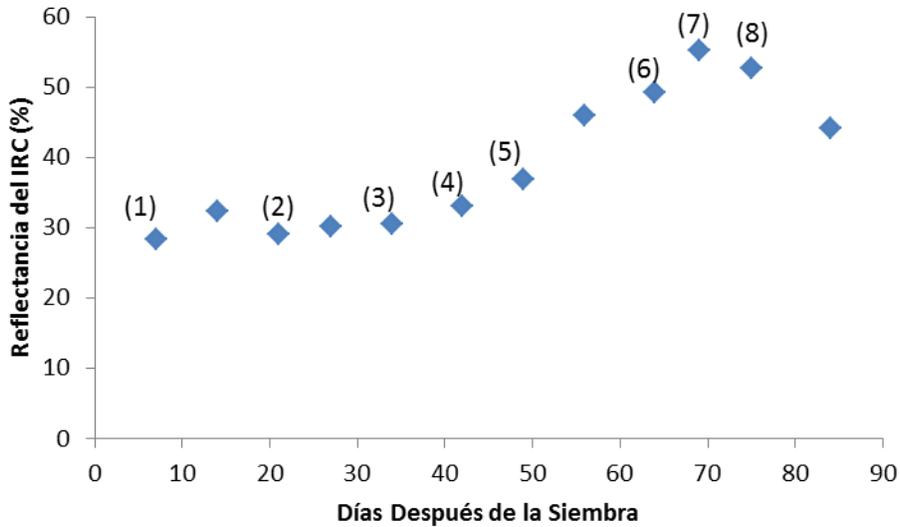


Figura 3.7. Etapas del desarrollo del frijol

Como ya se apuntaba con anterioridad, para la construcción de la Figura 3.7, fue necesario realizar la convolución correspondiente entre las bandas del R e IRC del radiómetro de 16 bandas, para obtener una banda equivalente a las bandas del sensor Thematic Mapper (TM); posterior a la convolución, se promediaron los valores de las repeticiones de las reflectancias del R e IRC, para cada fecha de medición.

Es de notar, la ubicación de las mediciones presentes entre la etapa número dos y la número tres, donde parece haber inconsistencias en los resultados. Algo similar, se puede notar entre las etapas número cinco y número seis. En el primer caso, si se trata de análisis con fines de rendimiento, puede ser ignorada, por el contrario en el segundo caso, el problema se vuelve importante, sobre todo con fines de estimación de rendimientos, ya que podría conducir a conclusiones erróneas derivadas de condiciones locales.

Cuadro 3.2. Descripción de las etapas indicadas en la Figura 7

Etapas	Descripción
1	Establecimiento del cultivo
2	Segundo trifolio y aparición del tercero
3	Quinto brote lateral visible y aparición del sexto
4	Primera flores abiertas, muy esporádicamente
5	Inicio de la Floración, el 10% de las flores abiertas
6	El 30% de las vainas alcanza la longitud típica
7	El 50% de las vainas alcanza la longitud típica
8	El 10 de las vainas están maduras
Penúltimo dato graficado	El 80% de las vainas maduras. La planta tiene marchitamiento y pérdida de hojas.

En todo caso, habría que analizar, si éste tipo de anomalías, se deben al riego o si se trata de algún tipo de evento que obstaculiza el desarrollo. Esta conclusión, solo se puede alcanzar mediante un análisis multitemporal, pero significa pérdida de tiempo de al menos un evento de obtención de información. Más adelante, se discute la manera de abordar este caso.

El patrón del desarrollo del frijol mostrado en la Figura 3.7, dista mucho del patrón típico señalado tradicionalmente en la literatura, cuando se señala que después de la máxima cantidad de Bm, prosigue la floración. En este caso, no es visible tal

comportamiento, debido principalmente, a la ausencia de floración intensiva que llegase a cubrir o cuando menos resaltar más que la parte verde de la planta y, a que las vainas, durante el proceso de formación, también realizan actividad fotosintética, de tal manera que ésta cesa, cuando comienza la maduración de los frutos que va directamente acompañada con el inicio del amarillamiento de las primeras hojas y posterior marchitamiento de la planta, este proceso de pérdida de hojas, se da de la parte inferior a la superior, por tanto, no es apreciable en las etapas iniciales. Por ello, a partir del estadio número siete en la Figura 3.7, da inicio la etapa descendente; a grandes rasgos, el crecimiento, se ha detenido con anterioridad, conservando solo la actividad fotosintética para acumular energía de reserva para las etapas finales; en esta etapa, cesa la actividad fotosintética y la planta se ocupa de utilizar las últimas reservas de energía, para la finalizar el llenado de las últimas vainas y la posterior maduración, hecho tal que consume poca energía.

Con respecto al sorgo, la Figura 3.9, muestra las etapas tempranas del desarrollo de éste cultivo, donde alcanzaron a tomar mediciones radiométricas. Al concluir la campaña de muestreo, el seguimiento al cultivo, se vio interrumpido. Para el cálculo de la información de la reflectancia en la banda del IRC, se procedió de manera análoga al caso del frijol.

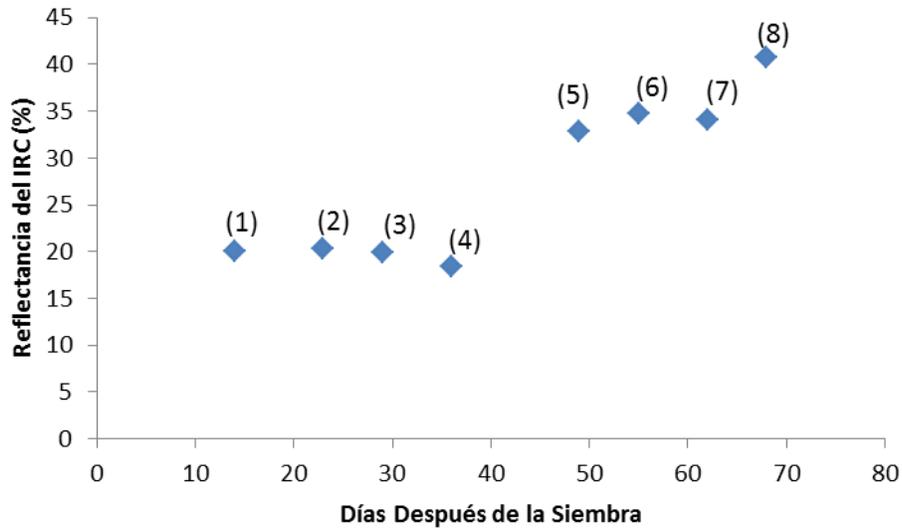


Figura 3.8. Etapas tempranas del desarrollo del sorgo

De manera similar al caso del frijol, el Cuadro 3.3, muestra las principales etapas del desarrollo del cultivo del sorgo, en este caso, la campaña de muestreo, solo incluyó las mediciones a etapas tempranas.

Cuadro 3.3. Etapas del Desarrollo del Sorgo del a Figura 8

Etapa	Descripción
1	Tercera Hoja Visible
2	Cuarte Hoja Desplegada
3	Sexta hoja y primer macollo
4	Sexta Hoja y Segundo macollo
5	Séptima Hoja y Desarrollo del segundo macollo
6	Hoja Bandera y segundo macollo desarrollado
7	Hoja bandera visible, cogollo, buche y segundo macollo con cinco hojas

8	Hoja bandera visible, cogollo, encañe y segundo macollo con cinco hojas
---	---

Para el caso del garbanzo, en Figura 3.9, se pueden apreciar las etapas en las cuales se llevaron a cabo mediciones radiométricas de campo. Debido a que se desconoce la fecha de siembra, a diferencia de las demás figuras, en este caso, se grafica el día juliano del año y el valor de la reflectancia en la banda del IRC. En la Figura, se indican con número arábigos, las diferentes etapas del desarrollo del cultivo en las cuales se realizaron las mediciones. El Cuadro 3.4, hace una descripción de las etapas indicadas en la Figura 3.9.

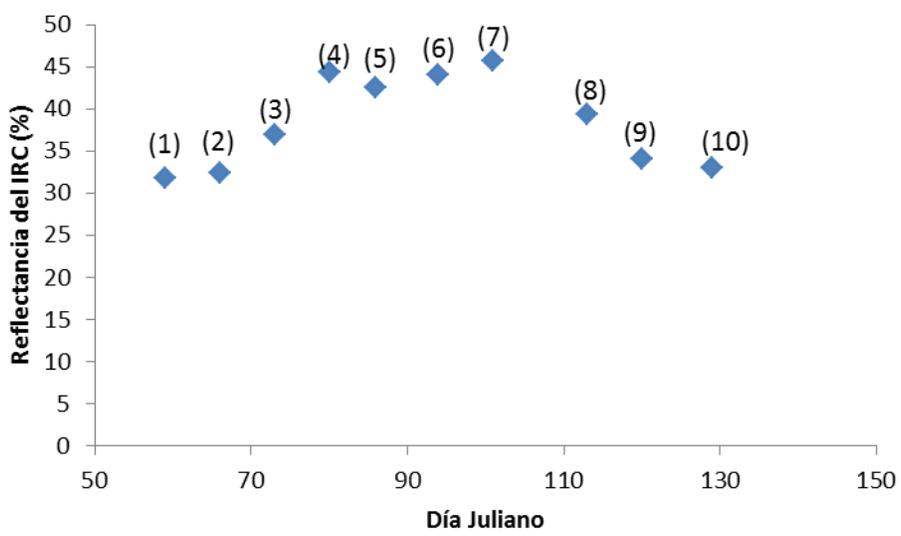


Figura 3.9. Etapas del desarrollo del garbanzo

De la información presentada en la Figura 3.9, se pueden hacer algunas anotaciones. Las mediciones con que se cuentan, son a partir del inicio de la floración, por lo que existe un vacío de información con respecto a las etapas tempranas del desarrollo del cultivo, esto es, la etapa que va de la germinación, crecimiento exponencial y hasta la fase lineal del crecimiento.

Cuadro 3.4. Etapas del desarrollo del garbanzo, descritas en la Figura 9

Etapas	Descripción
1	Inicio de la floración
2	Primer carpóforo con legumbre en formación
3	Primer carpóforo maduro
4	Fase principal del desarrollo de las vainas; el llenado de las legumbres continúa
5	Plena madurez: casi todas las legumbres están maduras
6	10 % de las partes aéreas de la planta, secas
7	20 % de las partes aéreas de la planta, secas
8	50 % de las partes aéreas de la planta, secas
9	70 % Partes aéreas de las plantas secas
10	Con menos del 10% de humedad en grano, todas las partes cosechadas

Debido a la fisiología del cultivo del garbanzo, que lleva a cabo la floración mientras continúa acumulando biomasa para las siguientes etapas, se puede asumir que en etapas tempranas, tiene un comportamiento parecido al frijol, en

todo caso los dos cultivos, son legumbres. Ambos cultivos, llevan a cabo la floración e inician el llenado de los frutos utilizando las vainas, como fuente adicional de fotosíntesis.

La etapa de meseta del desarrollo del garbanzo, se da principalmente durante el periodo de llenado de la legumbre, al tiempo que inicia el secado de la planta a través de la pérdida de las hojas de abajo hacia arriba, a diferencia del frijol, el cual al menos con los datos experimentales aquí expuestos, no existe una etapa de meseta, sino un estadio máximo de inflexión.

A partir del estadio con número siete, desde el punto de vista de la reflectancia en la banda del IRC, se observa un cambio que se puede asociar con la senescencia toda vez que el 20% de las partes aéreas de la planta, se encuentran secas.

La Figura 3.10, esquematiza el desarrollo temporal del cultivo del cártamo a través de un seguimiento utilizando la reflectancia en la banda del IRC. El Cuadro 3.5, describe las etapas del desarrollo numeradas en la Figura 3.10. Se observa una etapa de meseta que va del estadio con el número cuatro al del número seis, esto es del inicio de la formación de los capítulos florales, hasta el inicio de la floración.

La floración en toda su plenitud, se da en el estadio marcado con el número siete. Debido a que se trata de una floración muy intensa, que no es precisamente fotosintética, donde la coloración de las flores resalta sobre la parte verde de la planta, esto tiene un marcado efecto sobre la reflectancia en la banda del IRC, de tal manera que este comportamiento es similar al inicio del amarillamiento mostrado en los casos de frijol y garbanzo.

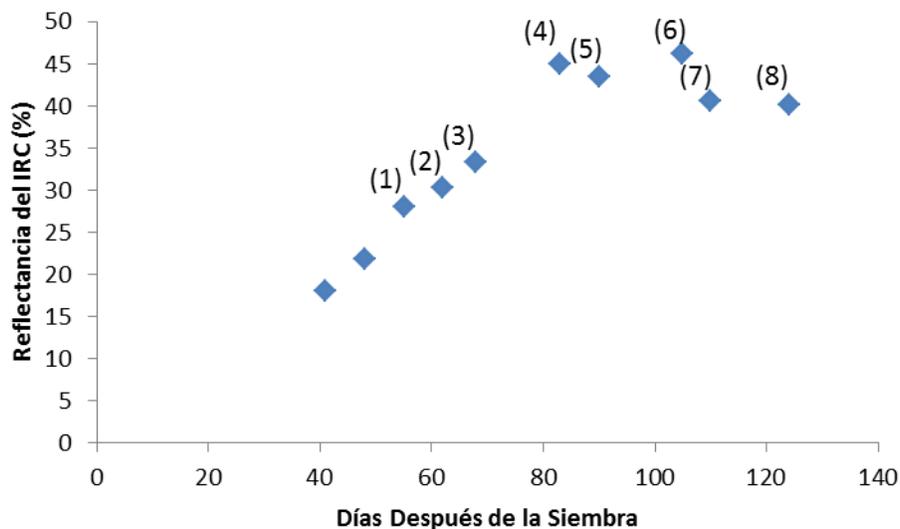


Figura 3.10. Etapas de desarrollo del cártamo

Cuadro 3.5. Descripción de las etapas mostradas en la Figura 10

Etapa	Descripción
1	Desarrollo de 10 hojas en roseta
2	Elongación del tallo a una altura aproximada de 40cm
3	Desarrollo de 10 o más ramas
4	Capítulos florales individuales visibles, pero cerrados todavía
5	Capítulos florales individuales visibles desarrollados, pero cerrados todavía
6	Comienzo de la floración: 10 % de las flores abiertas
7	Periodo de plena floración
8	Floración seca en un 50%, inicio de formación de grano

Las condiciones de pigmentación de la flor, provocan que la reflectancia en la banda del R, vuelve a tener sensibilidad. Lo que sigue a partir de la floración, es que los primero elementos que se hicieron a la floración, comienzan el llenado de frutos al tiempo que inicia la senescencia.

Mientras se da el desarrollo de los capítulos florales, hasta antes de la apertura de éstos, la planta los utiliza para realizar fotosíntesis. A medida que va abriendo, da comienzo la floración, sin embargo, este fenómeno no es claramente visible mediante los sensores remotos, debido a que las primeras flores, se abren debajo de las hojas superiores de la planta y existe una actividad combinada de fotosíntesis por parte de las hojas más recientes y actividad reproductiva por parte de los primero capítulos florales en actividad. Esto, hace que se presente una ligera meseta en el ciclo de desarrollo de la planta. La Figura 3.11, muestra las etapas de desarrollo del cártamo, visto conjuntamente desde las reflectancias del R e IRC.

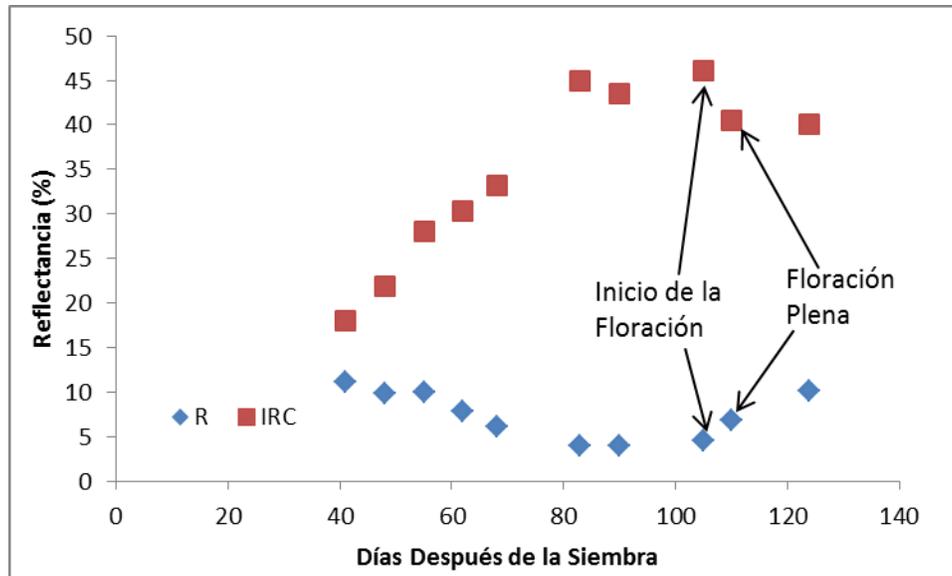


Figura 3.11. Floración del cártamo y visto de manera conjunta desde las reflectancias del R e IRC

El cártamo, por su naturaleza, tiene una floración intensa con alta densidad, de color amarillo que resalta sobre el verde de las hojas de éste. Analizando el desarrollo de las etapas del cártamo en términos de la reflectancia del R e IRC, Figura 3.11, se observa que se pierde sensibilidad en la banda del R, a partir de la etapa del desarrollo de 10 o más ramas, sin embargo, tan pronto emerge la floración, la banda del R, recobra sensibilidad, al tiempo que la banda del IRC, tiene un ligero cambio hacia disminuir sus valores.

Los efectos provocados por este comportamiento son mucho más marcados al utilizar los IV que hacen uso de la combinaciones entre este par de bandas, al volver inestables los resultados obtenidos.

Finalmente, en la Figura 3.12, se puede apreciar los resultados obtenidos para el cultivo del trigo. Desafortunadamente, solo hay información tomada desde la etapa

de la floración y hacia el final del ciclo del cultivo. Sin embargo, se analiza el comportamiento del desarrollo a través de la información de la reflectancia en la banda del IRC.

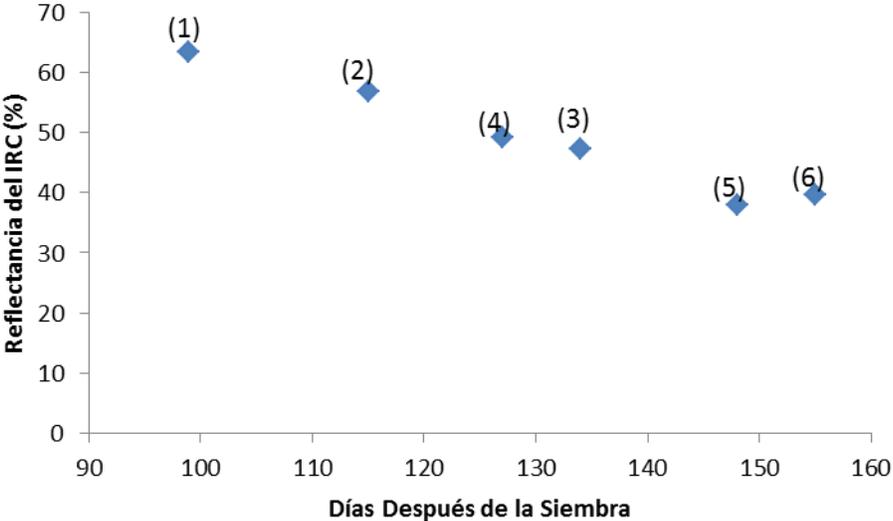


Figura 3.12. Etapas finales del desarrollo del trigo

El Cuadro 3.6, describe las etapas del desarrollo del cultivo, mostrado en la Figura 3.12, donde cada una de las mediciones, tiene un número clave que sirve para relacionarlo con la información de este cuadro, y así tener información sobre la descripción de la etapa numerada.

Cuadro 3.6. Descripción de las etapas finales del desarrollo del trigo de la Figura 12

Etapas	Descripción
1	Primeras aristas (barbas), visibles (sólo en variedades aristadas)
2	Fin del espigado: la espiga o panícula completamente fuera
3	Grano lechoso tardío
4	Pastoso temprano
5	Madurez completa: grano duro, difícil de dividir con la uña del pulgar
6	Producto cosechado

Las discusiones presentadas en este capítulo permiten mostrar la conveniencia de utilizar la información de reflectancia del IRC para el monitoreo del estado de los cultivos, basados en mediciones radiométricas de campo, que confirman los comportamientos observados en otros experimentos internacionales con cultivos cíclicos.

3.4 CONCLUSIONES

Las discusiones presentadas en este capítulo, permitieron comprobar la relación lineal existente entre la Biomasa y el Índice de Área Foliar. También mostró, el ajuste de la relación directa entre el Índice de Área Foliar y el reflectancia en la banda del Infrarrojo Cercano.

Utilizando información experimental, se demuestra que es posible estimar razonablemente el Índice de Área Foliar a partir del uso de la reflectancia en la banda del IRC.

Por otro lado, con una serie de mediciones experimentales llevadas a cabo en el Valle de Yaqui, se mostró el uso de la reflectancia de la banda del Infrarrojo Cercano, para conocer las diferentes etapas de desarrollo de cultivos mediante un análisis multitemporal.

Una extensión a este trabajo, es el uso para fines predictivos o de rendimientos. De los datos analizados aquí, es de notar, los cultivos, generalmente tienen diferente manera de llegar a la etapa máxima de producción de biomasa, los cuales pueden incluir etapas tempranas o bien avanzadas de la floración, dependiendo de su fisiología particular.

3.5 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., 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.

Calera, A., J. Gonzalez and J. Meliá. 2004. Monitoring barley and corn growth from remote sensing data at field scale. *Int. J. Remote Sens.* 25:97-109

Goudriaan, J., and H.H. van Laar. 1994. Modeling potential crop growth processes. Textbook with exercises. *Current Issues in Production Ecology*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. 238 p.

Goudriaan, J., and J.L. Monteith. 1990. A mathematical function for crop growth based on light interception and leaf area expansion. *Ann. of Bot.* 66:695-701.

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.

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.

Stockle, C. O., M. Donatelli, M., and R. Nelson. 2003. CropSyst, a cropping systems simulation model. *Eur. J. Agron.* 18:289-307.

Steduto, P., T.C. Hsiao, D. Raes, and E. Fereres. 2009. AquaCrop—The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: I. Concepts and Underlying Principles. *Agron J* 2009 101: 426–437.

Tucker, C.J., B.N. Holben, J.H. Elgin, and E. McMurtrey. 1981. Remote sensing of total dry matter accumulation on winter wheat. *Remote Sensing of Environment.* 11:171-190

CAPÍTULO 4. MODELACIÓN DEL DESARROLLO DE CULTIVOS UTILIZANDO INFORMACIÓN SATELITAL

RESUMEN

Con fines de modelación del estado de desarrollo de cultivos, se estudió el comportamiento de la reflectancia espectral en la banda del Infrarrojo Cercano obtenida por plataformas satelitales sobre cinco parcelas con cultivos cíclicos. Los resultados, permiten suponer que ésta información, puede ser utilizada confiablemente para el monitoreo del estado actual de desarrollo de los cultivos mediante un análisis multi-temporal de información satelital. Lo anterior, debido a que permite realizar el seguimiento del ciclo de producción, probado en cultivos homogéneos establecidos en grandes extensiones. Posteriormente, se hace extensivo el estudio hacia otros cultivos con diferente condición atmosférica y de fragmentación de los predios, donde se comprobaron las fortalezas del uso de la reflectancia del IRC, como sustituto de los IV, para el monitoreo del estado actual del desarrollo de cultivos. Los resultados mostraron que se puede utilizar confiablemente la información multitemporal del IRC para el monitoreo de los cultivos tanto temporales, como anuales y perennes.

Palabras clave: Reflectancia del IRC, Modelación del Crecimiento de Cultivos, Análisis Multi-temporal

4.1 INTRODUCCIÓN

Las plataformas satelitales con sensores a bordo utilizados para obtener información sobre el estado de desarrollo de los cultivos, precisan del debido proceso de conocimiento de su comportamiento antes de considerarse plenamente operativos.

Tradicionalmente, la modelación o monitoreo de la condición de cultivos a alta resolución tanto espacial como temporal, es una de las tareas comúnmente abordadas para dar solución mediante el uso de la técnica de los sensores remotos. La mayoría de la veces, con la mente puesta en que solucionando este problema se solucionan los problemas económicos y de fiabilidad del monitoreo del estado actual del desarrollo de los cultivo y la predicción del rendimiento. Particularmente, estos desarrollo toman ventaja de los altos contrastes existentes entre la banda del Rojo (R) y del Infrarrojo Cercano (Tucker, 1981).

Aprovechando los contrastes entre la banda fotosintética del R y la no-fotosintética del IRC, se han desarrollado diversos Índices de Vegetación (IV), Paz *et al.* (2007), revisaron la mayor parte los más comunes al tiempo que presentan la problemática del funcionamiento de ellos, así como las hipótesis intrínsecas de su formulación y las limitaciones de aplicación.

En general, los desarrollos de los IV, se han realizado con base en modelos de simulación radiativa, como el SAIL (Verhoef, 1984), o el MCRM3, (Kuusk, 1996) o el acoplamiento de más de uno de ellos, PROSAIL (Jacquemoud *et al.* 2009) y verificados mediante mediciones radiométricas en campo. Sin embargo, en pocas

ocasiones se toman en cuenta los efectos atmosféricos y los de la geometría de iluminación-visión, elementos que conducen a problemas y errores en los resultados al aplicarlos operacionalmente utilizando imágenes obtenidas por sensores a bordo de plataformas satelitales, donde, los efectos atmosféricos, revisten gran importancia, al igual que los angulares.

En casi todos los IV, se tiene el doble problema de los efectos atmosféricos combinados, por un lado los que se aplican sobre la banda del R y por otro los correspondientes a la banda del IRC o los de las regiones del espectro electromagnético que utilicen.

Es ampliamente conocido que la atmósfera tiene gran influencia sobre la información que sobre la superficie terrestre obtienen los sensores remotos. De este modo, el uso de adecuado de las imágenes tomadas por sensores a bordo de plataformas satelitales, implican necesariamente procedimientos de corrección de los efectos atmosféricos. Por otro lado, es importante considerar que la reflectancia de la superficie terrestre, es anisotrópica (Privette, 1994) de tal manera que en la información obtenida, se encuentra incluidos el efecto de los ángulos de visión y los de iluminación. Así, la Función Bidireccional de Distribución de la Reflectancia (BRDF, por sus siglas en inglés) describe matemáticamente esta anisotropía, prediciendo la magnitud de la radiación reflejada en una dirección dada.

En capítulos anteriores, se planteó el uso de la reflectancia del IRC como base para el monitoreo de cultivos, en lo sucesivo, en este trabajo, se continúa

utilizando la misma herramienta, pero extensivo a información obtenida a partir de sensores a bordo de plataformas satelitales, para el monitoreo del estado de desarrollo de cultivos.

4.2 MATERIALES Y MÉTODOS

En este trabajo, se realiza un análisis del comportamiento y uso de la reflectancia del IRC como base para el monitoreo de cultivos. Se escogen dos partes de pruebas, en la primera, sobre la misma área de trabajo de la Campaña de Muestreo de Yaqui, donde se tiene la información completa de mediciones radiométricas y variables biofísicas y, la otra es en la Zona Cañera de Estado de Morelos, donde se cuenta solamente con un catastro y una descripción somera del desarrollo del cultivo.

Para el desarrollo de este apartado, se utilizaron imágenes de los sensores Thematic Mapper(TM) y Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+), obtenidas por las plataformas satelitales Landsat 5 y Landsat 7, respectivamente. Las imágenes, de libre distribución, fueron obtenidas por cortesía del Servicio de Levantamiento Geológico de los Estados Unidos de América (USGS, por sus siglas en idioma inglés).

Para el análisis de las imágenes TM y ETM que dan cobertura al Valle del Yaqui y el Estado de Morelos, se utilizó el algoritmo descrito por Palacios (2007) para la corrección atmosférica, en tanto que para la corrección de los efectos angulares, se utilizó un algoritmo de corrección de BRDF (Bolaños *et al.*, 2007; Bolaños y Paz, 2010).

Después de realizar las correcciones de los efectos angulares y atmosféricos, las imágenes fueron corregidas en la referencia terrestre hasta el nivel sub-pixelar, utilizando para ello, el criterio de error menor a la mitad de un pixel obtenidas mediante la implementación del algoritmo de la Transformada Rápida de Fourier. Posteriormente, se codificó un programa en lenguaje C++, para extraer la información a cada pixel en el tiempo, formando una base de datos en la que por cada pixel, se cuenta con la información contenida en cada una de las imágenes.

4.2.1 Área de trabajo para cultivos homogéneos en grandes extensiones

La zona de medición, enclavada en El Valle del Yaqui, es una zona que puede ser cubierta con una imagen satelital dependiendo de la resolución y tipo de sensor del que se hable. De acuerdo con el sistema de referencia mundial versión 2 (WRS2, por sus siglas en idioma inglés) utilizado para la nomenclatura de los productos Landsat del USGS, la escena que contiene la Trayectoria (Path) 034 y el Renglon (Row) 041, denominada comúnmente P034R041 o simplemente escena 034041, es la que da cobertura al área de interés o zona de medición del Valle del Yaqui, donde se llevó a cabo la campaña de mediciones de 2008. El Cuadro 4.1, detalla las características de las imágenes utilizadas en el análisis que a continuación se describe.

Cuadro 4.1. Detalle de las imágenes utilizadas

Nombre de la Escena	Fecha de Toma de la Imagen	Satélite que Tomó la Imagen	Sensor de Toma de la Imagen
WL71034041_04120080115	15 de Enero de 2008	Landsat 7	ETM+
WL71034041_04120080131	31 de Enero de 2008	Landsat 7	ETM+
WL5034041_04120080208	08 de Febrero de 2008	Landsat 5	TM
WL71034041_04120080216	16 de Febrero de 2008	Landsat 7	ETM+
WL5034041_04120080224	24 de Febrero de 2008	Landsat 5	TM
WL71034041_04120080303	03 de Marzo de 2008	Landsat 7	ETM+
WL5034041_04120080311	11 de Marzo de 2008	Landsat 5	TM
WL71034041_04120080319	19 de Marzo de 2008	Landsat 7	ETM+
WL5034041_04120080327	27 de Marzo de 2008	Landsat 5	TM
WL5034041_04120080412	12 de Abril de 2008	Landsat 5	TM

Nombre de la Escena	Fecha de Toma de la Imagen	Satélite que Tomó la Imagen	Sensor de Toma de la Imagen
WL71034041_04120080420	20 de Abril de 2008	Landsat 7	ETM+
WL5034041_04120080428	28 de Abril de 2008	Landsat 5	TM
WL71034041_04120080506	06 de Mayo de 2008	Landsat 7	ETM+
WL5034041_04120080514	14 de Mayo de 2008	Landsat 5	TM
WL71034041_04120080522	22 de Mayo de 2008	Landsat 7	ETM+
WL5034041_04120080530	30 de Mayo de 2008	Landsat 5	TM
WL71034041_04120080607	07 de Junio de 2008	Landsat 7	ETM+
WL5034041_04120080615	15 de Junio de 2008	Landsat 5	TM
WL71034041_04120080623	23 de Junio de 2008	Landsat 7	ETM+
WL5034041_04120080701	01 de Julio de 2008	Landsat 5	TM

La Figura 4.1, muestra el área de 4x4 km, donde se ubican las diferentes parcelas de muestreo, denominadas Parcelas Homogéneas (PH) donde se llevó a cabo la

campana de muestreo durante el año 2008, la fecha de la imagen satelital de fondo es del 24 de febrero del mismo año.

Durante mediados del año 2003, el equipo científico del sensor ETM+ reportó que ocurrió avería en los instrumentos a bordo del satélite Landsat 7. El problema fue causado por la falla del Corrector de Línea de Barrido (Scan Line Corrector, SLC), el cual compensa la imagen por el movimiento hacia adelante del satélite. A pesar de los intentos por corregir el problema, éstos han resultado infructuosos por lo que el daño, es permanente.

El sensor ETM+ sigue siendo capaz de obtener información útil con el SLC apagado, sobre todo en el centro de una escena, sin embargo, en las partes alejadas del centro se presenta pérdida de líneas alternadas. El Servicio de Levantamiento Geológico de Estados Unidos de América (USGS, por sus siglas en inglés), ha puesto a disposición del público un producto corregido mediante interpolación.

Sin embargo, ya sea que se trate de interpolación al interior de la imagen o utilizando de base alguna imagen externa para la corrección, los resultados obtenidos, deben tomarse con las reservas del caso, sobre todo cuando se trata de monitoreo de cultivos y el principal interés, es conocer el estado de desarrollo actual del mismo.



Figura 4.1. Cobertura del área de estudio con imágenes del sensor TM

La Figura 4.2, muestra la cobertura de una escena o imagen tomada por el sensor ETM+, la imagen fue tomada el 15 de Enero de 2008. Se observa la afectación del SLC sobre la mayoría de las parcelas homogéneas donde se llevaron a cabo las mediciones.

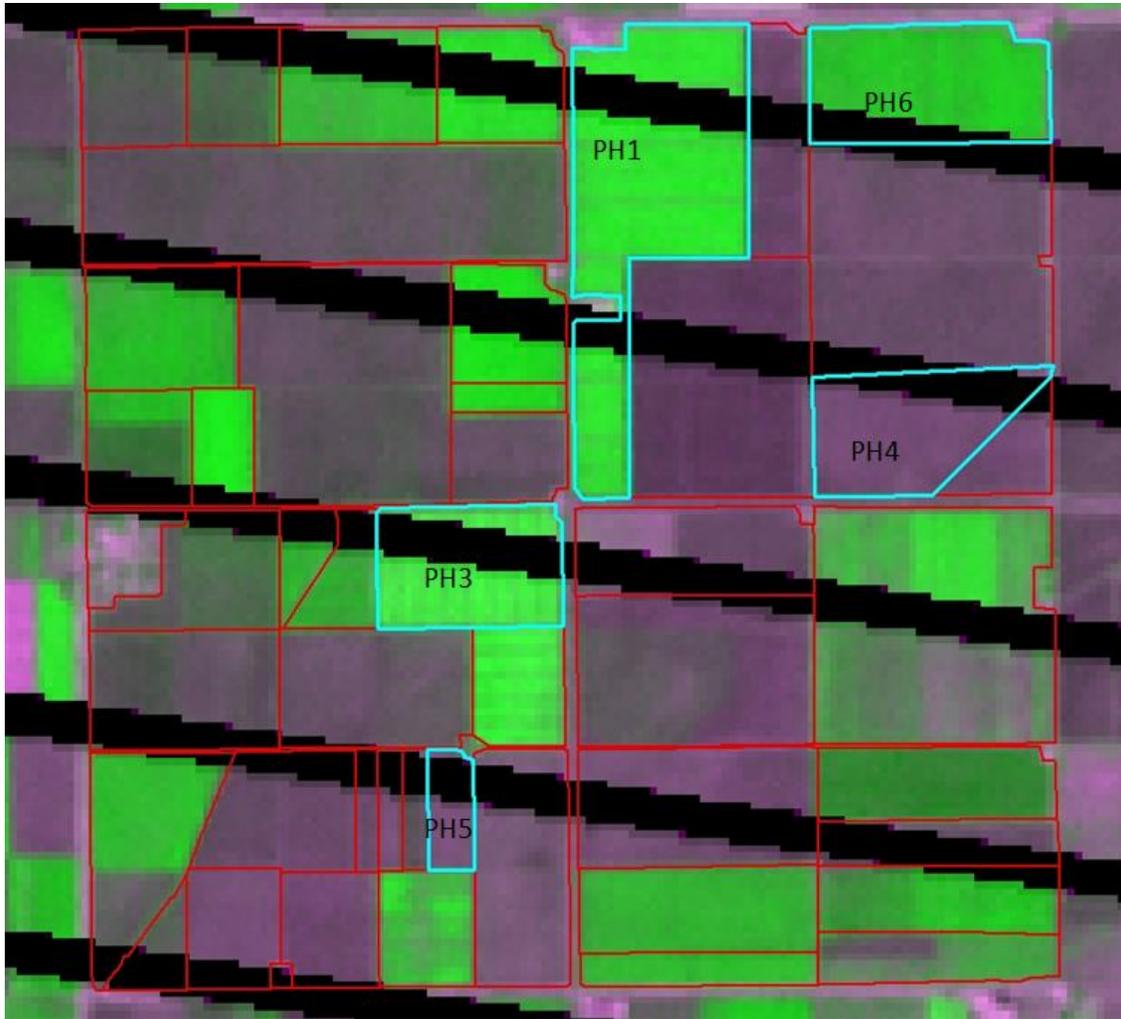


Figura 4.2. Cobertura del área de estudio con imágenes del sensor ETM+

Debido a la dinámica del movimiento del satélite y los movimientos terrestres, las líneas con falta de información, no coinciden de un paso al siguiente del satélite, por lo que se dificulta poder realizar inter-comparaciones entre escenas consecutivas.

Una alternativa, usada en este estudio, es utilizar los píxeles válidos y hacer un intento de extrapolación que permita describir el comportamiento promedio de la parcela. Sin embargo, si existen problemas de nubosidad conjugados con la

cobertura de las líneas sin información, en algunas ocasiones, el porcentaje de los píxeles con información útil, puede caer abajo del 50% con respecto al total de la parcela, por lo que éste procedimiento, puede ser despreciable bajo éstas consideraciones.

Para fines de análisis y minimizar el ruido, en este análisis, se han considerado solamente las escenas, cuyo porcentaje de píxeles con información útil, sea mayor del 50%; aunque, si a pesar de tener más del 50% de la cobertura, la escena introduce demasiado ruido, la información se desecha luego de un concienzudo análisis, debido al vacío de información del cual procede.

De manera análoga a como se presentó el análisis de las mediciones radiométricas en las parcelas homogéneas, en este apartado se presenta el análisis correspondiente utilizando información satelital, sobre la totalidad del área de cultivo.

Se realizaron dos tipos de análisis a saber: por un lado, un análisis por separado píxel a píxel, que no se presenta en este trabajo, que permitió conocer el comportamiento generalizado de los píxeles y por el otro, un análisis realizando una aglomeración de la totalidad de los píxeles válidos presentes en una parcela. En el análisis a nivel parcela, se utilizó un promedio de las reflectancias de cada uno de los píxeles por separado.

En vista de que la reflectancia no es un valor escalable linealmente, se procedió a analizar los valores de ésta, con base en un IV, comparando las diferencias entre el valor del IV calculado por píxel y después promediado a toda la parcela y, el

cálculo del mismo IV utilizando los valores promedios de la reflectancia del R y del IRC en el área de trabajo. Los resultados mostraron que salvo raras ocasiones, el porcentaje de diferencias no rebasa del 5%, al tiempo que cuando lo sobrepasan, no llegan al 10%, por tanto en este estudio se aborda, el promedio de la reflectancia de los pixeles válidos de la parcela. Aunque más adelante se retoma el análisis a nivel de pixeles individuales

4.2.2. Área de trabajo de otros cultivos homogéneos establecidos en grandes extensiones libres de nubosidad con uniformidad de desarrollo

Después de los análisis presentados para el punto anterior, se procedió a realizar un análisis de cultivos establecidos sobre otras áreas incluidas dentro del polígono de 4km por lado de longitud. En estos casos, no se contó con información detallada del ciclo de producción, solo se contó con información del tipo de cultivo establecido y se analizó la evolución temporal de la reflectancia en la banda del IRC. La Figura 4.3, muestra la ubicación de los otros cultivos analizados, los polígonos con relleno azul claro, mientras que los polígonos de las PH, se encuentran contorneados en color cyan.

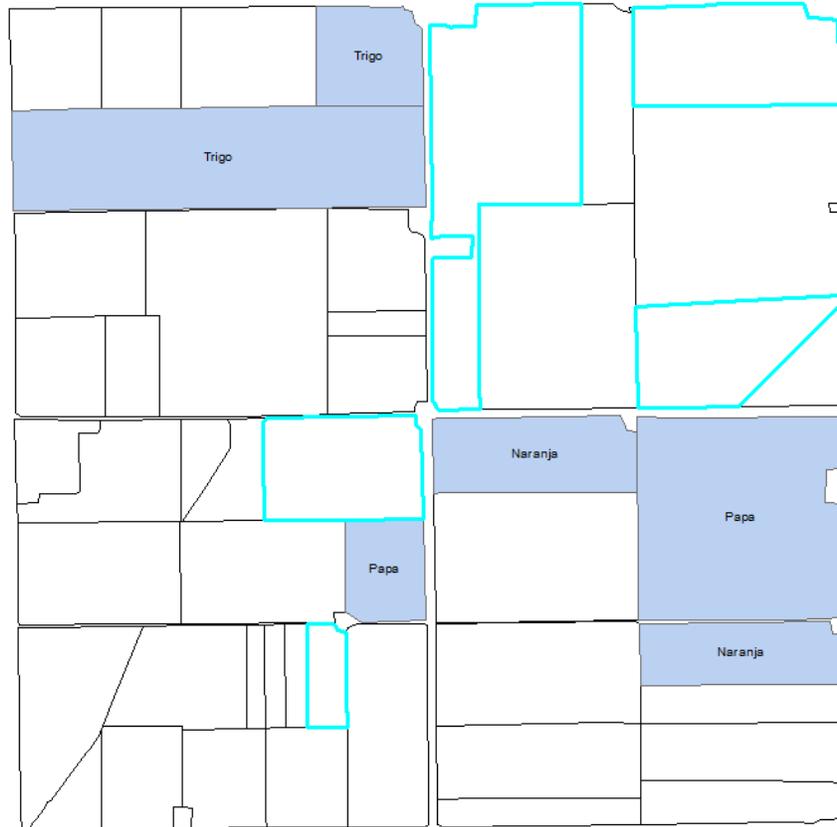


Figura 4.3. Ubicación de otros cultivos en el Valle del Yaqui

4.2.3 Área de trabajo para cultivos heterogéneos en superficie pequeña y altas perturbaciones atmosféricas

A continuación, el análisis se centra en cultivos donde se desconoce el grado de homogeneidad del establecimiento, así como el estado actual de desarrollo. Se trata de un área de templada a tropical, en el Estado de Morelos.

Existe alta fraccionalidad de la tenencia de la tierra, por tanto también de las parcelas de cultivo, hay mezclas de cultivos de riego y de temporal, y sobre todo, la nubosidad tiene gran influencia sobre la calidad de las imágenes que dan

cobertura al área, de tal manera que se hace necesario maximizar el uso de los pixeles claros o con información útil para fines de monitoreo.

Para hacer un análisis como en el Valle del Yaqui, el Cuadro 4.2, muestras las características generales de las imágenes de satélite utilizadas en este análisis, durante el año 2010 y parte de 2011.

Cuadro 4.2. Imágenes utilizadas para el análisis en Morelos

Nombre de la Escena	Fecha de Toma de la Imagen	Satélite que tomó la Imagen	Sensor de Toma de la Imagen
L71026047_04720100112	12 de Enero de 2010	7	ETM+
L71026047_04720100128	28 de Enero de 2010	7	ETM+
L5026047_04720100205	5 de Febrero de 2010	5	TM
L71026047_04720100213	13 de Febrero de 2010	7	ETM+
L71026047_04720100301	01 de Marzo de 2010	7	ETM+
L71026047_04720100317	17 de Marzo de 2010	7	ETM+
L71026047_04720100402	02 de Abril de 2010	7	ETM+
L71026047_04720100418	18 de Abril de de 2010	7	ETM+
L71026047_04720100504	04 de Mayo de 2010	7	ETM+
L71026047_04720100520	20 de Mayo de 2010	7	ETM+
L71026047_04720100605	05 de Junio de 2010	7	ETM+
L71026047_04720100621	21 de Junio de 2010	7	ETM+
L71026047_04720100707	07 de Julio de 2010	7	ETM+

Nombre de la Escena	Fecha de Toma de la Imagen	Satélite que tomó la Imagen	Sensor de Toma de la Imagen
L71026047_04720100723	23 de Julio de 2010	7	ETM+
L71026047_04720100808	08 de Agosto de 2010	7	ETM+
L71026047_04720100824	24 de Agosto de 2010	7	ETM+
L71026047_04720100909	09 de Septiembre de 2010	7	ETM+
L71026047_04720100925	25 de Septiembre de 2010	7	ETM+
L71026047_04720101011	11 de Octubre de 2010	7	ETM+
L71026047_04720101027	27 de Octubre de 2010	7	ETM+
L71026047_04720101112	12 de Noviembre de 2010	7	ETM+
L71026047_04720101128	28 de Noviembre de 2010	7	ETM+
L71026047_04720101214	14 de Diciembre de 2010	7	ETM+
L71026047_04720101230	30 de Diciembre de 2010	7	ETM+
L71026047_04720110115	15 de Enero de 2011	7	ETM+
L71026047_04720110131	31 de Enero de 2011	7	ETM+
L71026047_04720110216	16 de Febrero de 2011	7	ETM+

En el Estado de Morelos, es frecuente encontrar imágenes con alto contenido de nubosidad en cualquier época del año. A diferencia de la porción norte del país, donde se puede tener cobertura con imágenes de los sensores TM y ETM+, en Morelos, solo se tiene de ETM+ y muy escasamente, generalmente una por año, de TM, por tanto se dio preferencia maximizar la información de las imágenes, aún que presentara algún grado de nubosidad.

En la Figura 4.4, descartándose por completo aquellas que tuvieran cobertura total de nubes de acuerdo con el clasificador de objetos (Palacios *et al.*, 2006); lo ideal en estas condiciones, es contar con imágenes como la que muestra la Figura 4.5.

En ambos casos, la zona cañera del estado, marcadas en rojo, quedan fuera de los problemas de barrido del sensor ETM+. Por lo que el único elemento que incide para dejar de contar con información en cada toma de imagen lo constituyen las perturbaciones atmosféricas.

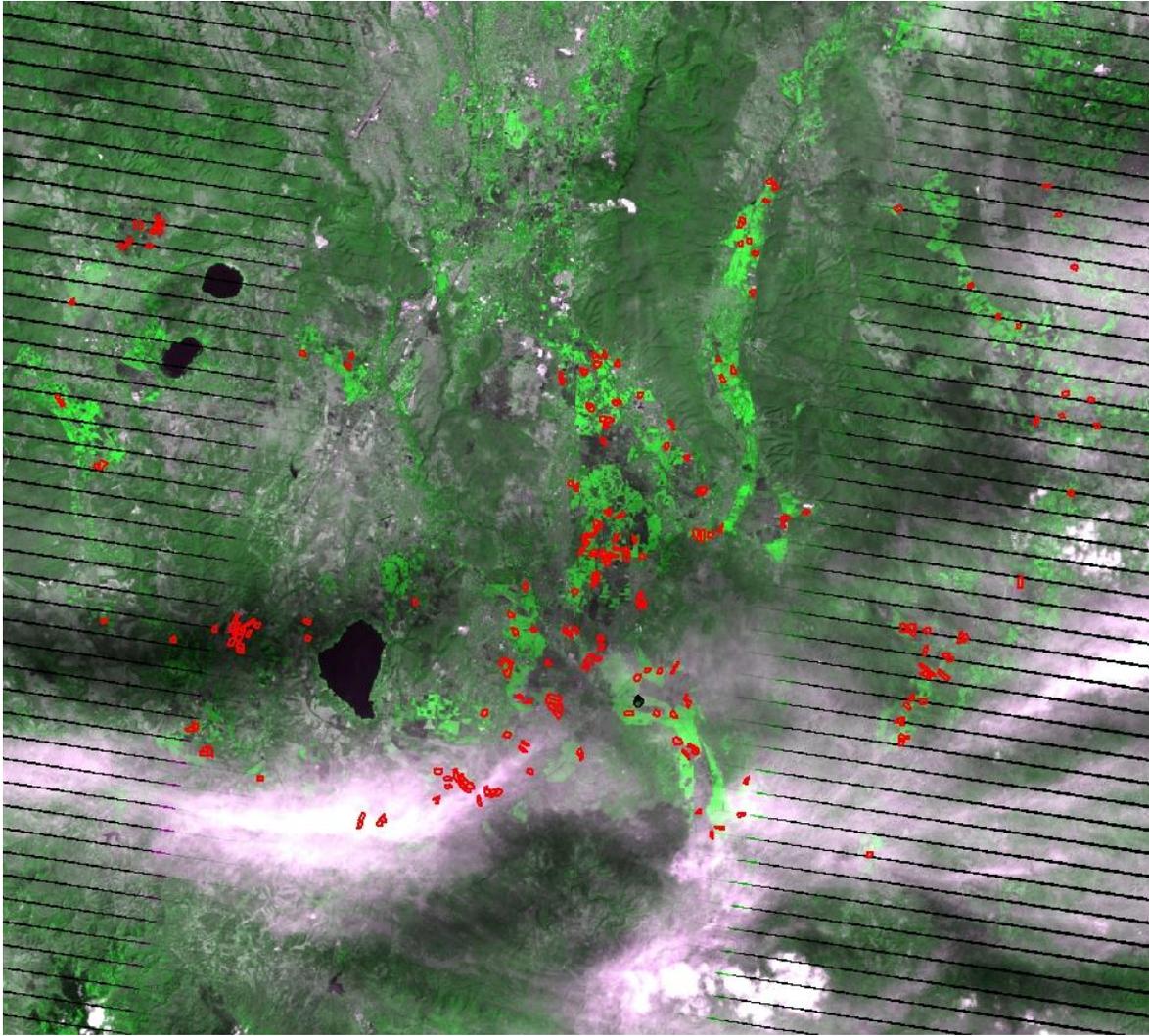


Figura 4.4. Imagen con nubosidad de fecha 28 de Enero de 2010

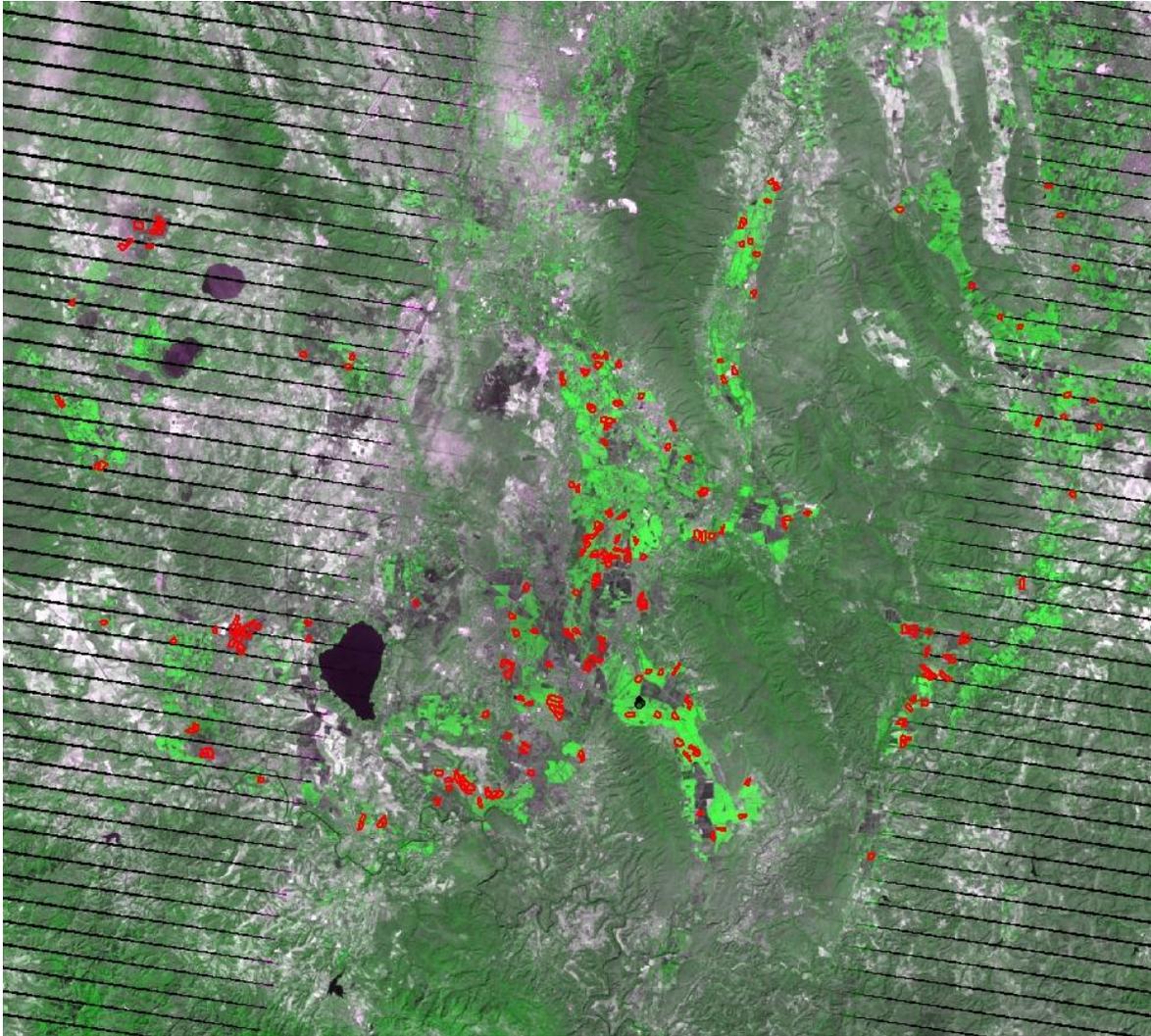


Figura 4.5. Imagen libre de nubosidad, fecha 15 de Enero de 2011

4.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De manera similar a como se presentó en los materiales y métodos, en este apartado, se analizan primero los cultivos homogéneos, los de la PH, establecidos en grandes extensiones de terreno con información detallada del ciclo de producción durante el desarrollo de la Campaña de Muestreo. Posteriormente, se

abordan los casos de otros cultivos homogéneos. En ambos casos las imágenes tienen poca distorsión atmosférica y es frecuente encontrar imágenes alternadamente de los sensores TM y ETM+, de tal manera que se puede asumir resolución temporal de ocho días.

Posteriormente, se presentan los resultados, al aplicar la misma estrategia en cultivos heterogéneos anuales, con mínima información sobre el desarrollo del cultivo, en un lugar (Estado de Morelos) donde son muy frecuentes las perturbaciones atmosféricas.

4.3.1 Cultivos homogéneos en grandes extensiones

La validación de la propuesta comienza por apoyarse en los datos radiométricos obtenidos en la Campa de Muestreo. De esta manera, la Figura 4.6, muestra los resultados obtenidos al analizar datos espectrales obtenidos en la PH1. La Figura 4.6a, se refiere a los datos satelitales, utilizando el promedio de la reflectancia obtenida, mientras que la Figura 4.6b, se muestra solo para fines de referencia, ya que se trata de los datos de radiometría de campo sobre una área de la parcela de muestreo.

Similarmente los casos analizados en el capítulo anterior, se enumeran algunas de las etapas de desarrollo de los cultivos y posteriormente se describen, para este caso particular, la descripción se encuentra en el Cuadro 4.3.

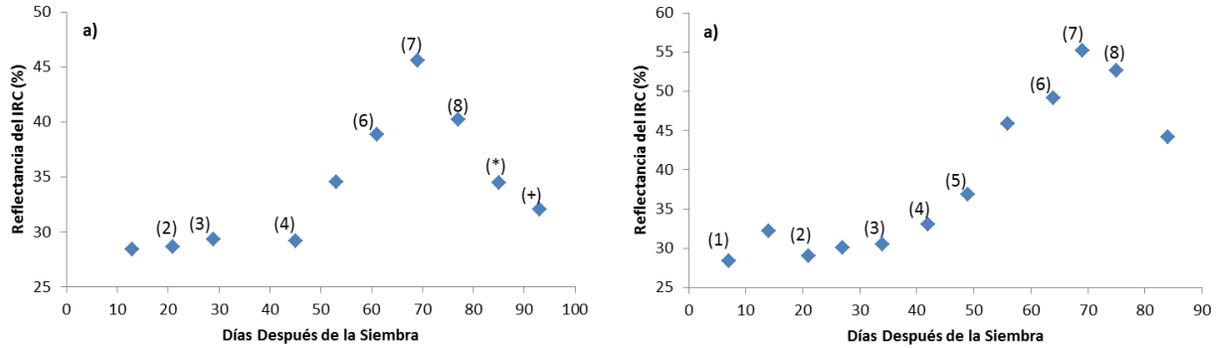


Figura 4.6. Algunas etapas del desarrollo del Frijol. a) con base en información satelital, b) con base en información de radiometría de campo

En términos generales, el comportamiento de los datos satelitales, coinciden con los de la radiometría. Las diferencias particulares en la correspondencia de los puntos de igual fecha, se deben a los efectos de escala, ya que a pesar de realizar mediciones en un área, éste tiende a la mínima expresión, cuando la resolución de trabajo es de 900 metros cuadrados. Una manera de comprobar a mayor detalle, puede ser ubicar el pixel exacto donde se llevaron a cabo las mediciones radiométricas de campo y analizar los datos satelitales y de campo en conjunto, sin embargo, solo se trata de bajar las escalas de comparación, la corrección exacta, podría ser utilizar una imagen con resolución igual al área de medición y con base en ello, hacer las conjeturas correspondientes. Para fines prácticos, de este estudio, las escalas aquí mostradas son suficientes, ya que se trata de modelar el comportamiento generalizado.

Cuadro 4.3. Etapas del desarrollo del frijol, presente en la Figura 3

Estadio	Descripción
1	Despliegue del primer par de hojas
2	Segundo trifolio y aparición del tercero
3	Quinto brote lateral visible y aparición del sexto
4	Primera flores abiertas, muy esporádicamente
5	Inicio de la Floración, el 10% de las flores abiertas
6	El 30% de las vainas alcanza la longitud típica
7	El 50% de las vainas alcanza la longitud típica
8	El 10 de las vainas están maduras
*	El 80% de las vainas maduras
+	El 60% de la planta está muerta

La etapa de desarrollo marcada con el “*”, no se encuentra incluida en el registro de datos radiométricos, sin embargo, en la documentación del experimento, aparece reportado, pudiendo ser ubicado en la gráfica de la Figura 4.6a. De manera análoga, el estadio “+” presente en la Figura 4.6a y descrita por el Cuadro 4.3, aparece en la documentación, pero no está reportada en la base de datos espectrales.

Los estadios de la Figura 4.6a y Figura 4.6b, en vista que no coinciden exactamente, salvo en algunos casos, se aproximaron ubicando el punto más próximo a la fecha de la medición radiométrica, es necesario hacer notar el cultivo del frijol, no alcanza a cubrir totalmente el suelo en las etapas avanzadas de su

desarrollo. Así, desde el punto de vista de un área de medición, en cualquier instante que se realicen ya sea mediciones o tomas de imágenes satelitales, se tiene presente la mezcla suelo-vegetación.

En estas condiciones, para el pixel integrador, el cultivo, a pesar de encontrarse en su madurez fisiológica, se comporta como un cultivo de condiciones controladas que tiene cobertura parcial. Si el cultivo tuviera cobertura total del suelo, seguramente, habría una etapa de meseta fácilmente apreciable. A pesar de los cuestionamientos aquí mostrados, con respecto a la mezcla de información, el IRC, se muestra demasiado confiable para conocer los estados de desarrollo de los cultivos. En análisis posteriores, éste mismo tipo de análisis, se hace extensivo a otros cultivos, con diferente condición de cobertura y fisiología similar.

Con respecto al cultivo del sorgo, la Figura 4.7, esquematiza el desarrollo multitemporal con base en la información de la reflectancia del IRC. En el Cuadro 4.4, es posible leer la descripción de las etapas numeradas en la Figura 4.7, solo se muestran aquellas reportadas en la campaña de medición radiométrica.

La información mostrada en la Figura 4.7, permite identificar una pequeña meseta del desarrollo del cultivo, que va del estadio marcado con una “*”, hasta el marcado con “+”, la etapa, puede considerarse que comienza un poco antes y termina un poco después de éstos. Posteriormente, se muestra el estadio marcado con “x”, en clara fase de senescencia del cultivo.

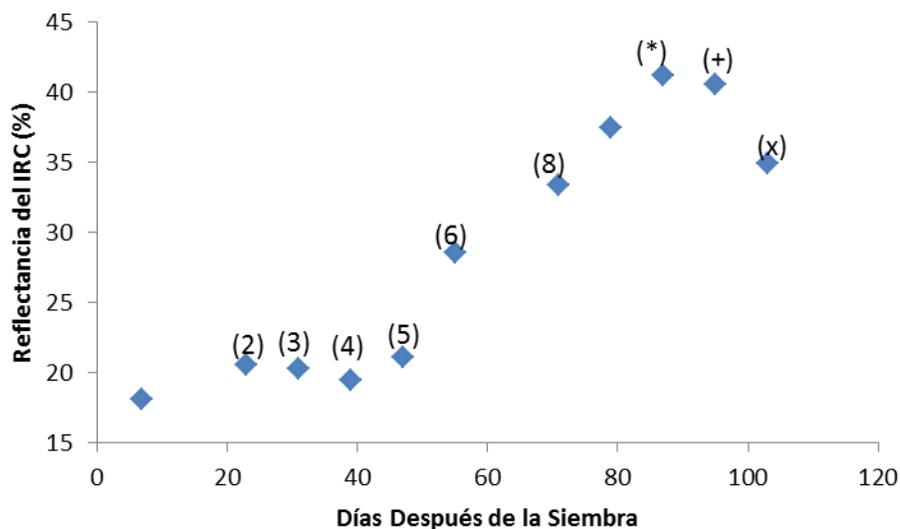


Figura 4.7. Etapas del desarrollo del sorgo

Cuadro 4.4. Etapas de desarrollo visibles del sorgo

Etapa	Descripción
2	Cuarta Hoja Desplegada
3	Sexta hoja y primer macollo
4	Sexta Hoja y Segundo macollo
5	Séptima Hoja y Desarrollo del segundo macollo
6	Hoja Bandera y segundo macollo desarrollado
8	Hoja bandera visible, cogollo, encañe y segundo macollo con cinco hojas

Los datos mostrados por la Figura 4.7, pueden servir ampliamente para conocer y en su caso inferir el estado de desarrollo a partir de la etapa 4 y hasta la etapa marcada con “*”, esto significa sensibilidad en la etapa vegetativa.

Desafortunadamente, no es posible contar con información radiométrica en las etapas posteriores, debido a la finalización de la campaña de muestreo. Sin embargo, el análisis de las reflectancias del IRC, permite saber que en la etapa marcada con “*”, existe la mayor cantidad de actividad fotosintética, lo cual puede verificarse tranquilamente con un IV, y a partir del estadio “+” comienza la senescencia, apreciable en el estadio “x”, presumiblemente, después del llenado de frutos.

Con respecto a la pequeña anomalía presente entre el estadio 5 o bien el 6, donde no es posible separar a primera vista los datos anómalos, aprovechando que se trata de un análisis multi-temporal, se puede proceder de acuerdo con los planteamientos de Paz *et al.* (2009), quienes presente un método rápido para estimar la reflectancias del suelo, que puede ayudar a estimar el valor anómalo entre este par de valores descartando los casos de variaciones debidas al cambio de humedad en el suelo.

Este tipo de saltos en el comportamiento “normal”, puede deberse también a modificaciones de las condiciones en campo, por ejemplo un riego, al humedecer el suelo, puede introducir errores en la reflectancia parcialmente cubierta; pero también, un cambio en la coloración o disminución de la actividad fotosintética, puede provocar este comportamiento, por lo que al tiempo que se verifican los valores normales, se puede establecer una alarma dentro del monitoreo para investigar la fuente causante de éste comportamiento.

La normalización de estos valores, es especialmente importante si se trata de seguimiento con fines de estimación de rendimientos que vas más allá de conocer el estado actual de desarrollo del cultivo.

Durante la campaña de muestreo, el cultivo del garbanzo, es uno de los que tiene la mayor cobertura temporal de mediciones, sin embargo, se desconoce la fecha de siembra. La Figura 4.8, muestra algunas etapas del desarrollo que alcanzaron a cubrirse. La descripción de los estados de desarrollo, puede conocerse a través del Cuadro 4.5.

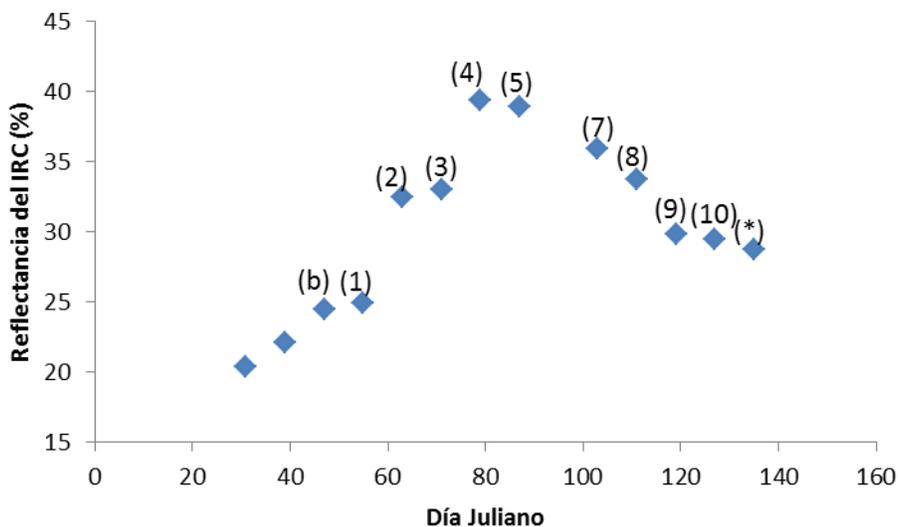


Figura 4.8. Etapas del desarrollo del garbanzo

De los datos mostrados en la Figura 4.8 y que describe el Cuadro 4.5, se incluyen los estadios marcados con “b” y “*”, que no están presentes en las mediciones radiométricas de campo. Un análisis rápido del comportamiento de la reflectancia de la parcela de sorgo, permite separar el periodo de desarrollo de un cultivo, sin embargo, debido a la resolución temporal de las imágenes, no es posible

determinar la fecha de siembra. De tal manera que para el día juliano 45, ya se presentan cuatro brotes laterales y da inicio la cobertura del cultivo.

Se observa un desacoplamiento entre las etapas marcadas como “b” y “1”, debido a que hay cambios en la fisiología de las plantas, al dar inicio la floración en esta última etapa. Este comportamiento o desacople, no es posible verificar con mediciones radiométricas de campo, debido a la ausencia de mediciones en esta etapa.

Esta situación, podría checarsé por condiciones de humedad o bien cambios en la pigmentación de las plantas, sin perder de vista el hecho de que los órganos reproductivos, al tener la coloración verde, indica que la planta lo utiliza para realizar actividad fotosintética.

La memoria fotográfica del experimento, no presenta estos cambios visibles, sin embargo, es necesario recordar que se trata de un rango del espectro electromagnético no apreciable a simple vista.

Por otro lado, entre los estadios 2 y 3, se observa un desacoplamiento, de tal manera que parece tener alteración de la línea de desarrollo, de igual manera, debería checarsé la fuente de este comportamiento y determinar si es normal debido a la fisiología o si se trata de alguna alteración debida a factores externos.

Se observa claramente que a partir de la fase principal del desarrollo de las vainas quizá un poco antes o un poco después, inicia la etapa senescente, la cual es más evidente cuando las legumbres alcanzan la plena madurez, sin que llegue a notarse una etapa clara de meseta.

Cuadro 4.5. Descripción de algunas etapas de desarrollo del garbanzo

Etapas	Descripción
b	Inicio de la cobertura del cultivo
1	Inicio de la floración
2	Primer carpóforo con legumbre en formación
3	Primer carpóforo maduro
4	Fase principal del desarrollo de las vainas; el llenado de las legumbres continúa
5	Plena madurez: casi todas las legumbres están maduras
6	10 % de las partes aéreas de la planta, secas
7	20 % de las partes aéreas de la planta, secas
8	50 % de las partes aéreas de la planta, secas
9	70 % Partes aéreas de las plantas secas
10	Con menos del 10% de humedad en grano, todas las partes cosechadas
*	Probablemente, listo para la cosecha o recientemente cosechado

Este comportamiento diferente a los analizados con mediciones radiométricas de campo, puede deberse a las condiciones de escala de medición. La radiometría de campo, tiene que escalarse antes de declararse representativa de la parcela.

La radiometría satelital, tiene un factor de integración de escala, ya que la superficie mínima de sensibilidad es un área de 900 m² que abarca tanto áreas de suelo desnudo y parcialmente cubiertos, como áreas de cobertura total,

obteniendo un promedio de todo esto; además, en este estudio, al integrarse a toda la parcela, tiene otro factor de integración de escala.

Un análisis con fines predictivos tanto del estado de desarrollo del cultivo, como de la estimación del potencial productivo, debe pasar por aclarar primero las condiciones de la reflectancia obtenida entre los estadíos siguientes: b y 1, 2 y 3 y, 4 y 5 a fin de determinar el desarrollo normal.

Para conocer el comportamiento temporal de la reflectancia en la banda del IRC en el cultivo de cártamo utilizando información satelital, se muestra la Figura 4.9, donde se marcan las etapas presentes durante la campaña de medición radiométrica en campo. Adicionalmente, en la documentación del experimento, se encuentra reportada la etapa “a” y derivado del conocimiento del ciclo de cultivo, se infiere la existencia de la etapa “*”. La descripción de los estados marcados en la Figura 4.9, son mostradas en el Cuadro 4.6.

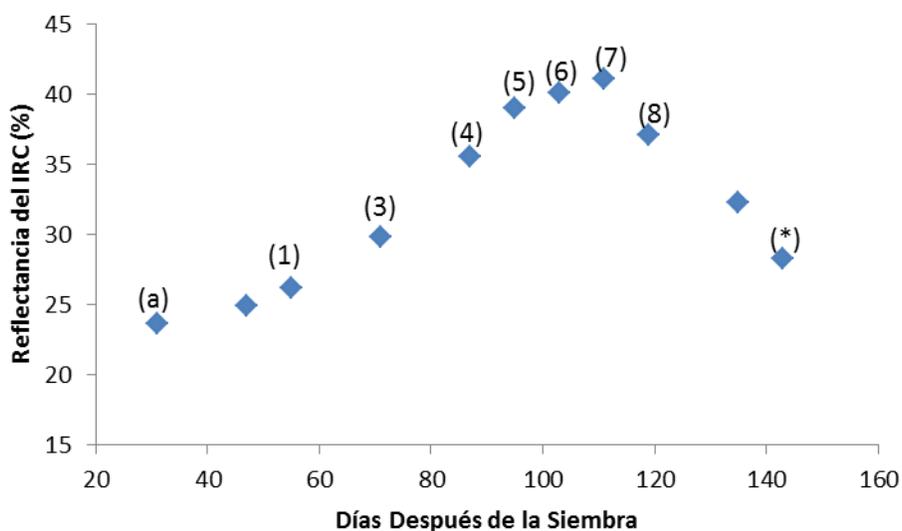


Figura 4.9. Desarrollo multi-temporal del cártamo

Se observa un comportamiento lineal ascendente a partir de la etapa 1, y hasta un pico máximo establecido entre las etapas 6 y 7. Para fines de seguimiento del cultivo o bien para fines predictivos de rendimiento, ésta es la etapa de mayor interés, puesto que se puede inferir fácilmente, el valor siguiente.

De acuerdo con el reporte de documentación del experimento, la germinación se pudo observar en el día juliano 33, en tanto que la cosecha no se encuentra reportada por la finalización de la campaña de muestreo antes de que ésta se presentara. Sin embargo, el análisis del comportamiento del IRC o bien de un IV, permite suponer la posible fecha de eliminación de los restos de la cubierta vegetal del cultivo.

Cuadro 4.6. Descripción de algunas etapas del desarrollo del cártamo

Etapa	Descripción
a	Germinación
1	Desarrollo de 10 hojas en roseta
3	Desarrollo de 10 o más ramas
4	Capítulos florales individuales visibles, pero cerrados todavía
5	Capítulos florales individuales visibles desarrollados, pero cerrados todavía
6	Comienzo de la floración: 10 % de las flores abiertas
7	Periodo de plena floración
8	Floración seca en un 50%, inicio de formación de grano
*	Posible cosecha o listo para cosechar

El caso del trigo, se muestra en la Figura 4.10, desafortunadamente, no se cuenta con la correspondiente información a etapas tempranas. Sin embargo, las características de su fisiología, indican que primero alcanza un máximo en crecimiento y actividad fotosintética, para posteriormente, pasar a la etapa de reproducción, es por ello, que en términos generales, es posible apreciar una pequeña meseta. Las mediciones de radiometría de campo, descritas en el Cuadro 4.7, se ubican en fechas cercanas en ésta Figura.

De acuerdo con las información satelital, la mayor para de las mediciones se llevaron a cabo en la etapa senescente del desarrollo de los cultivos.

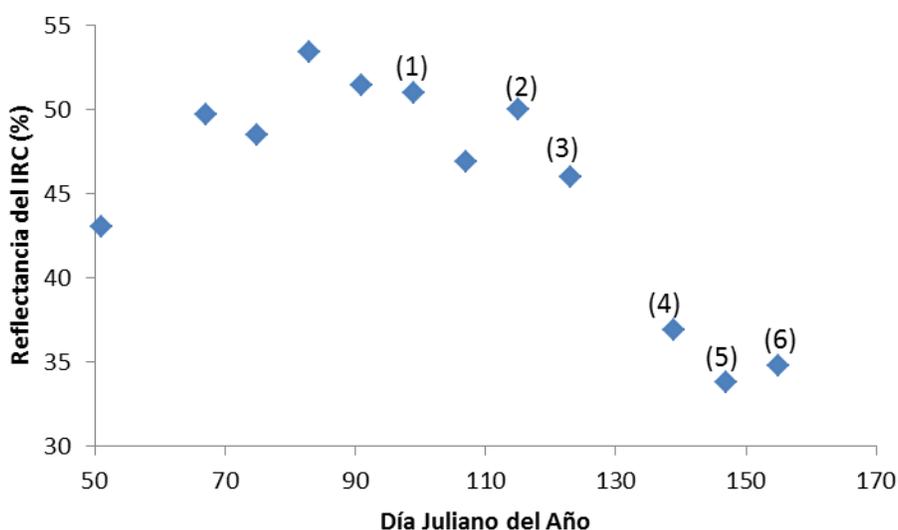


Figura 4.10. Desarrollo multi-temporal del trigo en la reflectancia del IRC

Para facilitar el análisis del caso del trigo, dada la alta frecuencia de parcelas sembradas con éste cultivo, se presentan dos casos adicionales, que permiten conocer otro punto de vista de su desarrollo.

Cuadro 4.7. Descripción de las etapas muestreadas del desarrollo del trigo

Etapas	Descripción
1	Primeras aristas (barbas), visibles (sólo en variedades aristadas)
2	Fin del espigado: la espiga o panícula completamente fuera
3	Grano lechoso tardío
4	Pastoso temprano
5	Madurez completa: grano duro, difícil de dividir con la uña del pulgar
6	Producto cosechado

La oscilaciones en los valores de reflectancia del IRC mostradas en la Figura 4.10, se deben principalmente al cambio de sensor que provee la información y que cuando la corresponde a al sensor ETM+, se tiene ausencia de información que provoca incertidumbre sobre la confiabilidad de la información.

4.3.2 Otros cultivos homogéneos en grandes extensiones con uniformidad de desarrollo.

Los datos presentados en el apartado anterior, corresponden a las mismas parcelas homogéneas, del capítulo previo, donde se llevaron a cabo mediciones radiométricas. En este apartado, se presentan otros cultivos algunos con condición diferentes las presentadas previamente. Debido a la ausencia de información con respecto al manejo del proceso de producción o de las etapas de desarrollo,

solamente se ejemplifican para mostrar el uso de la reflectancia del IRC, extensible a otros tipos de cultivos.

Para corroborar las relaciones encontradas entre el desarrollo de los cultivos y la reflectancia en la banda del IRC, se presentan a continuación algunos casos de cultivos establecidos cubiertos por el mismo juego de imágenes que cubrieron las PH de la campaña de muestreo en el Yaqui.

La Figura 4.11, muestra dos casos de trigo, establecidos en una área aledaña a lo reportado en la PH6, con dos condiciones diferentes: orientación de surcos perpendicular una de otra y distancia entre surcos diferentes.

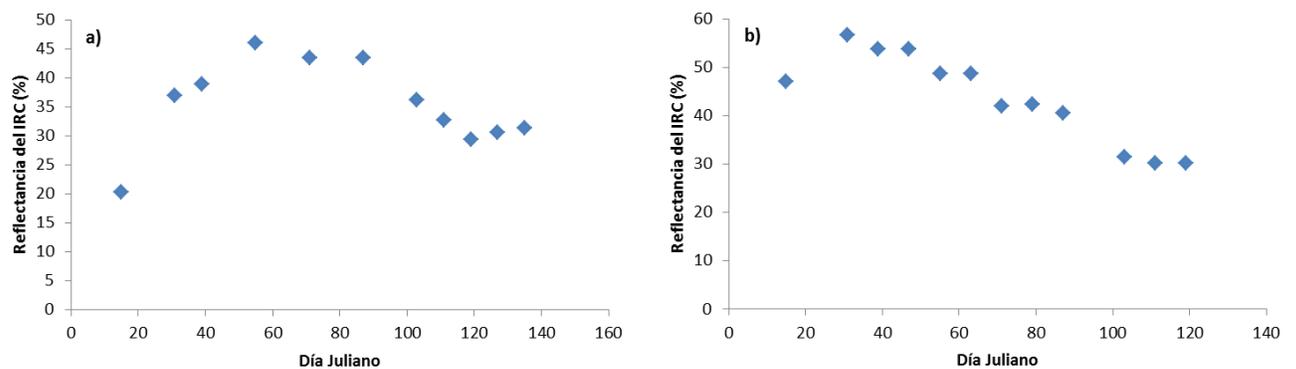


Figura 4.11. Dos casos de trigo a) 99 ha y b) 25 ha

En los casos mostrados en la Figura 4.11, se desconoce la fecha de siembra, sin embargo, se conoce que la distancia entre surcos de la Figura 4.11a, es de 80 cm, mientras que en la Figura 4.11b, es de 1m. Adicionalmente, en el primer caso, la altura promedio de la planta, es de 25 cm, en tanto que para el segundo caso, es de 55 cm.

Los análisis hasta ahora mostrados, han sido realizados sobre cultivos cíclicos donde es posible encontrar patrones de comportamiento, que en general, se ajustan al comportamiento expo-lineal descrito por Goodian y Van Laar (1994).

Para ampliar el rango de análisis del comportamiento del IRC con respecto a cultivos, la Figura 4.12, muestra dos casos de cultivos de naranja, establecidos en el Valle del Yaqui, que servirán de base para estudiar las relaciones entre el IRC y cultivos perennes.

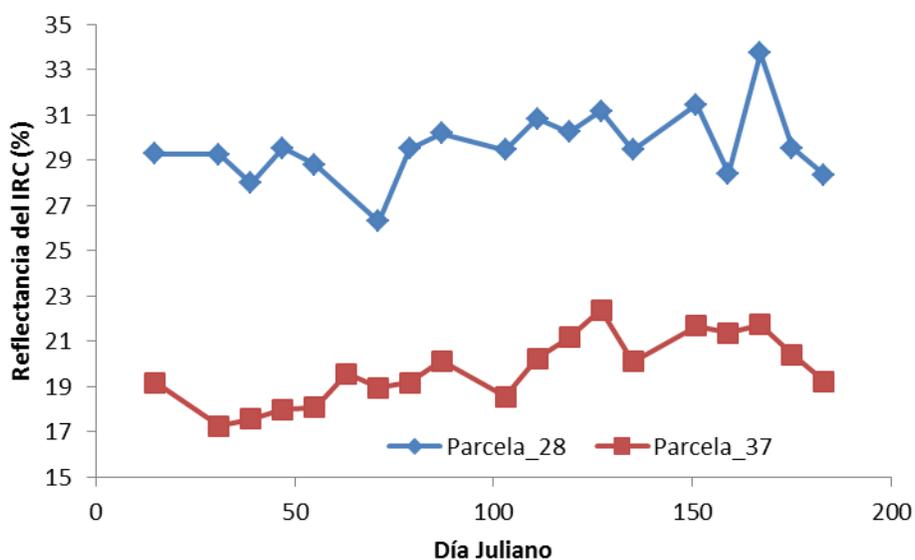


Figura 4.12. Desarrollo multi-temporal del cultivo de naranja

De los casos mostrados por la Figura 4.12, la Parcela_28, tiene altura promedio de siete metros, mientras que la Parcela_37, es de altura promedio de planta de un metro y medio. En ambos casos, la distancia entre surcos es de 80 centímetros. Se observa, que en general, se puede usar la información de la reflectancia del IRC para dar seguimiento al cultivo.

Otro cultivo, sobre el cual no se tomaron mediciones, pero que es posible encontrar de manera cotidiana en el Valle del Yaqui, es el cultivo de Papa. A pesar de que no se cuenta con información sobre el ciclo de cultivo de la papa, la Figura 4.13, muestra el comportamiento multi-temporal de la reflectancia del IRC en una parcela donde se indicó que se trataba del cultivo de papa.

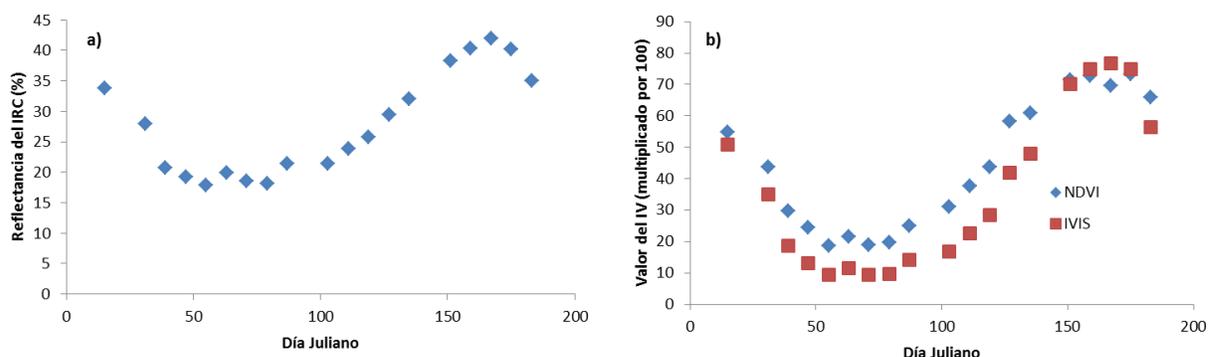


Figura 4.13. Desarrollo multi-temporal de un cultivo de papa. a) Con relación al IRC, b) Con relación a dos IV

En general, sea o no papa, o cualquier otro cultivo, este es uno de los casos, donde es posible encontrar las curvas de crecimiento estilizadas, pudiendo mostrarse las etapas del desarrollo expo-lineal. La Figura 4.13a, exclusivamente para el desarrollo temporal con respecto al IRC, mientras que la Figura 4.13b, mostrándolo para dos IV, el NDVI (Tucker, 1979), que es todo un clásico y el IVIS (Paz *et al.*, 2011), donde, en ambos, casos en términos generales, es posible tener la misma curva estilizada.

A pesar de todas las críticas al NDVI, es posible plantear su uso, debido a que el suelo, no se cubre completamente, así que los problemas de saturación de la información en la banda del R, son relegadas a segundo término. En campo, es

demasiado común encontrar condiciones de cultivo, que no cubren perfectamente el suelo, en estas condiciones, la información integrada en un píxel, se comporta de manera similar a cuando se hacen mediciones terrestres de radiometría sobre cultivos con cobertura parcial.

4.3.3 Cultivos heterogéneos en superficies pequeñas con perturbaciones atmosféricas frecuentes

Hasta ahora, los análisis de han realizado con grandes extensiones de terreno, con cultivos relativamente homogéneos o con homogeneidad comprobada en campo. Las imágenes satelitales, generalmente, tienen pocas perturbaciones atmosféricas, por tanto se tiene mayor estabilidad de la información al momento de plantear el uso de algún IV.

A pesar de ello, se planteó el uso de la reflectancia del IRC, en razón de que para la mayoría de los cultivos analizados, tiene gran estabilidad de la información para fines de monitoreo del estado actual de desarrollo, sin dejar de lado, que las grandes extensiones en las que se establecieron los cultivos, y las condiciones de la técnica de producción, producen resultados cuasi-homogéneos a nivel satelital, lo que permite generalizar la información a nivel parcelario.

Analizando las condiciones de cultivos de caña de azúcar, se sabe que su ciclo, dependiendo de la variedad, tarda varios meses, en vista de ellos, en el análisis realizado en el estado de Morelos, los días julianos del año 2011, fueron adicionados a los de 2010, para tener una sola línea de tiempo continua.

Mediante un análisis multi-temporal, la Figura 4.14, muestra los detalles de una parcela sembrada con caña de azúcar. La Figura 4.14a, muestra el desarrollo del cultivo con relación a la reflectancia en la banda del IRC, en tanto que la Figura 4.14b, muestra el desarrollo utilizando un índice de vegetación, este caso, solo se presenta con fines ilustrativos.

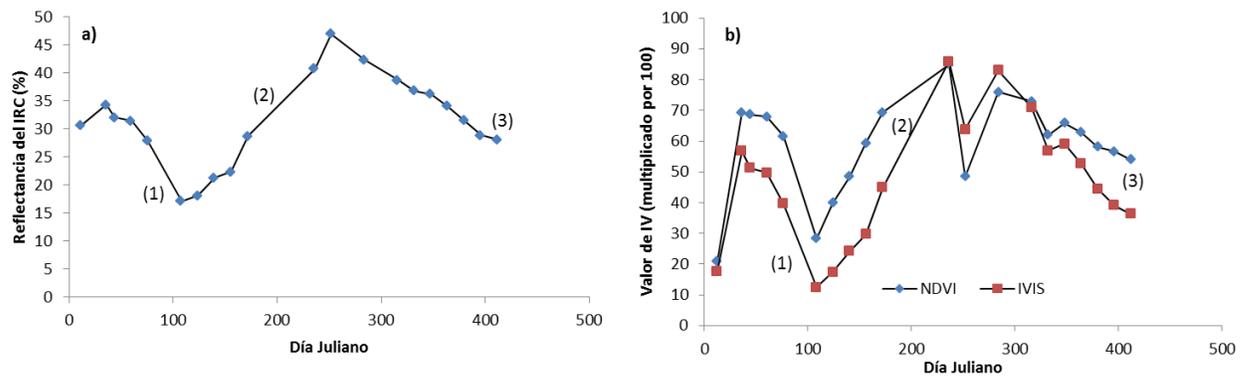


Figura 4.14. Desarrollo multi-temporal en caña de azúcar. a) con respecto a la reflectancia del IRC y, b) con respecto a dos IV

En general, la caña de azúcar tiene un ciclo de desarrollo tal que alcanza sus tasas máximas de producción vegetativa alrededor del tercero al quinto mes después de la plantación, alcanzando su mayor IAF, esto en las condiciones óptimas, si la temperatura descende, retrasa el ciclo de producción de tal manera que se puede presentar un ligero retraso con respecto al ideal.

El cultivo de la Figura 4.14, es sobre una superficie de nueve hectáreas, la variedad establecida, es Mex-79-431, sembrada el primero de abril de 2010, con fecha de fertilización el 30 de junio de 2010, la suspensión del riego, fue el siete de febrero de 2011, dando un rendimiento de 115 toneladas por hectárea, se trata de una resoca uno. En la Figura 4.14, se marcaron tres estadios, el “1” representa la

fecha aproximada de la siembra, que se da en algún momento antes del dato del día juliano 103, la fertilización, fue realizada entre los datos obtenidos en el día juliano 172 y el 236, mientras que la suspensión del riego, fue entre el día juliano 396 y el 412.

El comportamiento mostrado en la Figura 4.14b, se presenta en la mayoría de los cultivos analizados, posiblemente debido a los efectos atmosféricos con influencia sobre la reflectancia en la banda del R. Los análisis llevados a cabo en maíz (no mostrados aquí), nopal y caña de azúcar, tienen este comportamiento, a diferencia de los comportamientos analizados en el Valle del Yaqui. Sin embargo, el comportamiento discontinuo de los IV en el tiempo, con el tipo de sobresaltos mostrados en la Figura 4.14b, se repiten más de una vez durante el desarrollo del cultivo, lo cual, por la duración del ciclo es mucho más marcado en caña de azúcar.

La Figura 4.15, muestra otro caso del cultivo de caña de azúcar analizado durante el año 2010 y parte de 2011. Debido a la disponibilidad de imágenes por parte del USGS, no fue posible obtener imágenes posteriores a febrero de 2011.

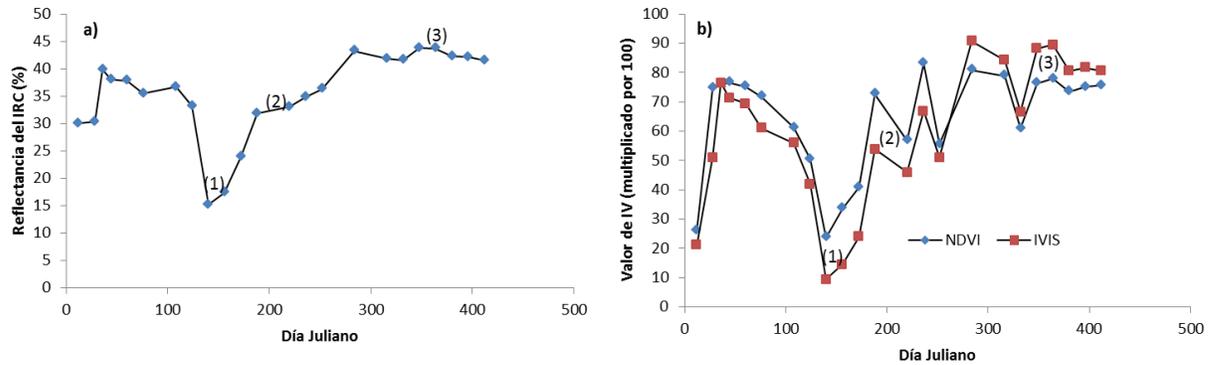


Figura 4.15. Desarrollo multi-temporal de otro cultivo de caña, a) con respecto al IRC, b) con respecto a dos IV

En la Figura 4.15, se encuentran marcadas de manera aproximada algunas fechas, por ejemplo el “1”, se refiere a la fecha de plantación, por otro lado “2” se refiere a la fecha de fertilización, mientras que “3” es la fecha de suspensión del riego. Debido que las fechas de éstas actividades, no coinciden con las de toma de las imágenes, en la Figura 4.15, éstos se muestran de manera aproximada. El rendimiento en esta parcela, fue de 125 toneladas por hectárea, con la misma variedad que la mostrada en la Figura 4.14. Los datos de la Figura 4.15, corresponden a una soca.

Los resultados mostrados por la Figura 4.15b, confirman lo discutido con respecto a la Figura 4.14b, donde es posible tener inconsistencia o bien inestabilidad en la información al aplicar un IV, para fines de seguimiento del estado de desarrollo de un cultivo o bien plantear alguna metodología para la estimación del rendimiento.

El análisis hasta aquí presentado se puede hacer extensivo a diversos casos en el Estado de Morelos, en general, el comportamiento mostrado por los cultivos en Morelos, es el mismo que se encontró al analizar parcelas de maíz en Jalisco (no

mostrados aquí), inconsistencias en IV que dificultan conocer el estado de desarrollo actual del cultivo y la obtención de valores con fines predictivos de rendimientos.

4.4 CONCLUSIONES

Las discusiones aquí presentadas, permiten llegar a algunas conclusiones:

La información de la reflectancia del IRC obtenida por sensores a bordo de plataformas satelitales, puede ser utilizada confiablemente para el monitoreo del estado actual de desarrollo de los cultivos.

Generalmente, en campo, los cultivos cíclicos con coberturas parciales del suelo al analizarlas con imágenes de satélite, se comportan como los cultivos en fase de desarrollo medidos en condiciones controladas, introduciendo un ruido en estimaciones de comportamientos futuros

Es importante conocer la fenología del cultivo, para establecer metodologías para un sistema de monitoreo del estado de desarrollo y predicción del comportamiento del mismo.

Los análisis aquí mostrados, fueron realizados sobre parcelas con certeza total del cultivo establecido, la implementación masiva de este trabajo a grandes áreas, implica necesariamente la disponibilidad de un catastro de parcelas y cultivos y, el conocimiento de la fenología de los cultivos establecidos.

4.5 LITERATURA CITADA

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(4):349-361.

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.

Goudriaan, J., and H.H. van Laar. 1994. Modeling potential crop growth processes. Textbook with exercises. *Current Issues in Production Ecology*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. 238 p.

Jacquemoud, S. W. Verhoef, F. Baret, C. Bacourd, P. Zarco-Tejada, G. Asnerf, C. Francois y S. Ustin. PROSPECT+SAIL models: A review of use for vegetation characterization. *Remote sensing of Environment*. 113 (2009) S56–S66

Kuusik, A. 2001. A two-layer canopy reflectance model. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 71:1-9.

Palacios, L. A., F. Paz, J. L. Oropeza, B. Figueroa, M. Martínez, C. Ortiz y A. Exebio. 2006. Clasificador Genérico de Objetos en Imágenes ETM+. *Agrociencia* 40-5:613-626

Palacios, L. A. 2007. Corrector Atmosféricos en Imágenes Landsat. Tesis Doctoral. Colegio de Postgraduados. 92 pp.

Paz M., 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. 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

Privette, J. 1994. An efficient strategy for the inversion for bidirectional reflectance models with satellite remote sensing data. Ph.D. thesis, University of Colorado. 200 p

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: 125-141.

CAPÍTULO 5. UNA APROXIMACIÓN AL SEGUIMIENTO DEL ESTADO DE DESARROLLO DE CULTIVOS Y LA ESTIMACIÓN DE RENDIMIENTOS

RESUMEN

Utilizando información de reflectancia en el IRC obtenida por sensores remotos satelitales, se estableció un sistema seguimiento multitemporal a nivel pixelar para el monitoreo del estado de desarrollo de cultivos en una parcela, referidos a los valores máximos encontrados en un área de interés. A continuación, mediante un análisis similar, se obtuvieron las tasas de crecimiento relativo encontradas entre dos periodos de información satelital. Posteriormente, después de revisar brevemente el comportamiento entre la Biomasa y la reflectancia del IRC, se propuso un esquema para estimar el rendimiento potencial, basado en el conocimiento de las relaciones entre curva de crecimiento y la evolución multitemporal de los valores de reflectancia del IRC; el esquema predictivo, requiere saber con antelación el máximo desarrollo esperado en condiciones óptimas de los cultivos. Un análisis de los errores de estimación, permitió conocer a detalle el comportamiento de las estimaciones, concluyendo que puede utilizarse confiablemente.

Palabras clave: Estimación de Rendimientos, estado de desarrollo, Crecimiento Relativo, reflectancia del IRC, modelación de cultivos, análisis multitemporal

5.1 INTRODUCCIÓN

Gran parte de los estudios llevados a cabo con los sensores remotos, se utilizan para dar seguimiento a los diferentes estratos de vegetación. Particularmente, se han utilizado para el monitoreo del estado de desarrollo y la estimación del potencial productivo.

Particularmente, con respecto al potencial productivo, diversos autores, han desarrollado y puesto en ejecución metodologías que les permiten aproximar los rendimientos esperados en parcelas de cultivos. Así, algunos han relacionado directamente los Índices de Vegetación (IV) con la fracción de la radiación fotosintéticamente activa (f_{par}) y ésta con el (Índice de Área Foliar) IAF (Baez *et al*, 2002; Baez *et al*, 2005; entre otros), para la estimación del potencial productivo incorporando el acoplamiento con modelos de simulación como el EPIC (Sharpley y Williams, 1990).

Otros trabajos se han desarrollado bajo la premisa de que hay una relación directa entre el IV y la acumulación de materia seca para determinar el potencial productivo de un cultivo (Calera *et. al*, 2004; Palacios *et. al*, 2010). Sin embargo, hasta ahora, la mayor parte de los trabajos han tenido resultados poco confiables y demasiado tarde, que salen del control para fines de planeación.

En la porción Noroeste del País, algunos autores (Palacios *et. al*, 2010; Palacios *et. al*, 2011) han estado trabajando, con el acoplamiento de información de los

sensores TM y ETM+, para la estimación de índices de interés a los productores; esto incluye, IV, Índice de Estrés de Humedad. Posteriormente, relacionaron los valores promedio de los índices y del consumo de agua con los rendimientos de trigo en el Distrito de Riego Río Mayo.

En seguimiento a las discusiones presentadas con anterioridad, en este capítulo se estudia la reflectancia del Infra-Rojo Cercano (IRC) como herramienta de análisis para conocer el estado de desarrollo de cultivos y el potencial productivo del mismo.

5.2 MATERIALES Y MÉTODOS

Para conocer el estado actual de desarrollo de los cultivos, se puede plantear de dos maneras: la primera, conocer el estado de desarrollo relativo en la fecha actual y el segundo, es conocer el estado de desarrollo relativo entre fechas de imágenes satelitales.

Debido a los problemas de bandeo de las imágenes obtenidas con el sensor ETM+, se seleccionó una de las PH con cultivo reportadas en la campaña de Muestreo, donde fuera posible estudiar el comportamiento de la reflectancia satelital, con la mayor cobertura de información útil.

Así, se separó una porción del polígono original, tomando en cuenta la mayor área de análisis posible con el mínimo de problemas debidos al bandeo. De esta manera, la Figura 5.1, muestra la porción de la parcela original, a la que se llamó Polígono de Análisis o Sub-Parcela, que se utiliza en los análisis que se discuten más adelante.

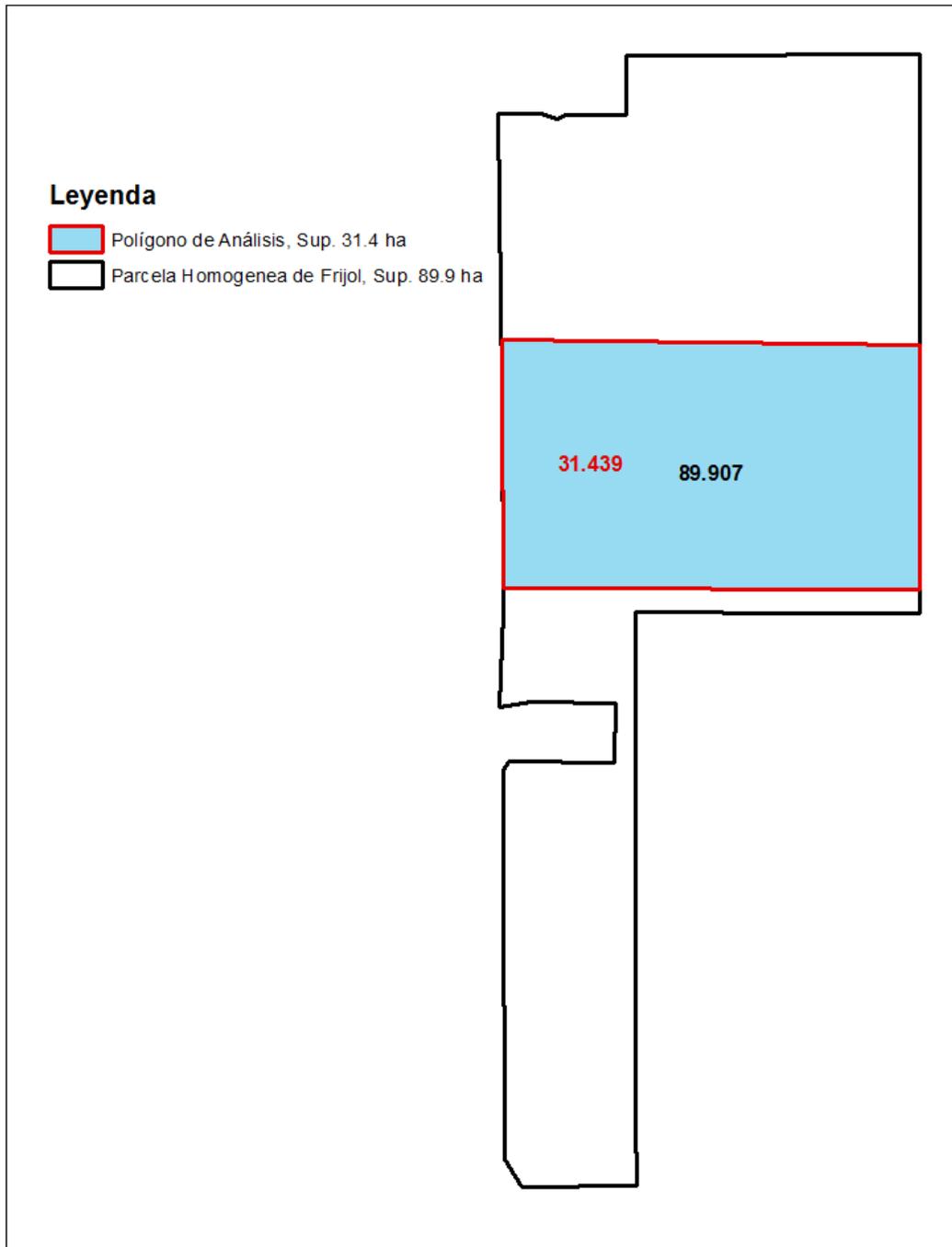


Figura 5.1. Delimitación de Sub-Parcela, para análisis

Al tener un área diferente de la inicial para el resto del trabajo, se procedió a realizar un análisis del comportamiento general del cultivo de frijol en esta sub-parcela.

5.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Después de separar el área de interés, se le conformó su base de datos correspondiente de reflectancia en las bandas espectrales del R e IRC.

La Figura 5.2, muestra el comportamiento multi-temporal del cultivo de frijol en la Sub-Parcela, a través del valor de la reflectancia del IRC con respecto a los días después de la siembra.

La siembra, se realizó en el Día Juliano (DJ) 58, por lo que es frecuente que se mencione a veces Días Después de la Siembra (DDS) y en otras ocasiones se haga referencia al DJ.

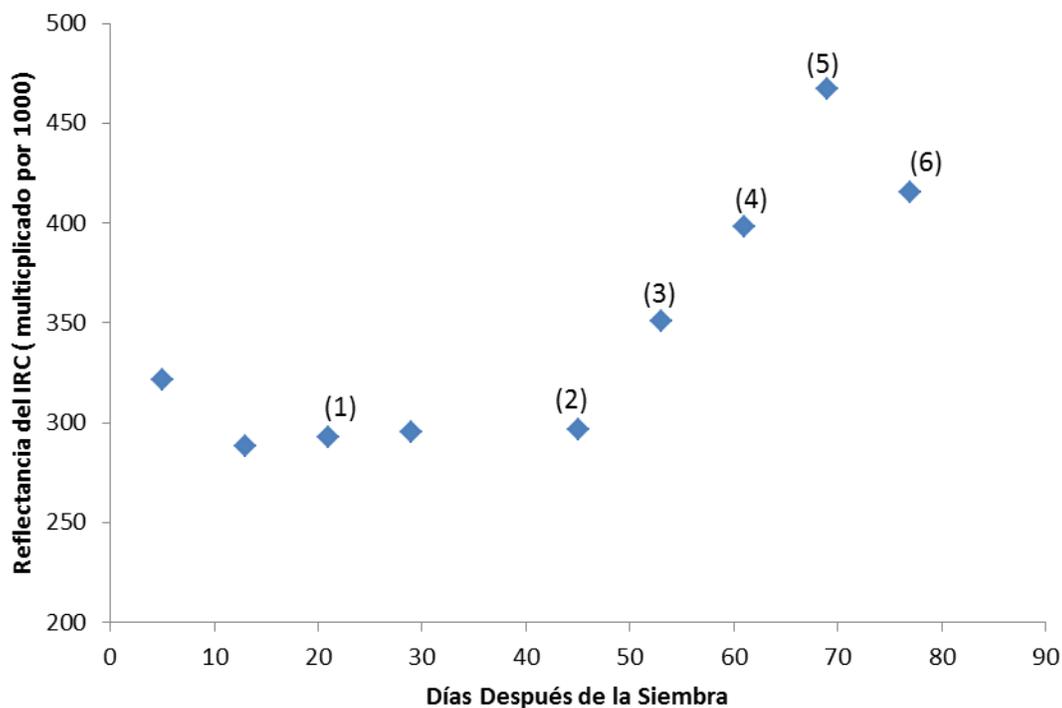


Figura 5.2. Etapas visibles del frijol en la sub-parcela de análisis

Las etapas numeradas en la Figura 5.2, son como a continuación se describe brevemente: 1, Segundo trifolio y aparición del tercero; 2, primeras flores abiertas muy esporádicamente; 3, el 10% de las vainas alcanza la longitud típica; 4, el 30% de las vainas alcanza la longitud típica; 5, el 50% de las vainas alcanza la longitud típica; 6, el 10% de las vainas están maduras.

El orden de las etapas, es como van apareciendo en el tiempo. La fecha de aparición, fue de la siguiente manera: 1, al DJ 79 o 21 DDS; 2, al DJ 103 o 45 DDS; 3, al DJ 111 o 53 DDS; 4, al DJ 119 o 61 DDS; 5, al DJ 127 o 69 DDS; 6, al DJ 135 o 77 DDS.

5.3.1 Estado de desarrollo relativo del cultivo por fecha

Para esta parte se debe proceder a ubicar el pixel con el valor más alto de reflectancia del IRC en cada fecha que interese analizar. Éste pixel, será utilizado como pixel de referencia para el resto de los pixeles. Así, se calcula el porcentaje del valor de cada pixel restante con respecto al pixel del valor más alto o de mejor desarrollo. Posteriormente, se mapean todos los valores, interpolando los datos por la totalidad de la parcela.

En los análisis aquí mostrados, la interpolación fue realizada utilizando el Método de Krigging en una malla de cinco metros de tamaño de pixel. De esta manera, la Figura 5.3, muestra el mapa de desarrollo relativo del cultivo de frijol, a los 45 días después de la siembra.

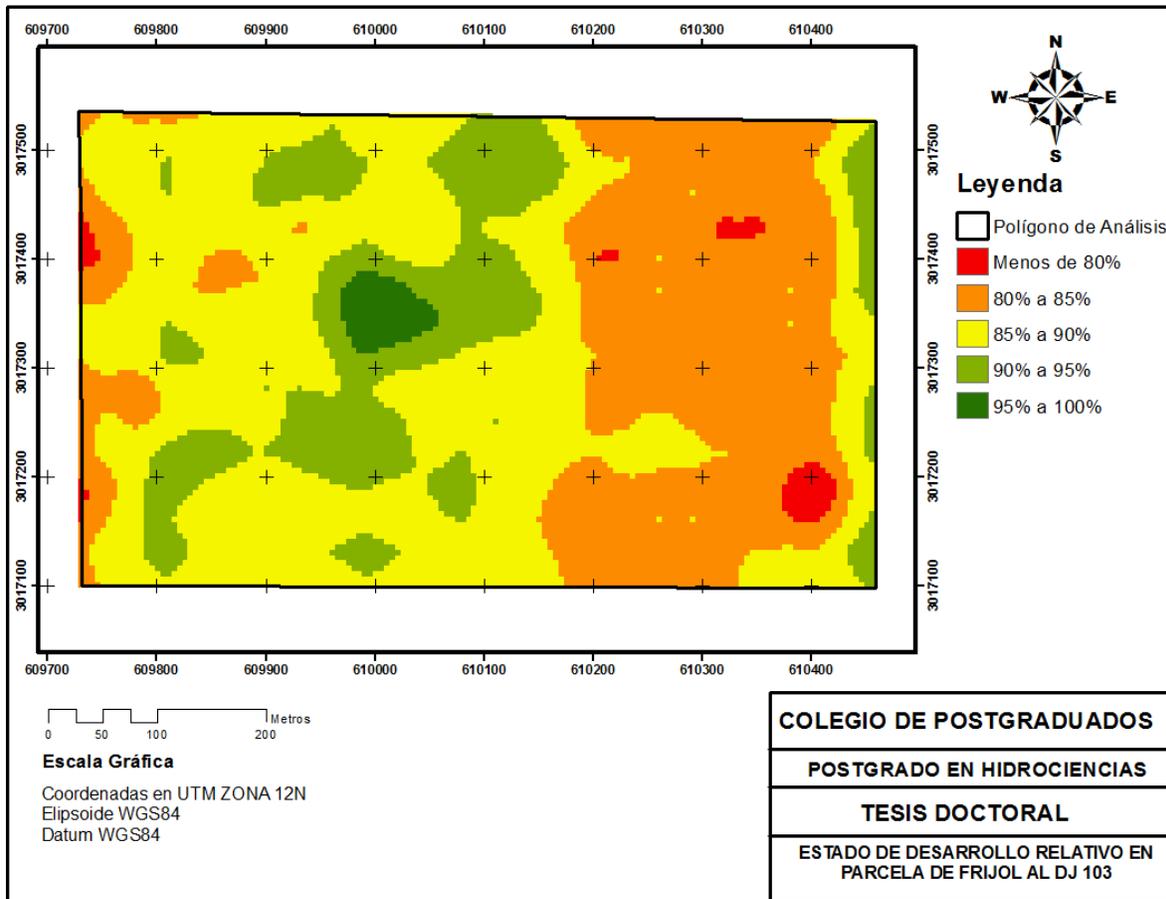


Figura 5.3. Desarrollo Relativo del Frijol al DJ 103, 45 DDS

En general, debido a la alta homogeneidad del desarrollo del cultivo, se optó por estratificar en clases de intervalos de cinco a partir de 80, debido a que los valores son muy homogéneos, con poca variación.

Analizando la figura, se observa que los pixeles con el mejor índice de desarrollo, se localizan en la parte central de la parcela, en tanto que los que tienen el menor índice de desarrollo, están ubicados en zonas aisladas, concentrándose un pequeño grupo hacia la esquina inferior derecha.

De manera similar, en la Figura 5.4, es posible observar el mapa de desarrollo relativo del cultivo de frijol, al DJ 111, el procedimiento para la obtención del mapa, es como ya se apuntaba anteriormente.

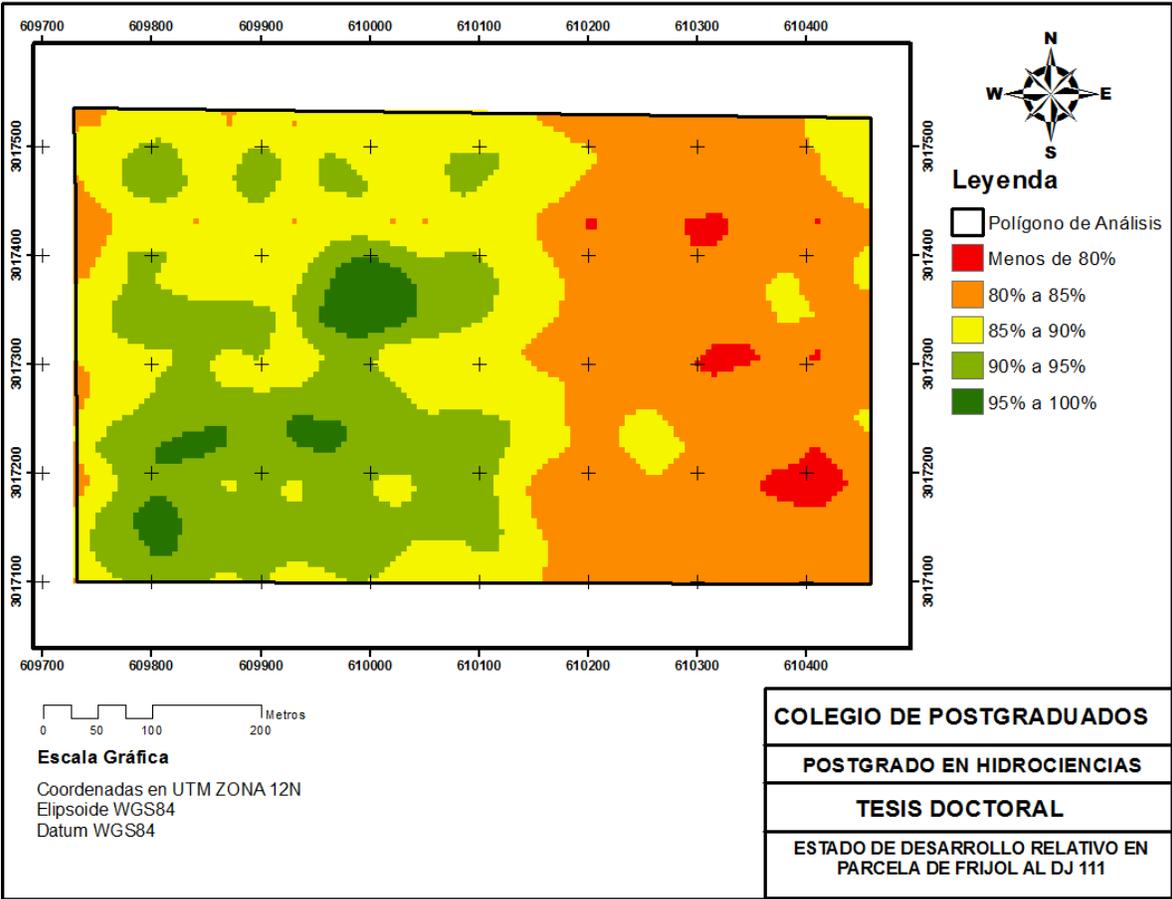


Figura 5.4. Desarrollo Relativo del Frijol al DJ 111

Debido a la alta homogeneidad del desarrollo del cultivo, se escogió la misma escala de visualización que en el caso de la Figura 5.3. Los pixeles con el mejor desarrollo, son los que se encuentra en la parte central y hacia la esquina inferior izquierda. En tanto que los valores más bajos de desarrollo, se ubican de la parte central y hacia la derecha del polígono

La Figura 5.5, muestra los resultados obtenidos para el DJ 119, se observa que los pixeles ubicado en las orillas, comienzan a presentar menor índice de desarrollo, sin que esto llegue a ser alarmante, los valores más bajos de porcentaje de desarrollo con respecto al máximo, son del 78%, por lo que este mapa, solo permite conocer el estado actual de desarrollo.

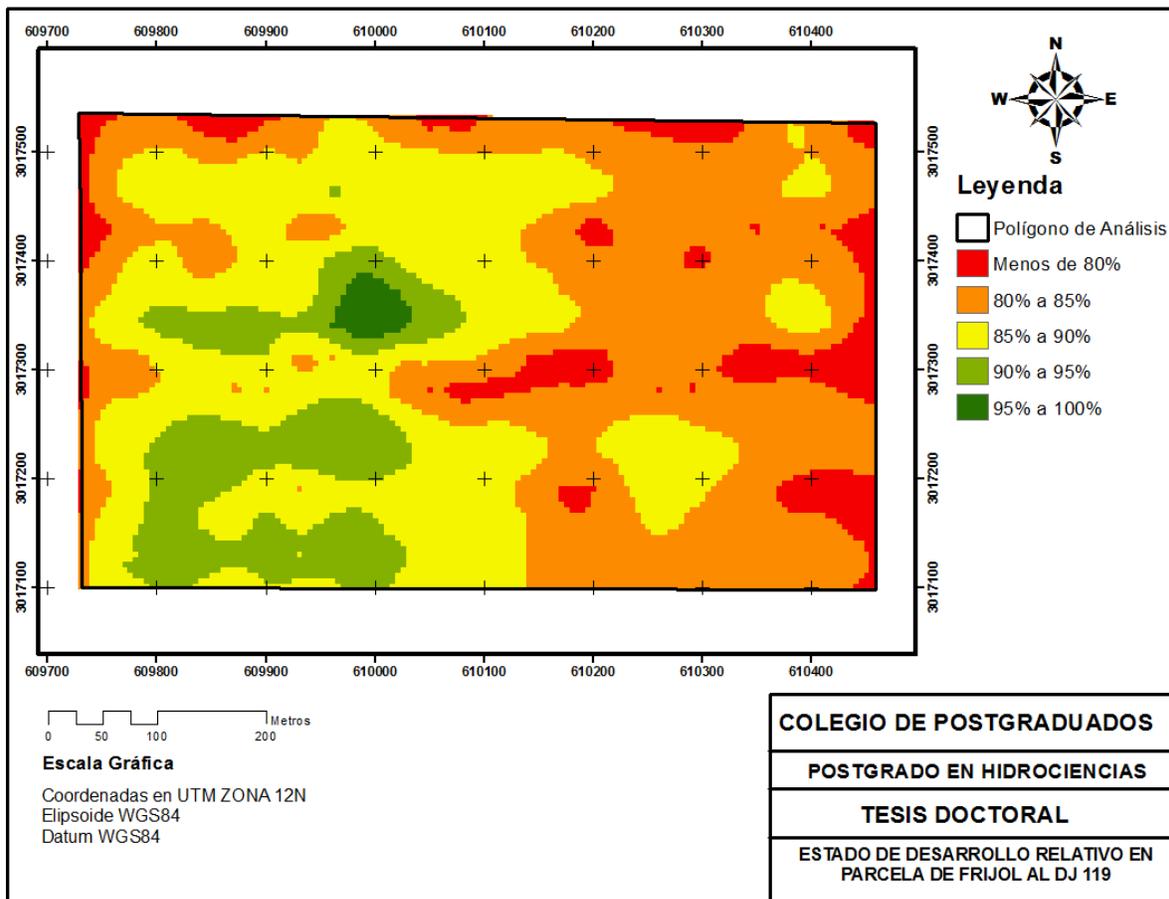


Figura 5.5. Desarrollo Relativo del Frijol al DJ 119

En caso de alguna incidencia de plagas y/o enfermedades, el porcentaje de desarrollo relativo, sería más bajo del 50%, con lo cual se podrían establecer alarmas. Los mejores pixeles, siguen siendo de la parte central hacia la izquierda y hacia la parte inferior.

De acuerdo con los análisis de las reflectancias promedio en la parcela, los valores más altos de reflectancia del IRC, se obtuvieron en el DJ 127. Ésta es la fecha en la cual el 10% de las vainas se encuentran maduras, a pesar de que mantiene la actividad fotosintética, comienza el declive en este punto, ya que la planta comienza a perder hojas con mayor velocidad, iniciando así la etapa senescente del cultivo.

Por otro lado, en la Figura 5.6, se muestran los resultados obtenidos en el Dj 12, se observa que los píxeles con mejor desarrollo, son muy similares a los casos anteriores, en tanto que los de desarrollo más bajo, son los de las orillas de la parcela.

Los casos aquí mostrados, permiten monitorear en cada momento el estado de desarrollo de los cultivos con respecto a los máximos locales encontrados en cada imagen, de tal manera que si se obtuvieran valores demasiado bajos se observaría una gran varianza en los porcentajes de desarrollo relativos; esto, sería motivo de emitir alarmas sobre los píxeles que presenten esos casos.

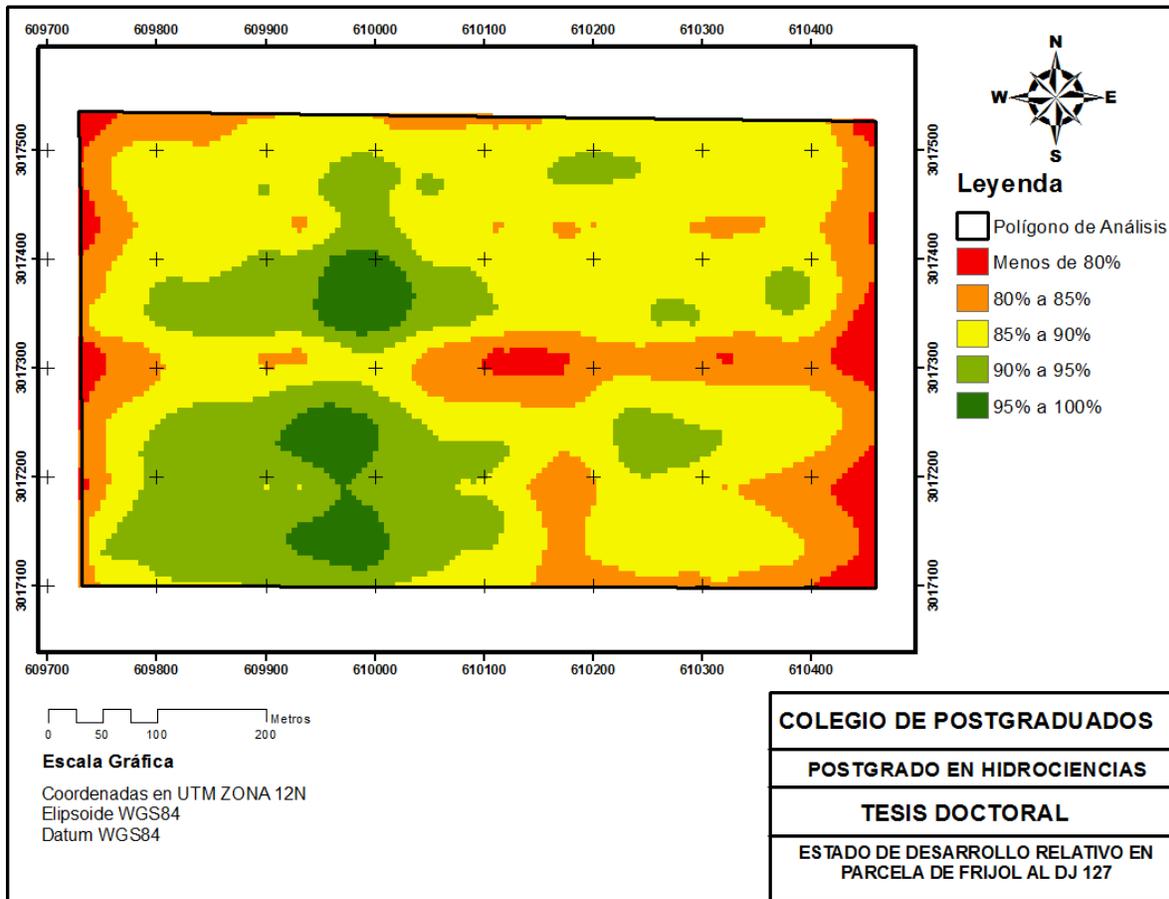


Figura 5.6. Desarrollo Relativo del Frijol al DJ 127

En todo momento, hace falta determinar los valores críticos a partir de los cuales se pueden considerar como regulares las variaciones encontradas y cuando es necesario emitir alarmas para estudiar los casos a detalle y determinar las causas de los bajos índices de desarrollo.

En casi todos los casos aquí presentados, un grupo de pixeles, ubicados alrededor de las coordenadas $X=610400$ e $Y=3017200$, se observan bajos valores de desarrollo relativo, lo cual podría abrir un primer foco de atención para analizar las posibles causas de éste comportamiento.

5.3.2 Crecimiento relativo del cultivo entre fechas

A continuación se procede a comparar las razones de cambio en la reflectancia del IRC, que se ha estado utilizando como indicativo de cantidad de vegetación. Así, la variación en la reflectancia del IRC de una fecha a otra, indica la cantidad de crecimiento de la vegetación por pixel.

El procedimiento es similar a lo sostenido en el apartado anterior. Se obtiene la diferencia de valores de reflectancia del IRC en cada pixel, entre dos fechas consecutivas de imagen o el periodo que se desea analizar. En este trabajo se aborda por dos fechas consecutivas. Se escoge el pixel con la mayor razón de cambio y a continuación, con base en ello, se calcula el porcentaje de crecimiento del resto de los pixeles.

Con base en lo anterior, en la Figura 5.7, provee información visual sobre la tasa de crecimiento o crecimiento relativo que se encontró al analizar la información de la reflectancia del IRC entre el DJ 103 y el DJ 111. La mayor tasa de crecimiento, se encontró en la parte cercana a la esquina inferior izquierda, mientras que en la parte central y hacia la derecha, los valores son menores de 60%, llegando en las orillas a ser menor o igual al 50%

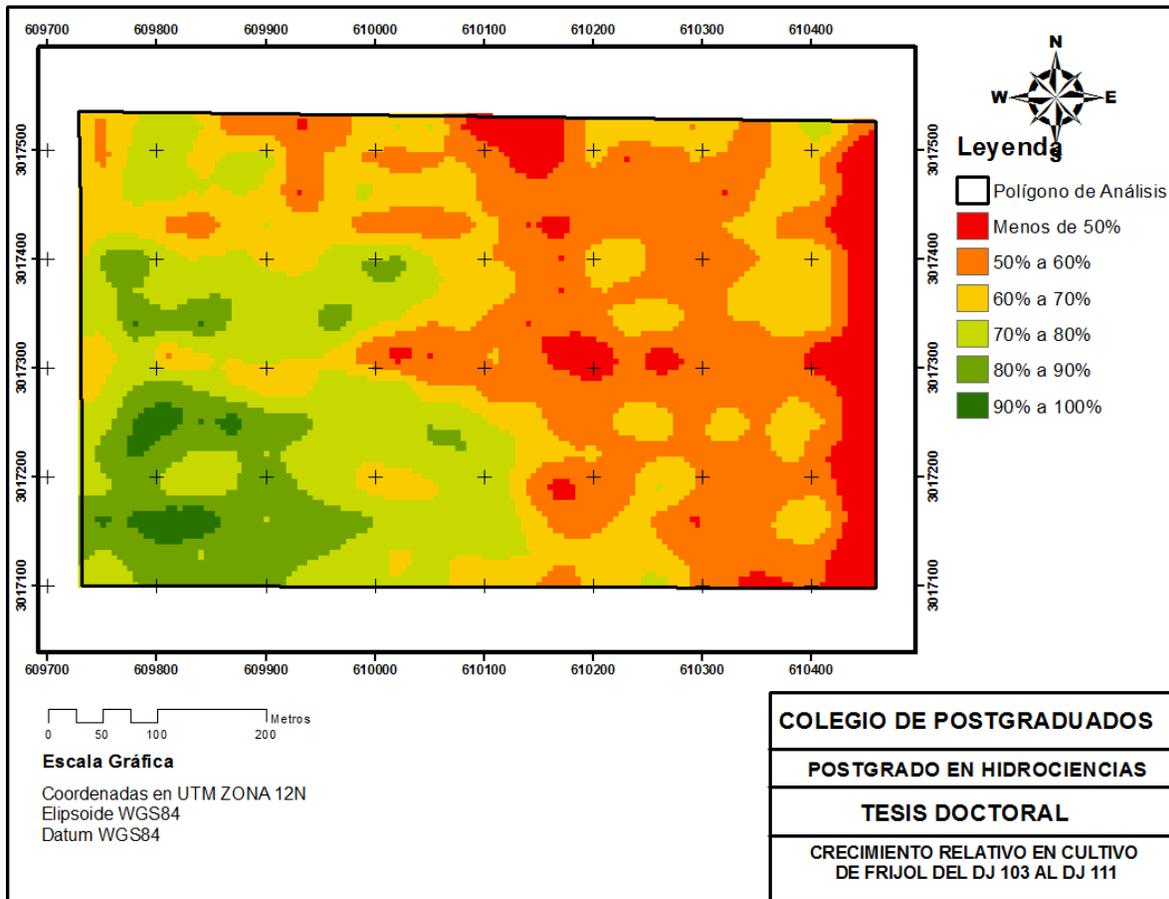


Figura 5.7. Crecimiento Relativo del Frijol entre el DJ 103 y el DJ 111

Por otro lado, la Figura 5.8, muestra los resultados obtenidos para el periodo comprendido entre el DJ 111 y el DJ 119. En general es posible apreciar altas tasas de crecimiento relativo, con excepción de una pequeña porción en la parte central y en las orillas, donde se puede apreciar crecimientos iguales o inferiores de 50%.

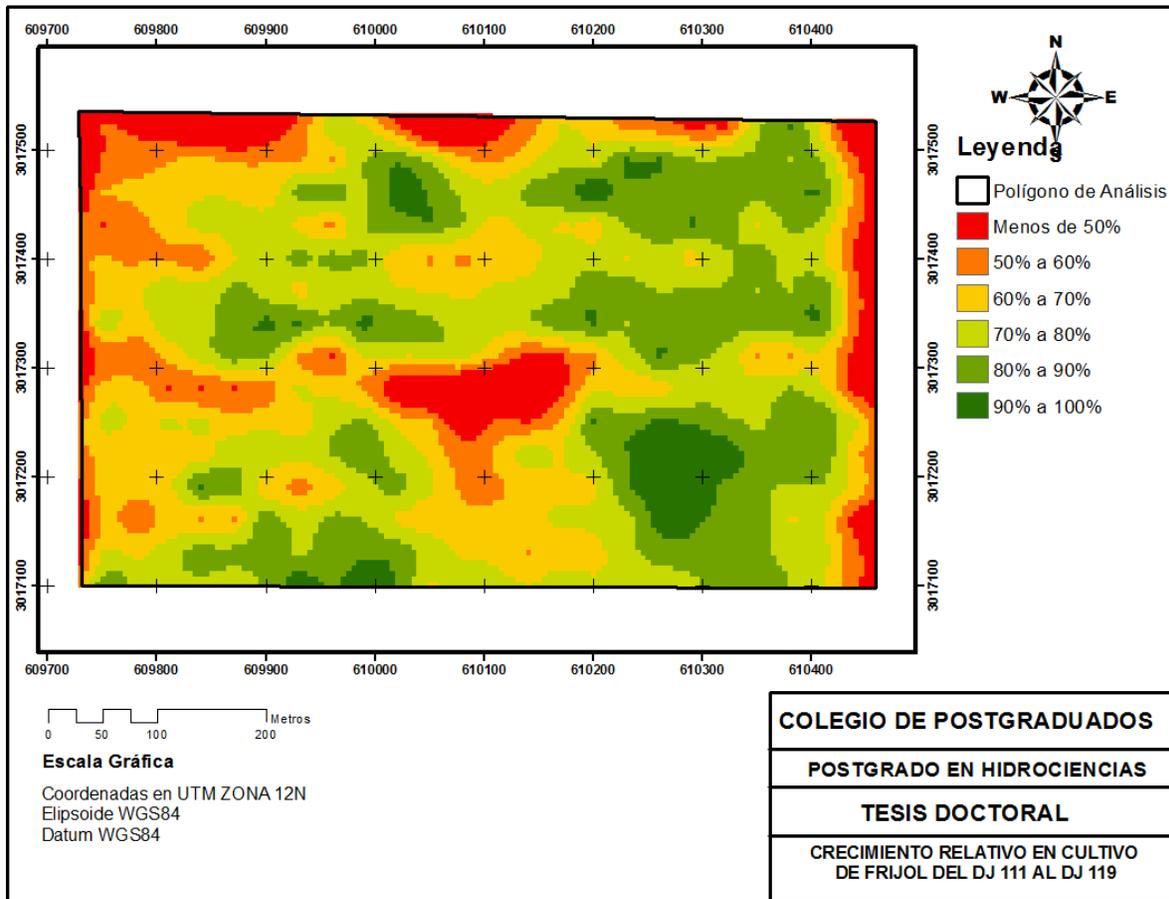


Figura 5.8. Crecimiento Relativo del Frijol entre el DJ 111 y el DJ 119

La Figura 5.9, muestra los resultados al mapear la diferencia de reflectancia del IRC entre el DJ 119 y el DJ 127. Los mayores valores de crecimiento, se obtuvieron en la parte central hacia la derecha, en tanto que los menores crecimientos se obtuvieron en la parte central hacia la inferior y en las orillas izquierda y derecha.

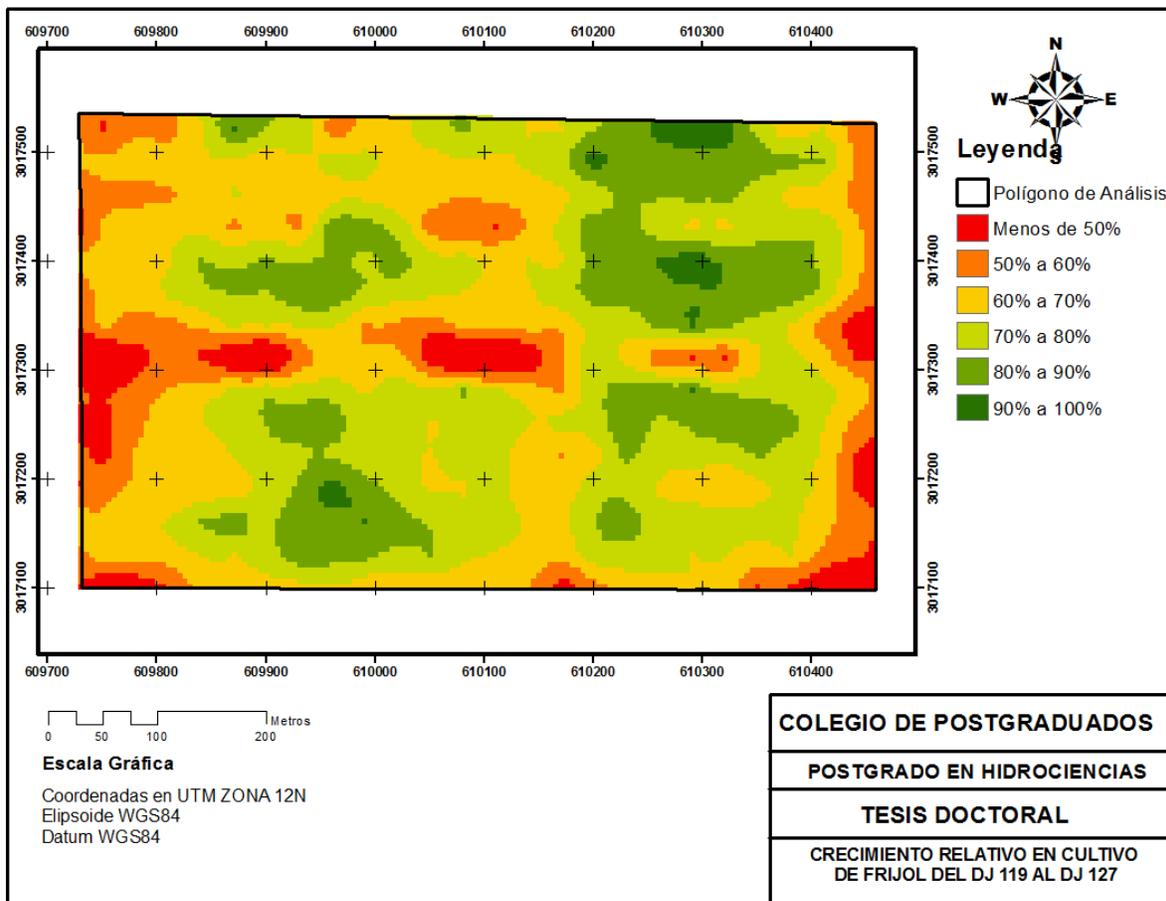


Figura 5.9. Crecimiento Relativo del Frijol entre el DJ 119 y el DJ 127

En general, tanto en el análisis del estado de desarrollo relativo, como en el crecimiento relativo, entre imágenes, se observan bajos valores alrededor de las coordenadas X=610100 a X=610200 y la coordenada Y=3017300, lo cual si bien no puede llegar a ser alarmante, sería conveniente revisar el motivo por el cual tiene baja tendencia al desarrollo del cultivo. En el resto de los pixeles, aunque se presentan variaciones a la alta y la baja, no hay un tendencia marcada, por lo que podrían en cierto modo pasarse a consideración secundaria.

5.3.3 Cálculo del Rendimiento Potencial

El seguimiento del desarrollo de los cultivos y la detección de lugares prioritarios de atención, constituye la primera de éste capítulo. En los sucesivo, la discusión se centra en el uso de que se puede dar a ésa información, para la obtención de información tendiente a conocer el rendimiento en los cultivos. De acuerdo con los resultados obtenidos de la fase experimental llevada a cabo en el Yaqui, es posible plantear las siguientes discusiones.

Consideraciones sobre la Biomasa y el IRC

De la información presentada en la Figura 5.2, se observa que los máximos valores de reflectancia del IRC ocurren en el DJ 127. Por lo tanto es en el periodo que va del inicio del ciclo y hasta esta fecha, cuando interesa analizar las condiciones de producción de la biomasa con respecto a la reflectancia del IRC, que se ha presentado aquí como elemento de monitoreo.

Concretamente con respecto a la Biomasa, la Figura 5.10, muestra el desarrollo multi-temporal de la Bm fresca total. Al final del ciclo, posterior al DJ 127, los valores disminuyen, debido a que la planta se encuentra en fase senescente, con marchitamiento evidente y con ello, bajo contenido de agua en los órganos. Por lo anterior, será necesario analizar la Bm seca, que se presenta más adelante.

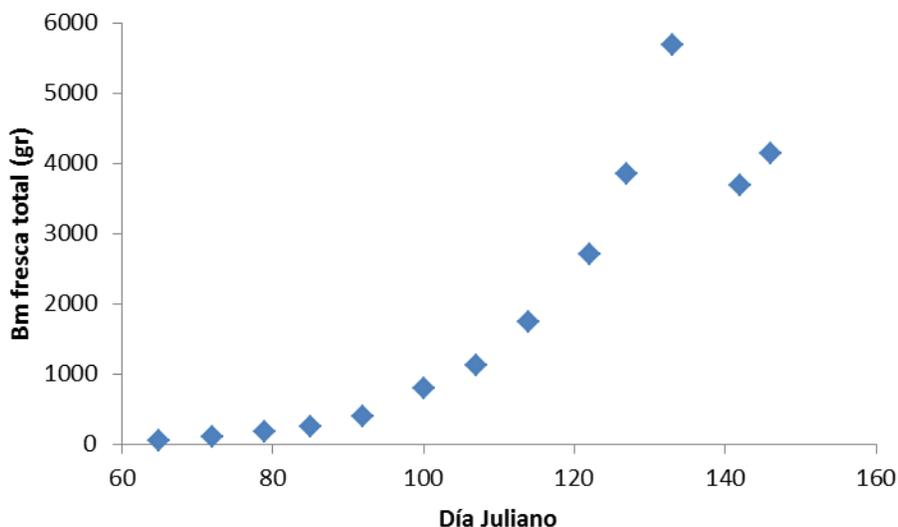


Figura 5.10. Desarrollo temporal de la Bm fresca en frijol

En la Figura 5.11, se observa el comportamiento de la reflectancia del IRC y la Biomasa (Bm) fresca medida en campo, se ha tomado en cuenta desde el inicio del ciclo y hasta el DJ 127. Se observa que existe un comportamiento lineal entre la Bm y la reflectancia del IRC, por lo que conociendo éstos valores, es posible inferir sobre la cantidad de Bm presente.

Por otro lado, la relación existente entre la Bm fresca aérea y la Bm seca aérea calculados a través de muestras destructivas en la parcela homogénea de frijol, es mostrada por la Figura 5.12. Con los datos de la Figura 5.12, es posible inferir, que existe una relación lineal, similar a la mostrada en la Figura 5.11, pero entre la reflectancia del IRC y la producción de Bm seca aérea.

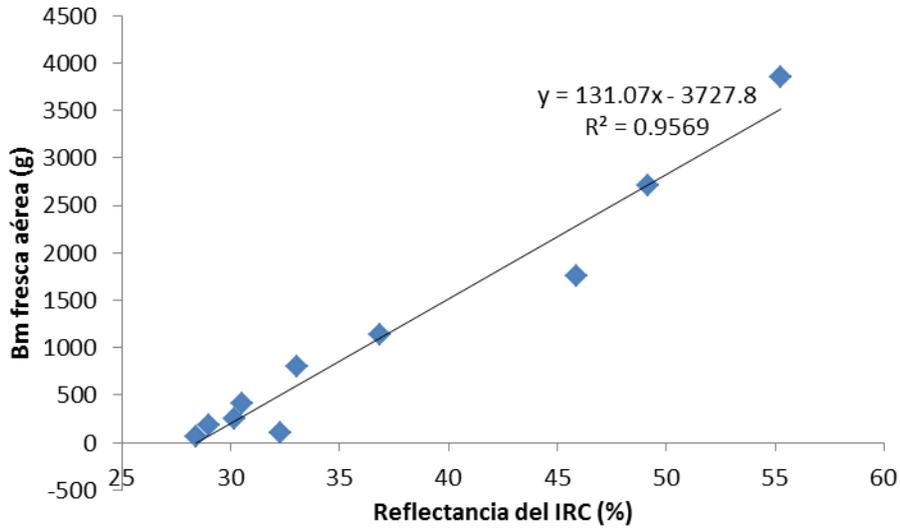


Figura 5.11. Relación entre IRC y Bm

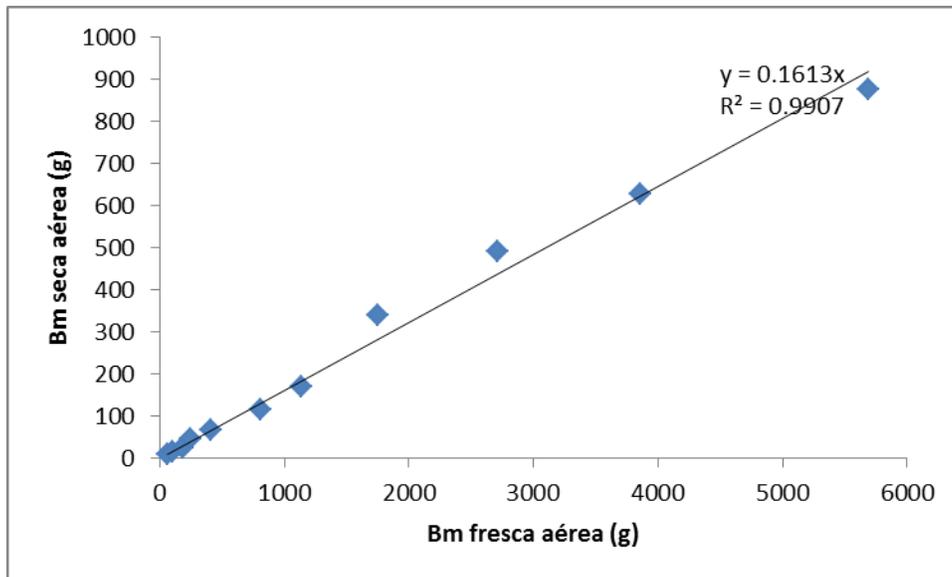


Figura 5.12. Relación entre Bm fresca aérea y Bm seca aérea

En la Figura 5.13, es posible observar los resultados de la relación entre la Bm seca reproductiva y la Bm seca aérea en el tiempo. Se observa el tiempo de retardo hasta que la Bm seca reproductiva comienza a ser importante, lo cual ocurre poco antes del DJ 120.

En todo momento, es necesario recordar que la Bm aérea, incluye tanto hojas, tallos y órganos reproductivos en estado floral o bien en este caso vainas.

Para determinar el potencial de producción de granos, se utiliza el Índice de Cosecha (IC) (Charles-Edward, 1982), en el cual se establece una relación de la cantidad de Bm aérea reproductiva con respecto a la Bm aérea total, con lo que es posible hacer inferencias sobre el potencial de rendimientos de cultivos relacionándolo con la producción de grados. Sin embargo, en este trabajo, solo se aborda la estimación a la fecha de máxima producción de Bm.

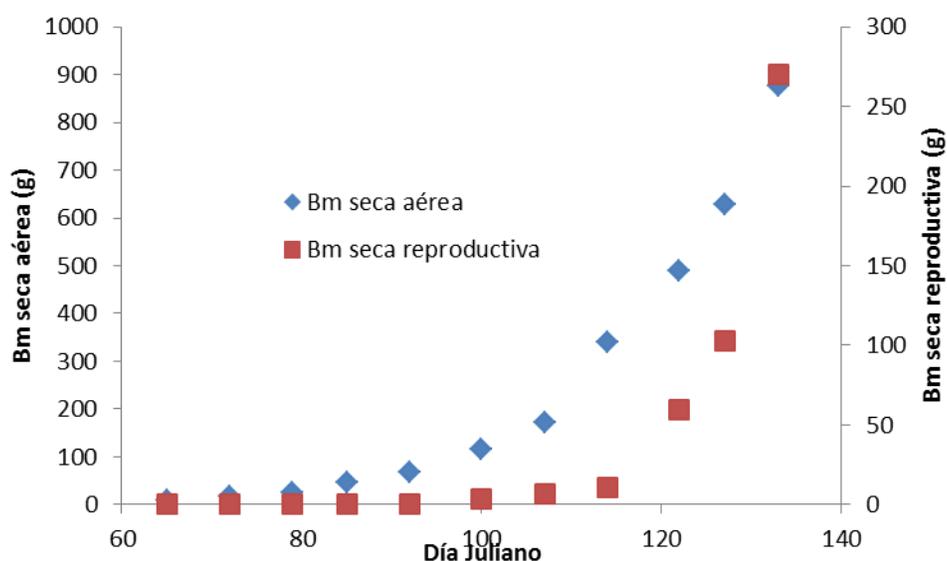


Figura 5.13. Desarrollo temporal de la Bm seca aérea y reproductiva en frijol

De lo mostrado por la Figura 5.13, se observa un tiempo de desfase entre el inicio del crecimiento de la Bm aérea y el de la Bm reproductiva, debido a que ésta última, está en función de la aparición de los órganos reproductivos, este desfase se manifiesta después de un tiempo de desarrollo, que depende de la planta.

El crecimiento de la Bm reproductiva, comienza a ser notorio en algún momento, entre el DJ 100 y el DJ120. Lo anterior, coincide con lo mostrado por la Figura 5.2, donde, el estadio 2, indica que es el inicio de la floración, a partir del cual, los valores de reflectancia en el IRC, tienen una clara tendencia a la alza.

A partir del estadio 2, de la Figura 5.2 y el inicio del crecimiento de la Bm reproductiva mostrado en la Figura 5.13, es posible inferir, que coinciden las etapas de crecimiento, por lo que puede haber algún tipo de relación entre el avance de la producción de Bm reproductiva y la reflectancia en la banda del IRC.

Las curvas de la Bm aérea y la Bm reproductiva parecen tener un desacople a lo largo del desarrollo. Así pues a partir del inicio del crecimiento de la Bm reproductiva, la Bm aérea, tiene un comportamiento que puede asumirse lineal, por otro lado, que el comportamiento de la Bm reproductiva, es de otro tipo muy alejado del lineal.

Para facilitar el análisis, se procede a linealizar los datos aquí mostrados para la Bm reproductiva, de tal manera que se busque un comportamiento lineal. De esta manera, la Figura 5.13, muestra el comportamiento relativo entre la Bm aérea y la Bm reproductiva, a la cual se le ha obtenido el logaritmo natural, para fines de linealización.

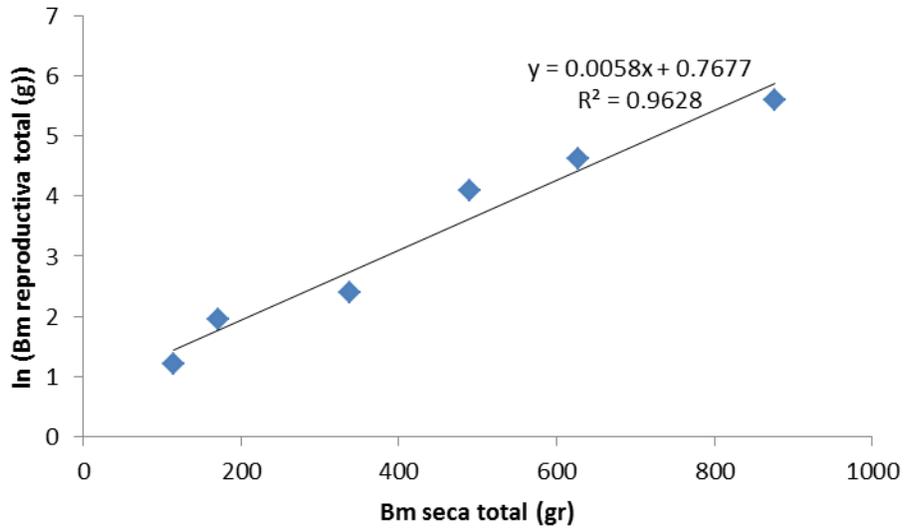


Figura 5.14. Relación entre Bm seca total y el ln de la Bm reproductiva

Las consideraciones respecto al IC, se pueden obtener a partir del DJ 114 y hasta el DJ 133, en donde es posible encontrar la relación lineal, que se mencionaba con anterioridad, diferente a lo encontrado en la Figura 5.14. De esta manera, en la Figura 5.15, se puede observar la relación entre Bm seca total y Bm seca reproductiva en el periodo de tiempo mencionado.

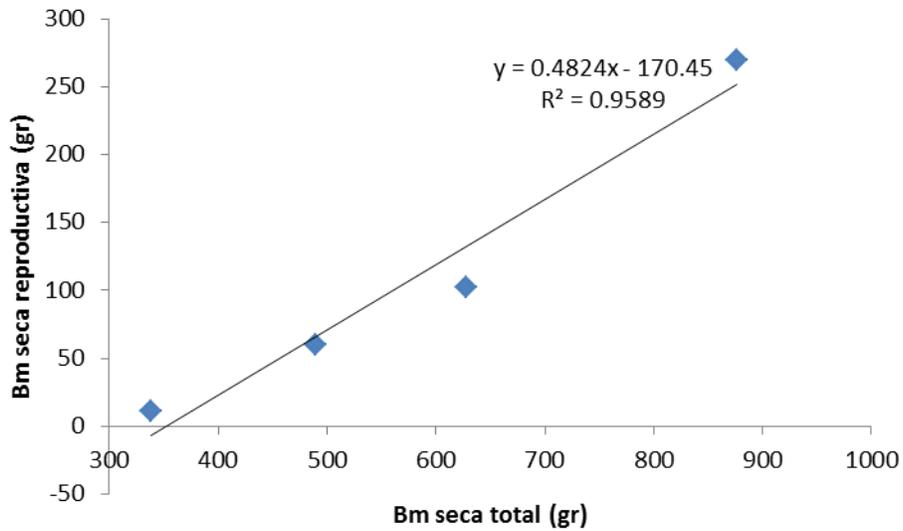


Figura 5.15. Relación Bm seca total vs Bm seca reproductiva del DJ 114 al DJ 133

Con los datos mostrados por la Figura 5.15, se calcularon los IC en cada una de las fechas. De esta manera, en la Figura 5.16, se presenta la evolución temporal del IC en el periodo de tiempo del DJ 114 al DJ 133.

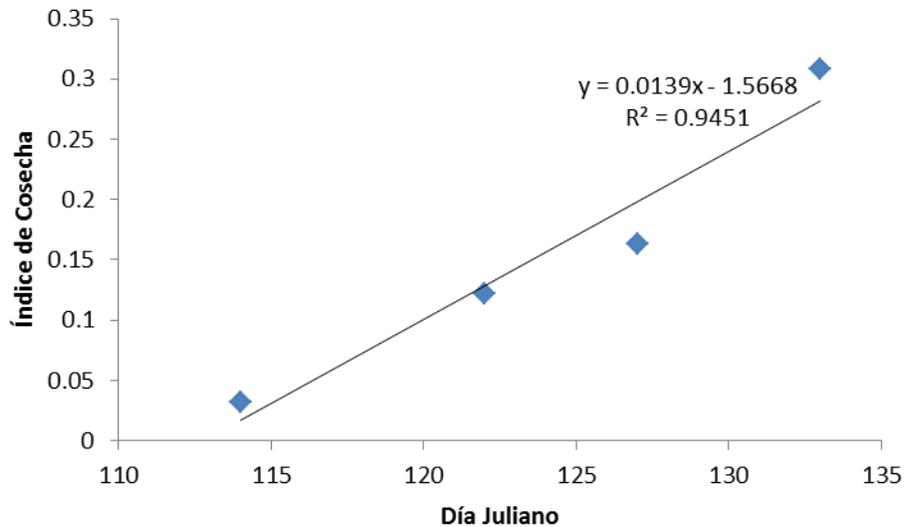


Figura 5.16. Desarrollo temporal del IC

El trabajo pendiente hasta este punto, consiste en determinar la tasa de producción de grano con base en la cantidad de Bm total y reproductiva o bien a partir del IC.

Rendimiento Potencial de Cultivos

Para fines predictivos, es necesario conocer bien los momentos de máxima producción de Bm, en función del tiempo en condiciones óptimas del cultivo. Ello marcará los valores tope que puede alcanzar la planta, en función de ello, se deberá plantear un mecanismo que permita en función del tiempo, conocer estos valores para diferentes fechas de siembra; en este punto, se puede dejar de utilizar los DJ, usados aquí para fines ilustrativos y referir el resto de la información en función de los DDS.

Determinados estos máximos, por cultivo toda estimación de producción de Bm y por tanto también de rendimientos, no deberá sobrepasar a éste, puesto que es el límite superior.

A partir de la información presentada en la Figura 5.2, es posible asumir que existe un comportamiento incremental de la reflectancia del IRC en función del tiempo, lo que ya se ha relacionado aquí con la producción de Bm. El comportamiento lineal en el tiempo, sirve para comenzar a hacer predicciones sobre el potencial productivo. En todo momento, se necesita conocer el tiempo en el cual, el cultivo alcanzará su máximo de producción de Bm.

Derivado de los análisis aquí presentados, en lo sucesivo, se asumirá que la tasa máxima de producción de Bm, se encuentra en el DJ 127 o 69 DDS. El valor de referencia, será el pixel con el máximo valor en esta fecha, asumiendo que éste valor sea encontrado en condiciones óptimas de crecimiento, toda estimación no podrá rebasar éste valor, por lo que si matemáticamente se encuentra un valor mayor, se asumirá a éste como el valor encontrado.

Después de analizar la Figura 5.2, y las discusiones anteriores, en la Figura 5.17, es posible apreciar el comportamiento lineal de los valores de reflectancia del IRC entre los 45 DDS y los 69DDS.

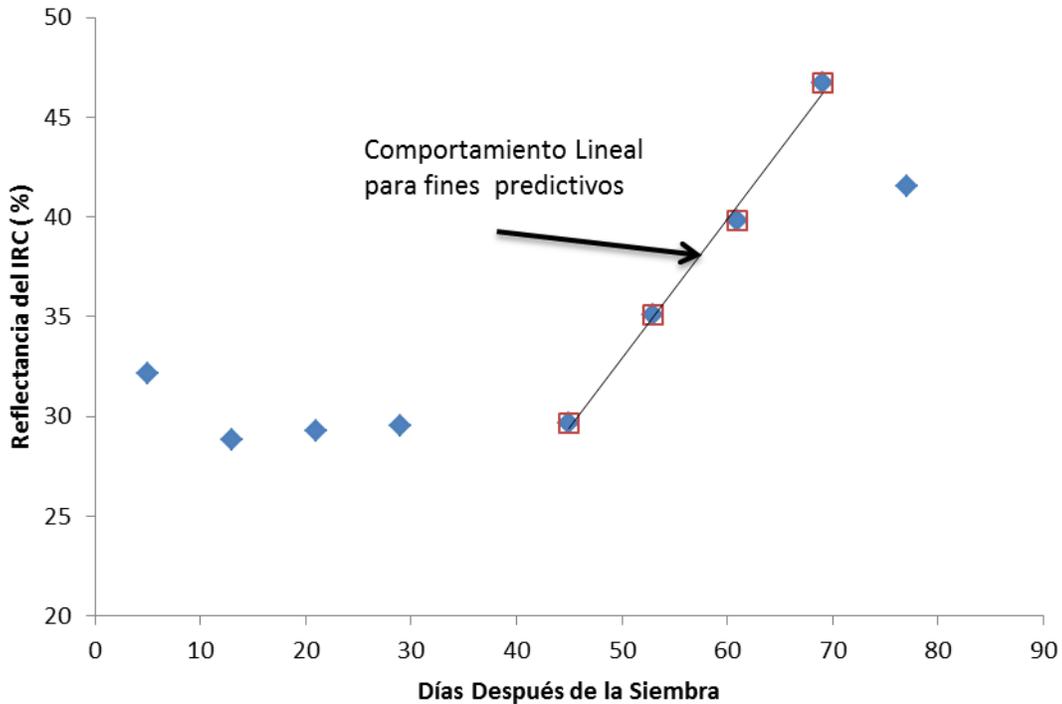


Figura 5.17. Comportamiento del valor promedio de IRC en el tiempo

Con base en lo mostrado en la Figura 5.17, se puede asumir que con los valores de reflectancia del IRC entre los 45 DDS y 53 DDS, se puede hacer una primera estimación temprana del valor esperado para el DJ 127 o 69 DDS y con ello, el potencial productivo de cada pixel, de mantener la tendencia mostrada en este punto.

De esta manera, utilizando los promedios a nivel de toda la parcela, se contruyó la Figura 18, en donde, en la Figura 18a, se puede notar el ajuste para el primer par de valores obtenidos calculados utilizando imágenes satelitales.

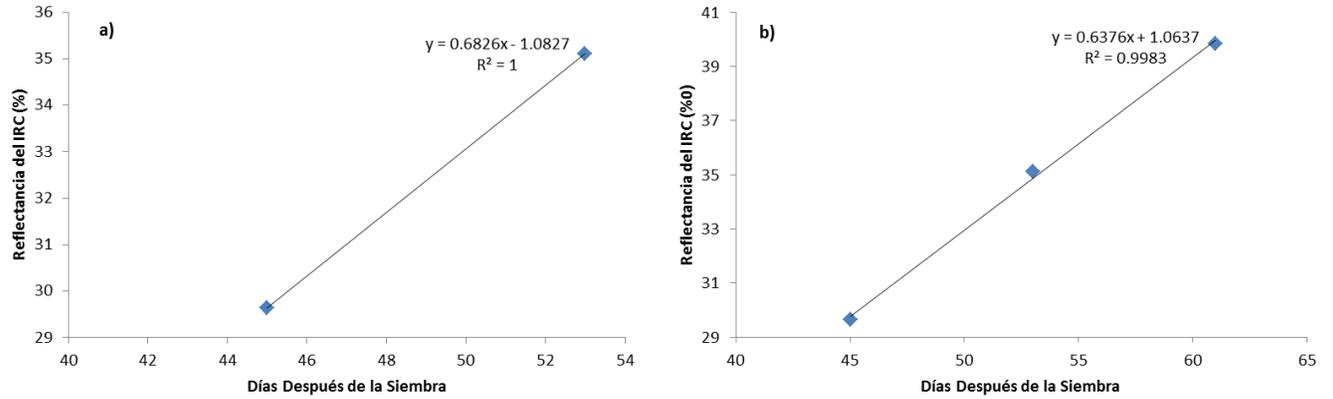


Figura 5.18. Ajustes lineales a diferentes fechas

Por otro lado, la Figura 5.18b, permite hacer una segunda aproximación del valor esperado de reflectancia del IRC en el DJ 127 o 69 DDS, de continuar con la tendencia mostrada aquí. En este caso, se utilizaron los valores obtenidos a nivel pixelar de los 45 DDS, 53 DDS y 61 DDS

Con base en los esquemas de predicción propuestos derivados del análisis del a Figura 5.18, se procedió a realizar predicción del valor esperado al DJ127 o 69 DDS, pero utilizando para ello una estimación lineal pixel a pixel. La Figura 5.19, muestra la relación entre la estimación temprana entre los 45 DDS y 53 DDS proyectadas hasta el DJ 127 o 69 DDS y, los valores calculados en esa fecha utilizando imágenes satelitales a lo que para fines de análisis se le ha llamado IRC observado.

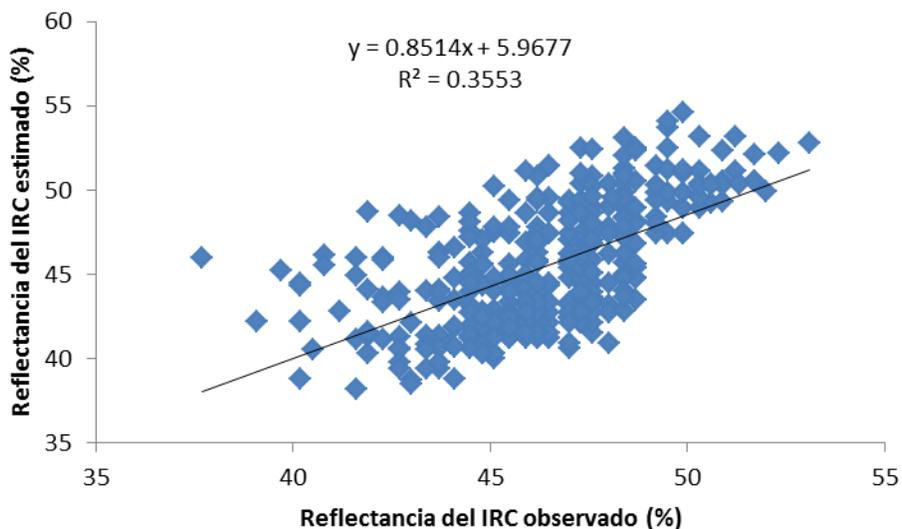


Figura 5.19. Relación entre IRC satelital y el IRC estimado

Posteriormente, con base en la información presentada en la Figura 5.18b, se procedió a realizar una estimación lineal utilizando el método de mínimos cuadrados, entre las tres fechas y los valores de reflectancia obtenidos por el sensor satelital por pixel en cada una de las fechas. La Figura 5.20, muestra la relación entre las pendientes e intersección de los estimadores lineales de cada uno de los pixeles de la sub-parcela de análisis.

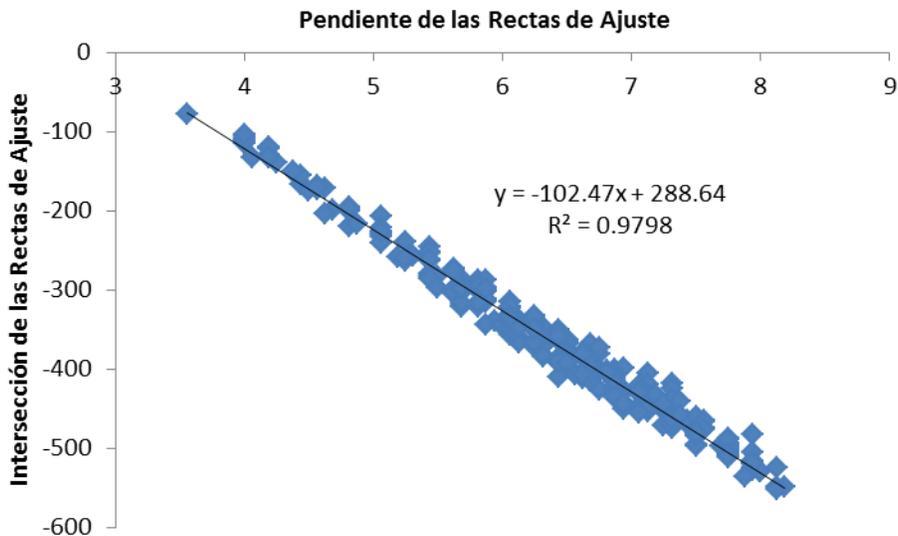


Figura 5.20. Relación entre pendiente e intersección de estimadores lineales individuales a nivel pixelar

Posteriormente, se realizó la proyección a los 69 DDS o DJ127, para conocer el valor de reflectancia del IRC estimado, lo cual permite dar una idea del potencial de Bm esperado y con ello, del potencial productivo del cultivo. Los resultados obtenidos de comparar el IRC calculado con las imágenes satelitales y los calculados con la regresión lineal de tres fechas de toma de imagen, se muestran en la Figura 5.21.

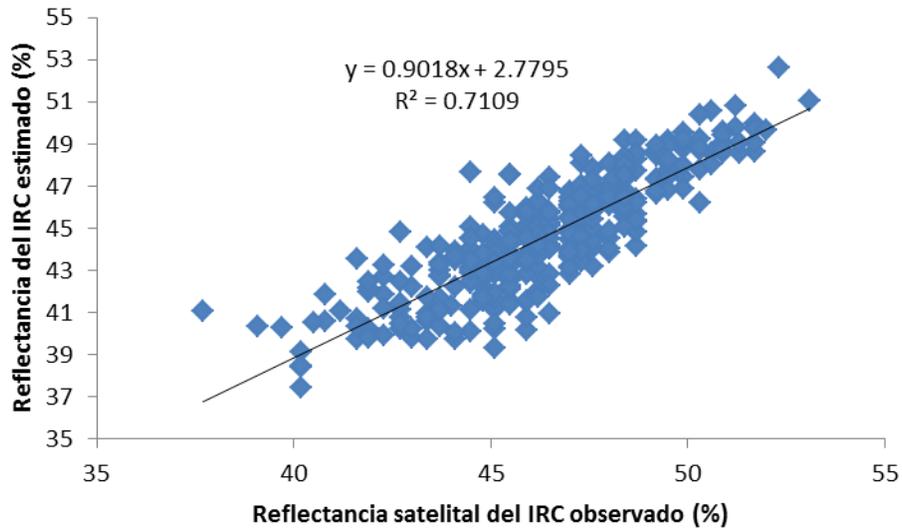


Figura 5.21. Relación IRC satelital calculado vs IRC estimado con el modelo

En general, el estimador que utiliza las tres fechas, realizó estimaciones un poco inferiores a lo que se obtuvo calculándolos directamente con la imagen satelital de la fecha. Ninguna de las estimaciones pasó del máximo calculado directamente con la imagen de satélite, por tanto no hubo necesidad de aplicar el criterio de la asignación del tope máximo a los valores altos. La Figura 5.22, presenta el estado de desarrollo relativo estimado al DJ 127 (69 DDS) interpolado a una malla de cinco metros, utilizando los valores calculados de IRC similares a los involucrados en la Figura 5.18b.

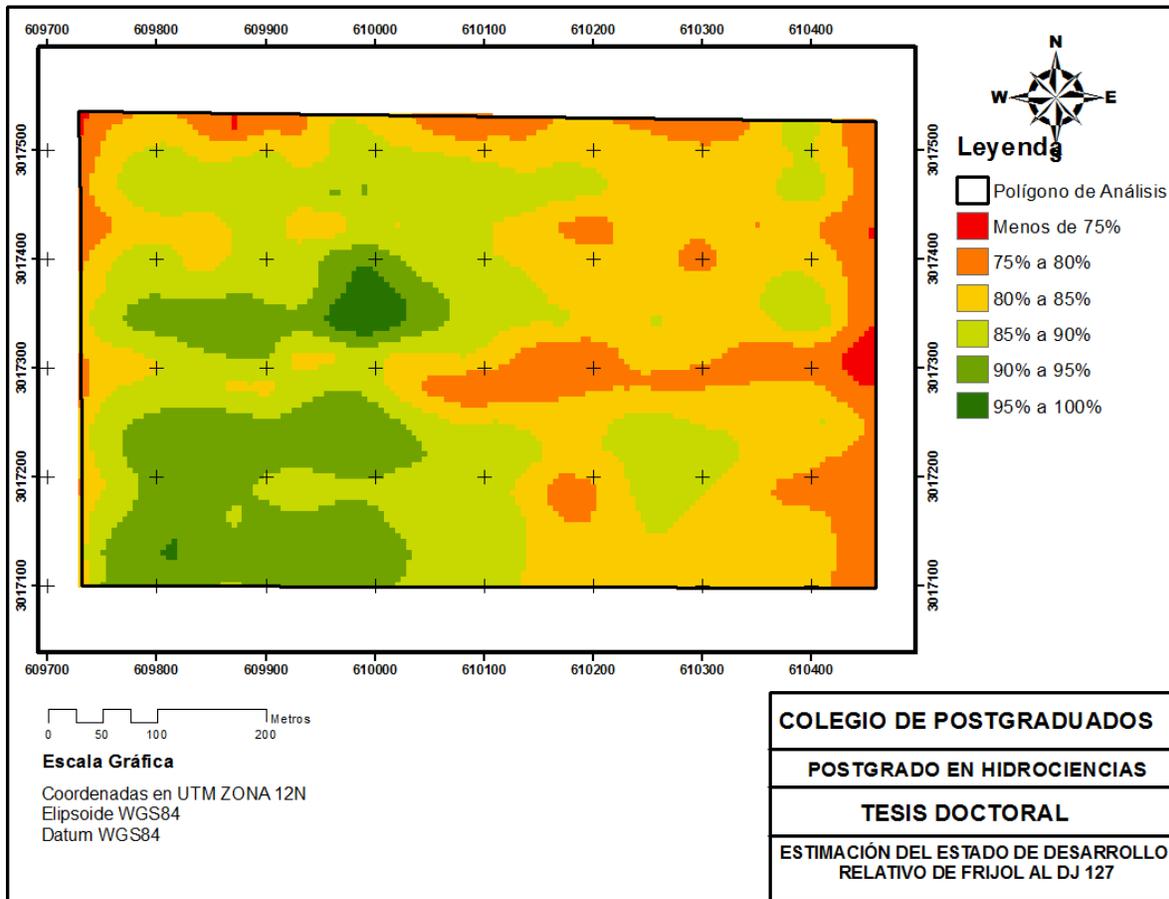


Figura 5.22. Mapa del probable Estado de Desarrollo, Estimado al DJ 127

Lo mostrado por la Figura 5.22, indica que el mejor desarrollo se obtendrá en la porción del centro hacia la izquierda de la parcela, en tanto que a la derecha, se tendrá menor desarrollo con respecto a los mejores píxeles, lo anterior, en términos generales, es congruente con lo mostrado en la Figura 5.6, donde se muestran los valores calculados con la información satelital.

En ciclos de cultivo más largos que el frijol o bien con resoluciones temporales mayores, es posible hacer predicciones con mayor precisión y anticipación, al tiempo que se pueden ver los efectos de los ajustes fisiológicos que hace la planta para llegar al óptimo; todo consiste en conocer los máximos valores que se

obtienen en óptimas condiciones, así como el tiempo en que éstos, llegan a ser presentes.

5.3.4 Análisis de los errores de estimación

A continuación, se procede a analizar los errores en la estimación, para conocer a detalle la eficiencia del estimador calculado aquí. El cuadro 5.1, contiene el resumen de las estadísticas descriptivas de los errores de estimación a nivel pixelar utilizando ecuaciones de ajuste en el mismo intervalo que en la Figura 18a. Los datos de entrada, se obtuvieron directamente de la diferencia absoluta entre el valor de IRC satelital calculado (%) y el IRC estimado (%), de tal manera que las unidades son de reflectancia del IRC en %. De manera similar, el Cuadro 5.2, presenta los resultados para la estimación lineal, utilizando el mismo intervalo que en la Figura 5.18b.

Cuadro 5.1. Estadística descriptiva de los Errores de Estimación en unidades de Reflectancia (%)

Concepto	Valor
Media	2.510933333
Error típico	0.085843832
Mediana	2.3
Moda	0.6
Desviación estándar	1.662358653
Varianza de la muestra	2.763436292
Curtosis	-0.659268566
Coefficiente de asimetría	0.362816617
Rango	8.3
Mínimo	0
Máximo	8.3
Suma	941.6
Cuenta	375

Cuadro 5.2. Estadística descriptiva de los Errores de Estimación en unidades de Reflectancia (%)

Concepto	Valor
Media	1.956266667
Error típico	0.061937074
Mediana	1.933333333
Moda	2.466666667
Desviación estándar	1.19940629
Varianza de la muestra	1.438575449
Curtosis	-0.222115743
Coefficiente de asimetría	0.429824456
Rango	5.766666667
Mínimo	0
Máximo	5.766666667
Suma	733.6
Cuenta	375

Por otro lado, el Cuadro 5.3, presenta las estadísticas descriptivas del porcentaje de error. Éste valor, fue calculado, dividiendo el error de estimación entre el valor de la imagen en el DJ127 posteriormente, fue expresado en porcentaje.

Cuadro 5.3. Estadística Descriptiva del error, expresado en porcentaje respecto del valor en la imagen

Concepto	Valor
Media	4.215673525
Error típico	0.134119638
Mediana	4.092261905
Moda	4.468864469
Desviación estándar	2.597215628
Varianza de la muestra	6.745529016
Curtosis	-0.13221143
Coefficiente de asimetría	0.467555205
Rango	12.78640059
Mínimo	0
Máximo	12.78640059
Suma	1580.877572
Cuenta	375

A pesar de los relación entre estimado vs observado (calculado con la imagen) expresado en la Figura 5.21, la información presentada en el Cuadro 5.1, y Cuadro 5.2, permiten calificar de mejor manera el estimador aquí mostrado.

5.4 CONCLUSIONES

La información aquí presentada, permite generalizar el uso los valores de la reflectancia del IRC, asociados a la cantidad de Bm, para conocer el estado de desarrollo actual de la parcela en niveles relativos por fecha o evento de toma de imagen, utilizando como referencia el pixel con el valor más alto encontrado.

Utilizando la diferencia en el valor de la reflectancia del IRC en dos periodos, es posible plantear un índice de crecimiento relativo del cultivo en dicho periodo. Éste índice, puede ser utilizado confiablemente, para conocer a mayor detalle, las condiciones de crecimiento del cultivo a nivel pixelar.

Se establecieron las relaciones existentes entre la Bm y el valor de reflectancia en la banda del IRC, para su uso con fines predictivos.

Con el uso de la curva de crecimiento del cultivo, construida con el valor de la reflectancia del IRC en el tiempo, y un máximo a obtener en condiciones óptimas, se planteó un estimador del potencial productivo en una parcela.

Los resultados mostraron que el estimador aquí planteado en las condiciones establecidas, se puede utilizar confiablemente para predecir el valor de reflectancia del IRC, con lo cual se pueden establecer relaciones que permiten conocer la producción de Bm y posteriormente, se pueden establecer estimaciones del potencial productivo de los cultivos.

5.5. LITERATURA CITADA

Báez-González, A. D.; Chen, P.; Tiscareño-López, M. and Srinivasan, R. R. 2002. Using satellite and field data with crop growth modeling to monitor and estimate corn yield in Mexico. *Crop Sci.* 42: 1943-1949.

Báez-González, A. D.; Kiniry J., R.; Maas S., J.; TiscareñoLópez, M.; Macias C., J.; Mendoza C., J. L.; Richarson, W.; Salinas G., J. and Manjares J., R. 2005. Large-area maize yield forecasting using leaf area index based yield model. *Agron. J.* 97:418-425.

Calera, A., J. González and J. Meliá. 2004. Monitoring barley and corn growth from remote sensing data at field scale. *Int. J. Remote Sens.* 25:97-109.

Charles-Edwards, D.A. 1982. *Physiological determinants of crop growth.* Academic Press, Sydney

Palacios V. Enrique, J. E. Palacios y L. A. Palacios. 2011. *Agricultura de Riego Asistida con Satélites. Tecnología y Ciencias del Agua.* 2011(2):69-81.

Palacios V. Enrique, L. Palacios, J. C. Rodríguez y J.S. Palacios. 2010. Earth Observation as a Support to Improve Water Use in Irrigated Agriculture. *Journal of Agriculture Science and Technology.* 2010(6):1-9.

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con base en los planteamientos analizados en los diferentes capítulos, es posible obtener las siguientes conclusiones y recomendaciones generales.

La reflectancia en la banda del IRC, guarda una relación directamente proporcional con la cantidad de vegetación que se observa en cultivos.

El uso de los IV tradicionales, está restringido al uso de bandas espectrales, donde los efectos distorsionantes se propagan por la cantidad de bandas en uso. Analizando las relaciones de ellos, utilizados para el monitoreo de la vegetación con respecto a los valores de reflectancia del IRC, se concluyó que la reflectancia en ésta banda espectral, se puede utilizar confiablemente, como sustituto de los IV que trabajan con conjugaciones de las bandas del R e IRC, en análisis multi-temporales utilizando sensores remotos instalados en plataformas satelitales.

El comportamiento de las variables biofísicas, puede modelarse a través del conocimiento de los valores de la reflectancia en la Banda del IRC en un análisis multi-temporal tal como se ha hecho con los IV.

Con las discusiones presentadas en el desarrollo del trabajo se concluye que la reflectancia en la banda del IRC, se puede utilizar confiablemente para monitoreo de las diferentes etapas de desarrollo de los cultivos, exceptuando la fase exponencial inicial, donde los efectos del suelo de fondo, revisten gran importancia.

La reflectancia en la banda del IRC, se puede utilizar con fines predictivos de crecimiento y desarrollo de cultivos, después de haber superado las etapas tempranas del crecimiento, principalmente en la fase de crecimiento lineal.

Finalmente, se concluye que la modelación del desarrollo de los cultivos, se puede realizar confiablemente, utilizando solamente la información de reflectancia en la banda del IRC. De manera similar, ésta información se puede utilizar con buena aproximación para fines predictivos del estado de desarrollo y rendimiento de los cultivos en análisis.

Se recomienda analizar los planteamientos aquí mostrados, con otros sensores remotos que trabajen en rangos del espectro electromagnético similares a los utilizados en este trabajo.

La aplicación simultánea en varios predios de una misma imagen de los desarrollos aquí planteados, está sujeto a contar con un catastro confiable sobre el establecimiento de cultivos.

Es recomendable implementar este mismo esquema de estimación futura en otros cultivos y condiciones de desarrollo.

Para comprobar el funcionamiento del planteamiento mostrado aquí, se recomienda implementarlo en conjugaciones diferentes de tipos de cultivo y ambiente de producción con sensores remotos de mayor resolución temporal.

De manera complementaria, se recomienda ampliar el estudio del comportamiento de la reflectancia en la banda del IRC para la estimación de B_m y demás variables biofísicas de interés para la estimación de rendimientos.