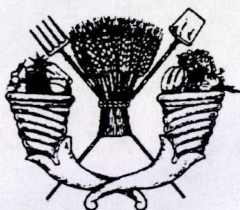


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO



DIVISIÓN DE CIENCIAS FORESTALES
MAESTRIA EN CIENCIAS FORESTALES

**UTILIZACIÓN DE IMÁGENES DE SATÉLITE PARA
DETERMINAR ÁREAS CON PROBLEMAS DE
LIXIVIACIÓN DE NITRATOS**

TESIS DE MAESTRÍA
QUE COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS
EN CIENCIAS FORESTALES

PRESENTA:

RICARDO RIVERA VÁZQUEZ

Noviembre de 2001

Chapingo, Estado de México



BIBLIOTECA CENTRAL U. A. CH

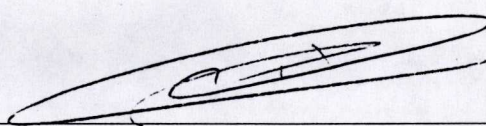
BIB 96644

UTILIZACIÓN DE IMÁGENES DE SATÉLITE PARA DETERMINAR ÁREAS CON PROBLEMAS DE LIXIVIACIÓN DE NITRATOS

Tesis realizada por **Ricardo Rivera Vázquez** bajo la dirección del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES

DIRECTOR:



M. C. Eduardo Vargas Pérez

ASESOR:



M. C. Silvia Terrazas Domínguez

ASESOR:



Dr. Francisco Gavi Reyes

38894

UTILIZACIÓN DE IMÁGENES DE SATÉLITE PARA DETERMINAR ÁREAS CON PROBLEMAS DE LIXIVIACIÓN DE NITRATOS

El jurado que reviso y aprobó el examen de grado de **Ricardo Rivera Vázquez** autor de la presente tesis de Maestría en Ciencias en Ciencias Forestales estuvo constituido por:

DIRECTOR: _____

M. C. Eduardo Vargas Pérez

ASESOR: _____

M. C. Silvia Terrazas Domínguez

ASESOR: _____

Dr. Francisco Gavi Reyes

DEDICATORIAS

A mi esposa: Graciela, por su infinito amor y comprensión.

A mis hijas: Andrea, Celeste y Elisa, como un pequeño estímulo.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma Chapingo (UACH), por aceptarme como alumno desde licenciatura y ahora en maestría, y cimentarme un futuro.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el financiamiento de la beca, y porque siga apoyando la investigación en México.

Al Maestro en Ciencias, Eduardo Vargas Pérez, por aceptar ser mi director de tesis, a pesar de tantas ocupaciones debidas a su cargo, siempre tuvo tiempo de guiarme para concluir mi trabajo.

A la Maestra en Ciencias, Silvia Terrazas Domínguez, por todo el apoyo recibido y ser una persona de una alta calidad humana y de docencia.

Al Doctor, Francisco Gavi Reyes, profesor-investigador del Colegio de Postgraduados, por ser asesor de este trabajo, y brindarme todo el apoyo necesario para la culminación de mi tesis.

Al Instituto Nacional de Ecología (INE) y al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), por facilitar las imágenes de satélite que se emplearon en este trabajo.

Al M. C. Antonio Villanueva Morales, por su asesoría en la parte estadística de esta trabajo, y por contar con un amigo incondicional. Al M. C. Roberto Machuca Velasco y a la Dra. Amparo Borja de la Rosa, por su amistad y apoyo desinteresados, que me hicieron sentir como en casa. Y a todos los profesores que participaron de alguna u otra manera en mi estancia en la UACH.

A los amigos y colegas de la maestría, a los cuales les deseo lo mejor.

Por último y más importante, deseo agradecer a Dios, por regalarme la vida y darme cuenta de lo maravillosa que es, con sus dificultades y alegrías.

DATOS BIOGRAFICOS DEL AUTOR

El autor nació en la Ciudad de México en el año de 1969. Curso sus estudios de bachillerato en el Centro de Estudios Científicos y Tecnológicos No. 6 (Vocacional 6) del IPN, de donde obtuvo Carta de Pasante de Laboratorista Agrobiólogo en 1987, además realizó su servicio social en la misma institución en el laboratorio de plagas. Posteriormente realizó sus estudios de licenciatura en la Universidad Autónoma Chapingo, de donde obtuvo el grado de Ingeniero Agrónomo especialista en Fitotecnia al presentar su examen profesional el 2 de diciembre de 1992, además su generación fue la primera en ser exigida de cumplir con un servicio social para poder obtener el título, realizándolo en el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, en el Programa de Amaranto (resistencia a sequía).

Su actividad laboral la inicio en un Rancho donde se producía fresa, donde fue el encargado de la producción y su comercialización; posteriormente decidió cambiar sus planes al entrar a laborar en el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) donde desempeño varios puestos en diferentes programas, al ser larga su estancia en dicho instituto (6 años) conoció del manejo de equipos GPS, Fotografías Aéreas, Digitalización, Cartografía, entre otros muchos aspectos.

Dicha experiencia, le motivo a conocer sobre imágenes de satélite, por lo que decidió en 1999 entrar a la Maestría en Ciencias Forestales de la UACH, en la cual se enfocó a la aplicación de dichas imágenes en las actividades agroforestales.

Lo anterior es su vida académica y profesional, pero su vida personal ha tenido los mayores logros, tal es el caso de tener una esposa amorosa y tres hijas que son su máximo orgullo.

RESUMEN

Las actividades que realiza el hombre sobre el ambiente deben ser conocidas y reguladas para hacer una correcta planeación y manejo de los recursos; en este sentido la percepción remota o teledetección permite evaluar los recursos naturales y sus problemas de manera más actual y con mayor rapidez y eficacia. El presente estudio se llevó a cabo en el Valle del Mezquital, en el estado de Hidalgo, el cual tiene problemas de contaminación por las aguas residuales que se utilizan para regar las tierras agrícolas. Se valoraron y clasificaron las tierras según su nivel de concentración de nitratos a través de imágenes de satélite Landsat-TM, el programa IDRISI y datos de campo. Los resultados indicaron que a través de las imágenes de satélite es posible indicar los niveles de concentración de nitratos en capas de suelo de 60-90 cm de profundidad, donde las altas concentraciones de nitratos están directamente asociadas a la lixiviación de estos y causar problemas de contaminación. Cuando se usa el cultivo de alfalfa como indicador, la imagen de satélite muestra un 91.88% de certeza de obtener las concentraciones de nitratos, y cuando se usa el cultivo de maíz, la imagen solo muestra un 63.33% de certeza.

Palabras Clave: *Imagen de satélite, nitratos, lixiviación, aguas residuales.*

ABSTRACT

Man Must very well and regulate the activities he performs with respect to the environment, for correct planning and management of resources; remote perception or tele-detection allows to evaluate natural resources and their problems in the fastest, most current, and most efficient way. The present study was carried out in the Valle del Mezquital, in the state of Hidalgo, which has problems of pollution because of waste water used to irrigate farmlands. Land was evaluated and classified according to its level of nitrate concentration, detected through Landsat-TM satellite images, the IDRISI program, and field data. The results indicated that through satellite images it is possible to recognize nitrate concentrations in soil layers until 60-90 cm depth, where high nitrate concentrations are directly associated to soil lixiviation and cause problems of contamination. When alfalfa crop is used as nitrate indicator, the satellite image shows nitrate concentrations with 91.88% certainty; in the case of corn, the image only presents 63.33% certainty.

KEY WORDS: *satellite image, nitrates, lixiviation, waste water.*

CONTENIDO

PAGINA

CONTENIDO	I
ÍNDICE DE CUADROS	IV
ÍNDICE DE FIGURAS	VI
1. INTRODUCCIÓN	1
2. REVISIÓN DE BIBLIOGRAFÍA	3
2.1. PRINCIPIOS DE LA PERCEPCIÓN REMOTA	3
2.2 EL PROGRAMA LANDSAT	6
2.2.1.HISTORIA Y CARACTERÍSTICAS DE LOS SATÉLITES	6
2.2.2. CARACTERÍSTICAS DEL SENSOR TM	8
2.2.3. ÍNDICES DE VEGETACIÓN	..9
2.3. CARACTERÍSTICAS DE LA CUBIERTA TERRESTRE	11
2.4. USO DEL AGUA RESIDUAL EN LA AGRICULTURA	12
2.4.1.LIXIVIACIÓN DE NITRATOS	14
2.4.2. USO DEL AGUA RESIDUAL Y LA LIXIVIACIÓN DE NITRATOS EN EL VALLE DEL MEZQUITAL	16
2.5. LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA	19
2.6. LOS SIG Y LA PERCEPCIÓN REMOTA EN ESTUDIOS AMBIENTALES	20
3. OBJETIVOS	26
4. HIPÓTESIS	26
5. MATERIALES Y MÉTODOS	27
5.1. ÀREA DE ESTUDIO	27
5.1.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA	27
5.1.2. CLIMA	29

5.1.3. HIDROLOGÍA	29
5.1.4. GEOLOGÍA	29
5.1.5. SUELO	30
5.1.6. VEGETACIÓN	30
5.1.7. OROGRAFÍA	31
5.2. MATERIALES	31
5.3. METODOLOGÍA	32
5.3.1. PREPARACIÓN DE LA IMAGEN	32
5.3.1.1. RECORTE DE LA IMAGEN	32
5.3.1.2. GENERACIÓN DE ESTADÍSTICAS	33
5.3.1.3. DESPLIEGUE DE LA IMAGEN	33
5.3.1.4. GEORREFERENCIA	33
5.3.1.4.1. PUNTOS DE CONTROL	33
5.3.1.4.2. TRANSFORMACIÓN	34
5.3.1.4.3. TRANSFERENCIA	34
5.3.1.5. REALCES Y MEJORAS A LA IMAGEN	34
5.3.2. RECOLECCIÓN DE DATOS DE CAMPO	35
5.3.2.1. TOMA DE MUESTRAS	35
5.3.2.2. ANÁLISIS DE LABORATORIO	35
5.3.3. UBICACIÓN DE SITIOS EN TERRENO E IMAGEN	36
5.3.4. OBTENCIÓN DE LOS VALORES DIGITALES DE LAS BANDAS	36
5.3.5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO	36
5.3.5.1. ANÁLISIS DE VARIANZA	36
5.3.5.2. ANÁLISIS DE CORRELACIÓN	37
5.3.5.3. MODELOS DE REGRESIÓN	37
5.3.6. CLASIFICACIÓN DE LA IMAGEN	37
5.3.7. VERIFICACIÓN EN CAMPO	37

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	39
6.1. CARACTERÍSTICAS DE LA IMAGEN	39
6.1.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LA IMAGEN	39
6.1.2. VALORES DE REFLECTANCIA	39
6.2. INFORMACIÓN OBTENIDA EN CAMPO	47
6.3. ANÁLISIS ESTADÍSTICO	48
6.3.1. ANÁLISIS DE VARIANZA	49
6.3.2. ANÁLISIS DE CORRELACIÓN	52
6.3.2.1. VARIABLES DE LA IMAGEN	53
6.3.2.2. VARIABLES DE CAMPO	56
6.3.2.3. VARIABLES DE CAMPO VS. VARIABLES DE LA IMAGEN	59
6.3.3. VARIABLES SELECCIONADAS	61
6.3.4. MODELO DE REGRESIÓN	61
6.3.4.1. MODELO LINEAL MÚLTIPLE	62
6.4. CLASIFICACIÓN DE LA IMAGEN	64
6.5. VALIDACIÓN DE LA CLASIFICACIÓN	66
7. CONCLUSIONES	72
8. RECOMENDACIONES	73
9. LITERATURA CITADA	75
ANEXOS	80
ANEXO 1	80
ANEXO 2	88
ANEXO 3	92
ANEXO 4	106
ANEXO 5	108

ÍNDICE DE CUADROS

	PAGINA
CUADRO 1. CARACTERÍSTICAS DE LOS SATÉLITES LANDSAT	8
CUADRO 2. USOS DE LAS BANDAS DE LAS IMÁGENES LANDSAT	10
CUADRO 3. PROPIEDADES DE LAS AGUAS RESIDUALES	14
CUADRO 4. VALORES PROMEDIO DE REFLECTANCIA Y NDVI POR CULTIVO Y PROFUNDIDAD	47
CUADRO 5. DATOS DE CAMPO PROMEDIO, POR CULTIVO Y PROFUNDIDAD	48
CUADRO 6. NIVELES DE LAS VARIABLES	50
CUADRO 7. ANÁLISIS DE VARIANZA PARA NITRATOS	50
CUADRO 8. ANÁLISIS DE CORRELACIÓN ENTRE VALORES DE REFLECTANCIA PARA ALFALFA EN LA PROFUNDIDAD 0-30 CM.	54
CUADRO 9. ANÁLISIS DE CORRELACIÓN ENTRE VALORES DE REFLECTANCIA PARA ALFALFA EN LA PROFUNDIDAD 30-60 CM.	54
CUADRO 10. ANÁLISIS DE CORRELACIÓN ENTRE VALORES DE REFLECTANCIA PARA ALFALFA EN LA PROFUNDIDAD 60-90 CM.	54
CUADRO 11. ANÁLISIS DE CORRELACIÓN ENTRE VALORES DE REFLECTANCIA PARA MAÍZ EN LA PROFUNDIDAD 0-30 CM.	55
CUADRO 12. ANÁLISIS DE CORRELACIÓN ENTRE VALORES DE REFLECTANCIA PARA MAÍZ EN LA PROFUNDIDAD 30-60 CM.	56
CUADRO 13. ANÁLISIS DE CORRELACIÓN ENTRE VALORES DE REFLECTANCIA PARA MAÍZ EN LA PROFUNDIDAD 60-90 CM.	56
CUADRO 14. ANÁLISIS DE CORRELACIÓN ENTRE LAS VARIABLES DE CAMPO PARA ALFALFA EN LA PROFUNDIDAD 0-30 CM.	57

CUADRO 15. ANÁLISIS DE CORRELACIÓN ENTRE LAS VARIABLES DE CAMPO PARA ALFALFA EN LA PROFUNDIDAD 30-60 CM.	57
CUADRO 16. ANÁLISIS DE CORRELACIÓN ENTRE LAS VARIABLES DE CAMPO PARA ALFALFA EN LA PROFUNDIDAD 60-90 CM.	58
CUADRO 17. ANÁLISIS DE CORRELACIÓN ENTRE LAS VARIABLES DE CAMPO PARA MAÍZ EN LA PROFUNDIDAD 0-30 CM.	58
CUADRO 18. ANÁLISIS DE CORRELACIÓN ENTRE LAS VARIABLES DE CAMPO PARA MAÍZ EN LA PROFUNDIDAD 30-60 CM.	58
CUADRO 19. ANÁLISIS DE CORRELACIÓN ENTRE LAS VARIABLES DE CAMPO PARA MAÍZ EN LA PROFUNDIDAD 60-90 CM.	59
CUADRO 20. ANÁLISIS DE CORRELACIÓN ENTRE REFLECTANCIA Y VARIABLES DE CAMPO EN LA PROFUNDIDAD 0-30 CM Y CULTIVO DE ALFALFA	59
CUADRO 21. ANÁLISIS DE CORRELACIÓN ENTRE REFLECTANCIA Y VARIABLES DE CAMPO EN LA PROFUNDIDAD 30-60 CM Y CULTIVO DE ALFALFA	60
CUADRO 22. ANÁLISIS DE CORRELACIÓN ENTRE REFLECTANCIA Y VARIABLES DE CAMPO EN LA PROFUNDIDAD 60-90 CM Y CULTIVO DE ALFALFA	60
CUADRO 23. ANÁLISIS DE CORRELACIÓN ENTRE REFLECTANCIA Y VARIABLES DE CAMPO EN LA PROFUNDIDAD 0-30 CM Y CULTIVO DE MAÍZ	60
CUADRO 24. ANÁLISIS DE CORRELACIÓN ENTRE REFLECTANCIA Y VARIABLES DE CAMPO EN LA PROFUNDIDAD 30-60 CM Y CULTIVO DE MAÍZ	60
CUADRO 25. ANÁLISIS DE CORRELACIÓN ENTRE REFLECTANCIA Y VARIABLES DE CAMPO EN LA PROFUNDIDAD 60-90 CM Y CULTIVO DE MAÍZ	61
CUADRO 26. MODELOS DEFINITIVOS	63
CUADRO 27. CLASES IDENTIFICADAS EN LA COMPOSICIÓN EN COLOR DE LA IMAGEN	64

ÍNDICE DE FIGURAS

	PAGINA
FIGURA 1. COMPONENTES PRINCIPALES DE LA PERCEPCIÓN REMOTA	5
FIGURA 2. REFLECTIVIDAD DE LA CUBIERTA TERRESTRE	12
FIGURA 3. LA RUTA DE LOS NITRATOS	17
FIGURA 4. UBICACIÓN GEOGRÁFICA DEL VALLE DEL MEZQUITAL	28
FIGURA 5. BANDA 1 DE LA IMAGEN DE SATELITE LANDSAT TM DEL ÁREA DE ESTUDIO	40
FIGURA 6. BANDA 2 DE LA IMAGEN DE SATELITE LANDSAT TM DEL ÁREA DE ESTUDIO	40
FIGURA 7. BANDA 3 DE LA IMAGEN DE SATELITE LANDSAT TM DEL ÁREA DE ESTUDIO	41
FIGURA 8. BANDA 4 DE LA IMAGEN DE SATELITE LANDSAT TM DEL ÁREA DE ESTUDIO	41
FIGURA 9. BANDA 5 DE LA IMAGEN DE SATELITE LANDSAT TM DEL ÁREA DE ESTUDIO	42
FIGURA 10. BANDA 7 DE LA IMAGEN DE SATELITE LANDSAT TM DEL ÁREA DE ESTUDIO	42
FIGURA 11. BANDA NDVI DE LA IMAGEN DE SATELITE LANDSAT TM DEL ÁREA DE ESTUDIO	43
FIGURA 12. IMAGEN COMPUESTA 1-2-3- DEL ÁREA DE ESTUDIO	44
FIGURA 13. IMAGEN COMPUESTA 1-2-4- DEL ÁREA DE ESTUDIO	45
FIGURA 14. IMAGEN COMPUESTA 2-3-4- DEL ÁREA DE ESTUDIO	46
FIGURA 15. IMAGEN DE SATELITE LANDSAT TM CLASIFICADA	65
FIGURA 16. IMAGEN DE SATELITE LANDSAT TM PARA EL MODELO 1	67
FIGURA 17. IMAGEN DE SATELITE LANDSAT TM PARA EL MODELO 2	67

FIGURA 18. IMAGEN DE SATÉLITE LANDSAT TM PARA EL MODELO 2	68
FIGURA 19. IMAGEN DE SATÉLITE LANDSAT TM PARA EL MODELO 4	68
FIGURA 20. IMAGEN DE SATÉLITE LANDSAT TM PARA EL MODELO 5	69
FIGURA 21. IMAGEN DE SATÉLITE LANDSAT TM PARA EL MODELO 6	69

1. INTRODUCCIÓN.

Una de las bases fundamentales para hacer una correcta planeación y manejo de los recursos agroforestales, es conocer el uso actual del suelo, para evitar que estos recursos sufran constantemente degradación por desmontes, apertura de tierra al cultivo, establecimiento de zonas urbanas e industriales, problemas de contaminación, entre otras. También es importante comprender el impacto de estas actividades, pues con ello podemos cambiarlas o modificarlas para preservar el ambiente.

Uno de estos problemas del mal manejo de los sistemas agroforestales es el riesgo de contaminación de mantos acuíferos por lixiviación de nitratos (NO_3^-) en áreas con agricultura intensiva, por ejemplo en el Valle del Mezquital que recibe aguas residuales de la Ciudad de México, debido a las laminas de riego anuales que pueden llegar hasta 2 metros. aportando hasta 600 kg. de Nitrógeno por hectárea, existe una alta probabilidad de lixiviación de nitratos.

En años recientes, la percepción remota o teledetección permite llevar a cabo la evaluación de los recursos naturales y sus problemas en casi tiempo real y con eficacia, pudiendo realizar monitoreos continuos.

La percepción remota se basa en imágenes de satélite y programas de cómputo diseñadas para el análisis de dichas imágenes. En particular, las imágenes de satélite Landsat-TM han sido utilizadas en diversas áreas de la investigación, como el uso del suelo, agricultura, recursos forestales, geología, mapeo, calidad del agua, contaminación, etc.

El presente estudio se llevó a cabo en el Valle del Mezquital, en el estado de Hidalgo; como parte de los trabajos que desarrolla un grupo interdisciplinario (UACH-Colegio de Postgraduados) que tiene como objetivo general evaluar el impacto de las aguas residuales en el ambiente, ya que dicho valle se han detectado diversos problemas de contaminación por las aguas residuales que se utilizan para regar las tierras agrícolas.

El objetivo de este trabajo fue valorar y clasificar las tierras según su nivel de concentración de nitratos a través de imágenes de satélite Landsat-TM, el programa IDRISI y datos de campo.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.

2.1.Principios de la Percepción Remota.

La percepción remota o teledetección, es definida como la ciencia, arte, técnica o metodología para obtener información de un objeto, área o fenómeno a través del análisis adquirido por una fuente que no esté en contacto físico directo (Lillesand y Kiefer, 1994).

Mientras que Showengerdt (1997) la define como la medición de las propiedades de los objetos de la superficie terrestre usando datos adquiridos desde aviones o satélites.

Chuvieco (1990) definió a la percepción remota como la técnica que permite adquirir imágenes de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas espaciales, suponiendo que entre la tierra y el sensor existe una interacción energética, ya sea por reflexión de la energía solar o de un haz energético artificial o por emisión propia.

La teledetección se divide en dos ramas: teledetección aérea y teledetección espacial. La primera se refiere al uso de las fotografías aéreas y la segunda se refiere a la utilización de las imágenes de satélite.

Esta técnica, se basa en el hecho de que cada objeto de la naturaleza tiene su propia y única distribución de radiación, y utilizando el sensor adecuado es posible distinguir las características espectrales de cada objeto por sus propiedades físicas y químicas, tamaño y forma.

En la cubierta terrestre se encuentran tres formas de energía: reflectancia, absorbancia y transmitancia. Las dos primeras son las más importantes, pues son afectadas por las características físicas y la composición química del suelo y la vegetación.

Chuvieco (1990) menciona que para producirse la teledetección, es necesario la interacción de tres componentes principales: flujo energético, objeto observado y un sensor. El flujo energético se deriva de la luz solar. El objeto observado es la superficie terrestre que refleja dicha energía. Un sensor es un equipo colocado en aeronaves o satélites espaciales y opera a grandes distancias. Finalmente la energía es registrada por el sensor y es enviada a la tierra, donde se procesa y almacena la información, para ser usada en una determinada aplicación posterior. En la Figura 1, se muestra un esquema del procedimiento anteriormente descrito.

La información generada es utilizada por el gobierno, comercio, industriales, civiles e instituciones educativas. A nivel mundial es utilizada en diversas áreas de investigación, tales como: cambio de uso del suelo, agricultura, ingeniería forestal, geología, administración de recursos, geografía, mapeo, calidad del agua y oceanografía.

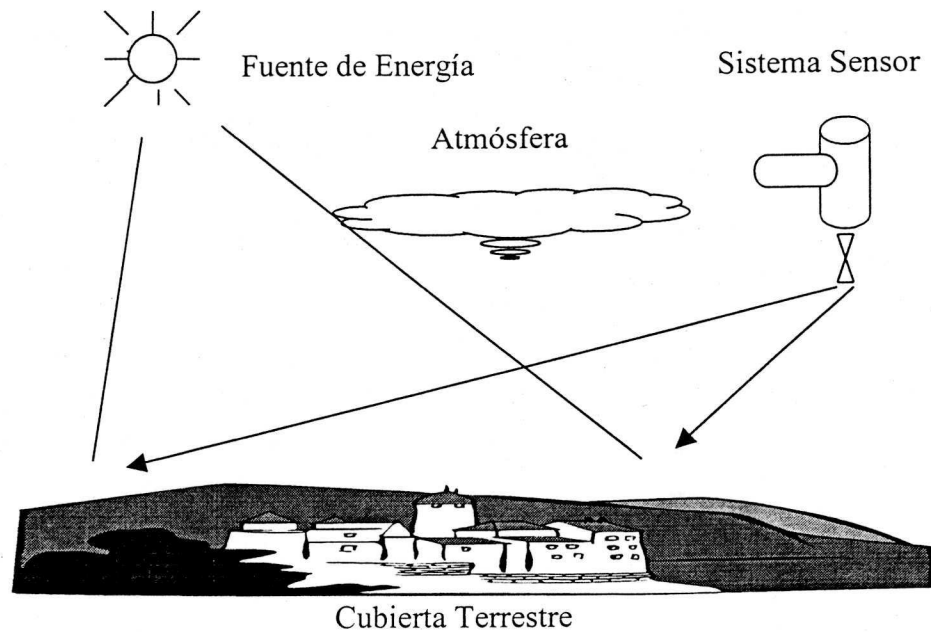


Figura 1. Componentes principales de la percepción remota.

También puede monitorearse los tipos de cambios que pueden ser identificados, incluyendo el desarrollo agrícola, deforestación, desastres naturales, urbanización, desarrollo y degradación de recursos hídricos. Inclusive, estas imágenes de satélite son útiles para determinar el tipo y salud de la vegetación, humedad del suelo, nieve, discriminación de tipos de rocas o suelos, etc.

El sensor de un satélite explora secuencialmente la superficie terrestre adquiriendo a intervalos regulares la radiación que proviene de los objetos sobre ella situados. La cadencia con la que el sensor realiza el muestreo de la superficie terrestre define la resolución espacial, que es la unidad visual más pequeña que aparece en una imagen; toda la gama de reflectancia de esta unidad de superficie terrestre, el sensor lo promedia y traduce en un valor numérico, a partir del cual se hace un tratamiento digital de imágenes. En consecuencia, cada píxel está definido por un número, traducción de la

radiancia recibida por el sensor para una determinada unidad de área de la superficie terrestre y en una banda específica del espectro, que se llama Nivel Digital (Chuvieco, 1990).

Esto es el principio fundamental en el cual se basa la teledetección; ya que como lo menciona Melesio-Nolasco (1991) con el uso de instrumentos de teledetección, la brillantes del objeto es captada por el sensor en un rango de reflectancia determinado. El comportamiento de la reflectancia de un objeto constituye un modelo de respuesta espectral, es decir, las propiedades específicas de cada material generan una distribución específica de la reflectancia de la energía, generando un patrón único tan exclusivo como la huella digital o firma espectral.

2.2. El Programa Landsat.

2.2.1. Historia y características de los satélites

El primer satélite civil para proveer información de recursos de la tierra fue concebido en la NASA y el DIEU, en la década de los 60's. De esta manera, en 1972, fue lanzado al espacio el primer satélite de esta serie, con el propósito de proveer información de la superficie terrestre, dejó de operar en 1978. En segundo satélite fue lanzado en 1975, dejando de operar en 1982. En este mismo año el programa cambio de nombre, de ERTS a Landsat.

El tercer satélite, llamado Landsat 3, fue lanzado en 1978, dejando de operar en 1984. El cuarto y quinto satélites fueron lanzados en 1982 y 1984, respectivamente. Estos satélites siguen operando actualmente. Los satélites Landsat 4 y 5, llevan sensores MSS semejantes a los Landsat 1 y 2, y un sensor denominado mapeador temático (TM). Proveen información cada 16 días, con un cruce ecuatorial de 9:30 a 10:00 a.m. (U.S.G.S., 1995).

Una imagen de estos satélites tiene una cobertura de 180 x 180 km (6166 x 6166 bytes). Esta representa la energía promedio reflejada por la superficie terrestre en un píxel (30 x 30 m). Con valores de 0 a 255 puntos (nivel digital o valor de píxel), el 0 representa nada de iluminación (oscuro) y un valor de 255 representa total iluminación (brillante). Dicha imagen contiene información que ocupa el tamaño de 230 MB, lo que requiere una estación de trabajo que pueda manejar esas capacidades de memoria.

El satélite Landsat 6, se lanzo en 1993 con un nuevo sensor el ETM (Enhanced Thematic Mapper), pero lamentablemente fue destruido en el lanzamiento. Debido a esto, se adelanto para julio de 1998 el lanzamiento del satélite Landsat 7 con un sensor ETM+ mejorado que tiene mejor resolución espectral y espacial, entre otros aspectos (Soria, 1999). En el Cuadro 1 se muestran las características generales de los satélites Landsat.

Cuadro 1. Características de los Satélites Landsat

SATÉLITE	LANZADO	CESADO	SENSORES
Landsat 1	Julio 23, 1972	Enero 6, 1978	MSS y RBV
Landsat 2	Enero 22, 1975	Febrero 25, 1982	MSS y RBV
Landsat 3	Marzo 5, 1978	Marzo 31, 1983	MSS y RBV
Landsat 4	Julio 16, 1982	Vigente	TM y MSS
Landsat 5	Marzo 1, 1984	Vigente	TM y MSS
Landsat 6	Octubre 5, 1993	Desplomado	ETM
Landsat 7	Julio, 1998	Vigente	ETM+ *

* Enhanced Thematic Mapper Plus

Fuente: Eros Data Center (1995)

Soria (1999)

2.2.2. Características del sensor TM.

El Thematic Mapper (TM) es un equipo de barrido multiespectral que detecta principalmente la radiación reflejada de la superficie de la tierra en las longitudes de onda visibles y cerca del infrarrojo.

Este sistema tiene 100 detectores, aumenta los niveles de codificación y realiza el barrido en las dos direcciones, lo que permite mejorar la resolución espacial, espectral y radiométrica.

Dicho sensor, provee información diariamente a una red de 16 estaciones en tierra ubicadas a nivel mundial. Estas estaciones a su vez, transmiten la información a una terminal localizada en Nuevo México, E. U.

El sensor TM diseñado para la cartografía temática, ofrece una resolución espacial o tamaño nominal de píxel de 30 m, a excepción de la banda 6 que presenta una resolución de 120 m. Los niveles digitales son cuantificados en 8 bits ó 256 niveles de brillo (Soria *et al.*, 1998).

El sensor tiene 7 bandas, cada una de las cuales capta una determinada longitud de onda y, su aplicación de cada banda es diferente, así por ejemplo, la banda 1 se usa para estudios hidrológicos y mapeo de costas, la banda 2 para estudios de vegetación sana y vigor, la banda 3 para clasificación de vegetación y estudios de clorofila, la banda 4 para el contenido de biomasa y cuerpos de agua, la banda 5 para contenidos de humedad, nieve y nubes, la banda 6 para estudios vulcanológicos y de contaminación, y la banda 7 para estudios de fisiografía del terreno. O se pueden utilizar combinaciones de bandas para diferentes propósitos. En el Cuadro 2 se muestran algunos usos de cada una de las bandas.

2.2.3. Índices de Vegetación.

Los cocientes o índices de vegetación son una de las transformaciones que cuentan con mayor interés en aplicaciones del medio ambiente, es decir, son operaciones dirigidas para crear bandas artificiales a partir de combinaciones entre las bandas originales. Su empleo se ha justificado en dos situaciones: para mejorar la discriminación entre suelo y vegetación, y para disminuir el efecto del relieve (pendiente y orientación) en la caracterización espectral de distintas cubiertas (Soria *et al.*, 1998).

Cuadro 2. Usos de las Bandas de la Imagenes Landsat

Banda	Definición o Rango (μm)	Resolución Píxel (m)	Usos y aplicaciones
1	Azul-verde (0.45 a 0.52)	30x30	Análisis de cuerpos de agua (batimetría, etc.) Características de suelo y vegetación, Discriminación de especies forestales, etc.
2	Verde (0.52 a 0.60)	30x30	Discriminación y vigor de la vegetación, Absorción de clorofila, Reflectancia de turbidez de aguas, etc.
3	Rojo (0.63 a 0.69)	30x30	Discriminación de la vegetación, Contraste entre tipos de vegetación, Diferenciación entre vegetación y no vegetación, etc.
4	Infrarrojo cercano (0.76 a 0.90)	30x30	Identificación de cosechas (biomasa), Contrastes entresuelo-cosecha y tierra-agua, Indicador de la estructura celular de las plantas, etc.
5	Infrarrojo medio (1.55 a 1.75)	30x30	Determinación del tipo de vegetación, Contenido de agua de la vegetación, Condiciones de la textura y humedad del suelo, etc.
7	Infrarrojo medio (2.08 a 2.35)	30x30	Discriminación entre tipos de formaciones del suelo, Tipos de rocas, Zonas de alteración hidrotermal, etc.
6	Infrarrojo lejano (10.40 a 12.50)	120x120	Banda infrarroja térmica, Discriminación de humedad del suelo, mapeo termal, Análisis de estrés de la vegetación, etc.

Fuente: Campbell, 1996.

Uno de estos índices, es el NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada) que resulta de dividir píxel a píxel los valores de reflectancia de dos bandas, para el caso de las imágenes Landsat-TM, son la banda 4 (infrarrojo cercano) y la banda 3 (rojo), aplicando la formula:

$$NDVI = (TM \text{ banda } 4 - TM \text{ banda } 3) / (TM \text{ banda } 4 + TM \text{ banda } 3).$$

El valor resultante está acotado entre -1 y +1, con un umbral crítico en torno a 0.2, en el cual a partir de este valor hay un buen desarrollo vegetal (Flores-López y Scott, 2000).

2.3. Características de la Cubierta Terrestre.

Las diferentes cubiertas presentes en la superficie terrestre tienen su propia forma de emitir o reflejar la energía en diferentes longitudes de onda, lo cual facilita la discriminación entre los distintos tipos de cubierta terrestre.

La vegetación típicamente muestra una reducida reflectividad en las bandas visibles, con un máximo relativo en la porción verde del espectro. Por el contrario, en el infrarrojo cercano presenta una elevada reflectividad, reduciéndose hacia el infrarrojo medio.

Lillesand (1979) por su parte dice que la baja reflectividad en el espectro visible se debe al efecto absorbente de los pigmentos de la hoja, como las xantofilas, carotenos y clorofilas. Todos ellos absorben en la banda del espectro situado en torno a los 0.445 micras, mientras que la clorofila presenta una segunda banda de absorción a los 0.645 micras. Cuando se presenta la caída de las hojas, la clorofila ejerce una menor influencia y por lo tanto, baja su reflectividad.

La alta reflectividad en el infrarrojo cercano (0.7 a 1.3 micras), parece deberse a la estructura interna de la hoja, En concreto a la capa esponjosa del mesófilo, con sus cavidades de aire internas; sin embargo, esta estructura es altamente variable entre especies, por lo que, las medidas de reflectancia obtenidas en este rango permiten hacer una discriminación entre las especies, aunque estas muestren la misma longitud de onda.

Por otra parte, la composición química y las características físicas del suelo, afectan la reflectancia y absorbancia, lo que se puede aprovechar para poderlo clasificar en distintos tipos de suelo. La Figura 2 muestra las características en forma general de cómo las diferentes cubiertas de la superficie terrestre reflejan la radiación solar.

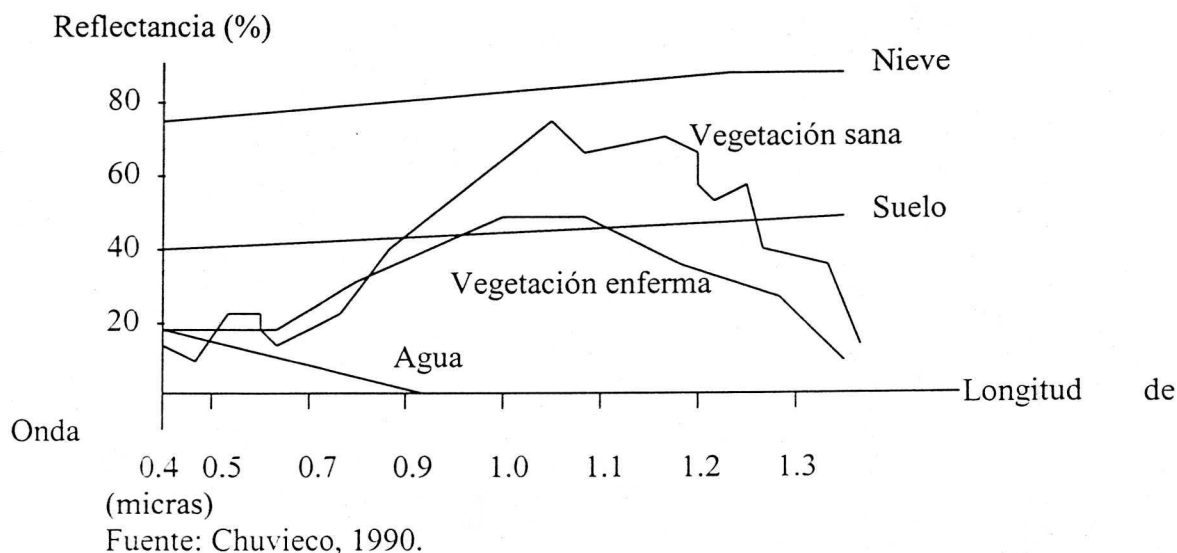


Figura 2. Reflectividad de la cubierta terrestre

2.4. Uso del agua residual en la agricultura.

La producción de aguas residuales y los lodos de origen urbano crecen junto con el desarrollo de las plantas de depuración; y que, la demanda de sustancias nutritivas para el terreno y de agua para riego aumentan de manera continua. Debido a estas dos condiciones económicas, los gobiernos se ha visto obligados a sugerir el uso agrícola de los lodos y el uso de aguas residuales, ya que el costo de los abonos se ha incrementado considerablemente durante estos últimos años, y los lodos y las aguas residuales contienen nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas (Gamrasni, 1985).

Por su parte, Navarro *et al.* (1998) señalaron que el agua residual contiene materia orgánica en diversos grados de descomposición y nutrimentos en forma soluble de elementos mayores (N y P) y elementos menores, que favorecen el crecimiento adecuado de los cultivos.

El uso del agua residual y de los lodos como abono es un aspecto positivo desde el punto de vista económico (más baratos) y de fertilidad (mayor producción), pero desde el punto de vista sanitario, su uso muestra muchos puntos en contra (son causa de enfermedades), que lo hacen objeto de muchas controversias.

Kowal *et al.* (1981) en sus investigaciones han encontrado que las aguas residuales poseen elementos y compuestos contaminantes como detergentes, hidrocarburos y metales pesados. Así mismo, posee organismos patógenos que al dispersarse en agua, suelo, aire, acuífero y en cultivos puede causar problemas de salud humana en el corto y largo plazo.

Seoanez (1995) indica que las aguas residuales pueden ocasionar contaminación por exceso de elementos (sobre todo de metales pesados) y otros compuestos que pueden ser nocivos para la salud. En el Cuadro 3 se muestran algunas propiedades de las aguas residuales.

No se deben utilizar indiscriminadamente el agua residual y los lodos en la agricultura, puesto que dicha agua y lodo no solo contienen sustancias benéficas para las plantas y el terreno, sino también otras sustancias potencialmente desfavorables al ambiente, cuyo

efecto se puede manifestar inmediatamente o en un plazo más o menos largo. En este sentido, un aspecto poco estudiado es la lixiviación de nitratos, los cuales pueden ser contaminantes si llegan al agua potable.

Cuadro 3. Propiedades de las Aguas Residuales.

POSITIVAS	NEGATIVAS
Contiene nutrimentos para las plantas	Dan mal olor
Aporta materia orgánica	Traen contaminantes
Mejoran la estructura del suelo	Tienen metales pesados
Pueden regular el pH	Traen consigo patógenos
Ahorran fertilizantes	Pueden causar toxicidad a las plantas
Disminuyen costos	Generan enfermedades
Fertilizan el suelo	Difícil su manejo

Fuente: Seoanez, 1995.

2.4.1. Lixiviación de nitratos.

La lixiviación del nitrógeno se refiere al desplazamiento vertical de este nutrimento más allá de la zona de exploración de las raíces como consecuencia de la infiltración del agua al suelo, lo cual ocurre con mayor intensidad durante el descanso del terreno y al inicio de la etapa de crecimiento del cultivo (Galvis, 1998).

Además, Legg y Meisinger (1982) mencionan que el N se pierde por lixiviación principalmente en forma de NO_3^- (nitratos) debido a que estos son completamente móviles y se desplaza libremente con el agua del suelo. Se menciona que la lixiviación de nitratos (NO_3^-) ocurre cuando en el suelo existe altos contenidos de NO_3^- y porque el movimiento del agua es alto.

También es importante mencionar que la lixiviación de los nitratos depende de la textura del suelo, cantidad y frecuencia de la precipitación, manejo de fertilizantes e irrigación de las parcelas, al igual de las transformaciones del N en el suelo (Yadav S. N., 1997). Además, también influye un intercambio cationico bajo y a la demanda del cultivo por dicho nutrimento (Garnes y Garnes, 1994).

En general, la lixiviación de N en forma de nitratos, generalmente, tiene lugar en suelos muy arenosos, con exceso de movimiento descendente de agua y a la alta concentración de nitratos en el perfil del suelo. El problema se presenta cuando los nitratos escapan del sistema radicular del cultivo y se acumulan en las aguas subterráneas, ya que el consumo de estas con alto contenido de nitratos causa problemas de salud al hombre y a los animales (Seoanez, 1995).

Keeney y Follet (1991) en sus estudios encontraron que la acumulación de NO_3^- en aguas subterráneas se ha asociado recientemente con el uso de abonos nitrogenados en la agricultura y por el uso de aguas residuales. Cuando estas aguas subterráneas llegan al hombre y los NO_3^- son ingeridos en altas concentraciones, estos se transforman en NO_2^- (nitritos) que reaccionan con la hemoglobina, restándole capacidad para transportar O_2 , enfermedad llamada Metahemoglobinemia.

Dicho efecto es mayor en niños menores a cuatro meses, cuyo metabolismo favorece la transformación de NO_3^- a NO_2^- , mientras que en adultos, los NO_2^- reaccionan en el estómago con alimentos parcialmente digeridos para generar nitrosaminas, capaces de producir cáncer.

Los NO_3^- se ingieren por tres vías: en el agua potable, al consumir vegetales (remolacha, acelga, lechuga, pepinos, etc.) y al consumir conservas de carne que poseen aditivos a base de nitratos y nitritos. La OMS (Organización Mundial de Salud) fijó en 50 mg de $\text{NO}_3^- \cdot \text{L}^{-1}$ la concentración máxima de NO_3^- admisible en el agua potable. En la Figura 3 se muestran estas vías, haciendo hincapié en la lixiviación.

2.4.2. Uso del agua residual y la lixiviación de nitratos en el Valle del Mezquital.

Mendoza (1981) indica que las aguas residuales de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) que entran al Valle del Mezquital por el Emisor Central, Emisor del Poniente y el Gran Canal de desagüe, son usada para la producción agrícola. El riego se viene haciendo desde 1886 y la infraestructura hidráulica actual se inició con la fundación del Distrito de riego 03 en 1945.

Gutierrez *et al.* (1994) mencionan que el agua residual de la ZMCM no tiene ningún tratamiento, pero mejora su aspecto físico en los 60 km que recorre hasta llegar a los sitios donde se utiliza y por el tiempo de reposo en la presa Endhó donde se almacena.

Vázquez (1999) y Cuadri (1989) mencionan que a pesar de esta situación, aparentemente tan negativa, los beneficios económicos que ha traído el uso del agua residual tan importantes que no importa si se genera contaminación con tal de tener alimentos, son los siguientes:

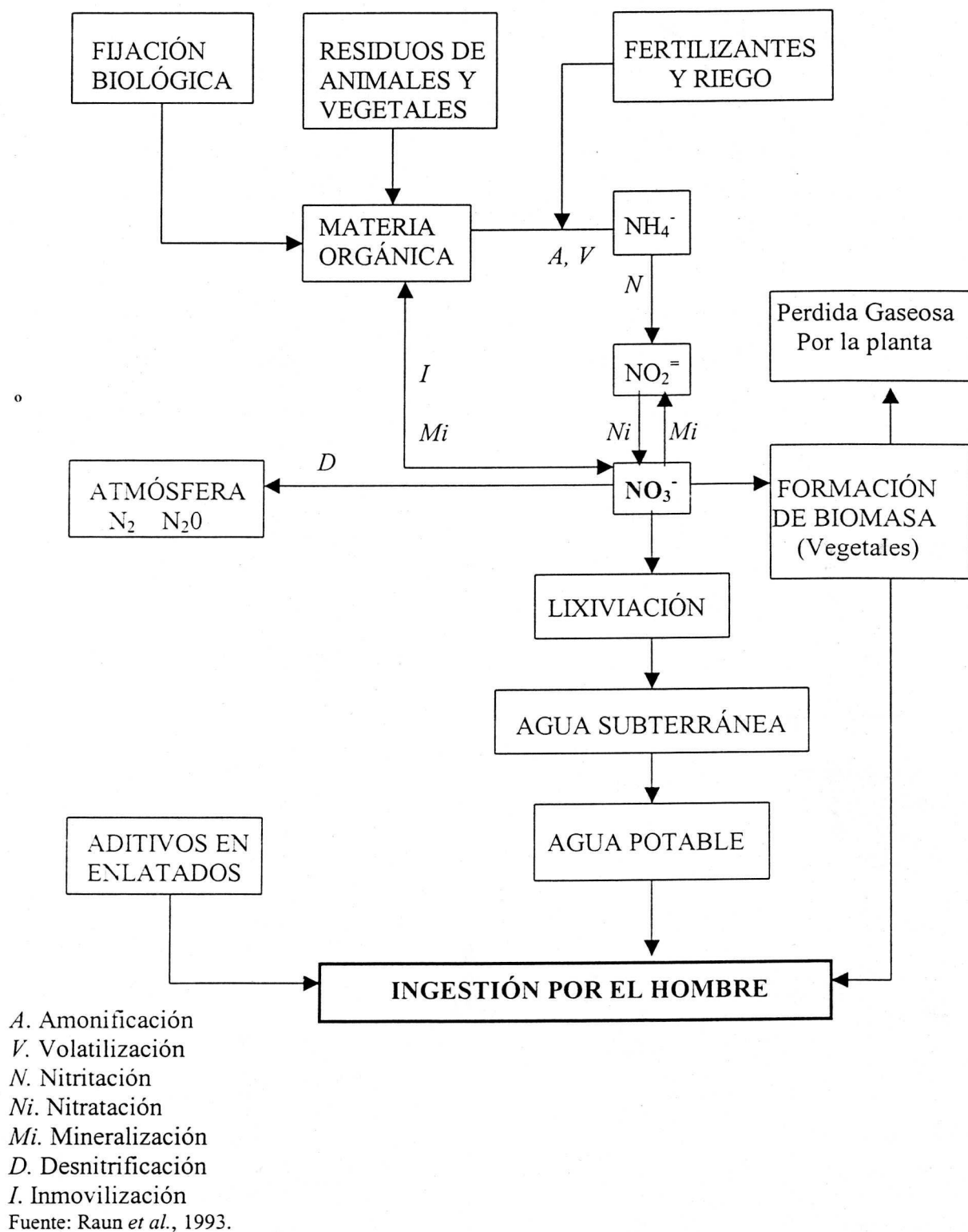


Figura 3. Las Rutas de los Nitratos.

1. La transformación de una zona desértica en una región de producción agrícola obteniendo rendimientos de maíz, frijol, alfalfa y trigo, de 4.5, 1.4, 96.8 y 3.1 ton· ha⁻¹, respectivamente y sin aplicación de fertilizantes comerciales.
2. Genera empleos y es fuente de ingresos a la economía de la población; y
3. El aporte al suelo de materia orgánica en diversos grados de descomposición y nutrimentos esenciales para el crecimiento de los cultivos.

El área irrigada en el Valle del Mezquital tiene una extensión aproximada de 100,000 ha, que se abastece de aguas residuales (50'000,000 m³ año⁻¹) y del agua de lluvia. La aplicación total varía en una lámina de riego aplicada a los cultivos de 1500 a 2000 mm· ha⁻¹· año⁻¹ (Gutiérrez *et al.*, 1994).

Los principales cultivos en la zona son: alfalfa (40%), maíz (33%), jitomate (14%) y trigo (12%), en menor proporción se produce frijol, avena forrajera y chile (Hernández *et al.*, 1993).

El problema del aporte de N por el agua residual, es que la demanda del nitrógeno y del agua no siempre coinciden con los requerimientos del cultivo. El exceso de nitrógeno, además de perjudicial a las plantas, puede perderse por desnitrificación, volatilización o lixiviarse en forma de nitrato y contaminar las aguas subterráneas (Ramos, 1997).

Cuadri (1989) por su parte indica que el problema del uso de las aguas residuales de la ZMCM en el Mezquital no puede reducirse sólo a los efectos contaminantes que provoca, lo que no quiere decir que se nieguen dichos efectos, sino que se deben considerar una serie de elementos que nos permitan descubrir la complejidad de los fenómenos que encierra su aprovechamiento. La cuestión no puede reducirse así se usan o no las aguas residuales en la región, sino más bien en garantizar su calidad para su empleo en la agricultura y otras actividades, así como distribuirla equitativamente.

2.5. Los Sistemas de Información Geográfica.

Los sistemas de información geográfica (SIG), son sistemas constituidos por un hardware y un software, diseñados para la captura, manejo, análisis, modelado y despliegue de datos georreferenciados. Es decir, es un sistema computarizado que posee información espacial-geométrica, con ubicación y atributos asociados, que son representados digitalmente.

Los modelos de datos que procesa el SIG son: Celdas (matriz o RASTER) y Vectores; las primeras, divide el área de estudio en una malla, existe mayor información en los datos, mientras que los vectores utiliza puntos y segmentos de líneas separadas o conectadas entre sí. Por último, el SIG permite la conversión entre ambos modelos (Chuvienco, 1990).

Algunos de los software de un SIG, son: comerciales como el ARC/INFO, TIGRIS y SPANS, públicos como el GRASS y MOSS ARWIE, y de enseñanza como el IDRISI,

ArcView e ILWIS. La información es obtenida de los mapas, fotos aéreas, imágenes de satélite y de los datos estadísticos.

El primer SIG se implementó en Canadá en 1964 para el inventario de uso de suelo, y Estados Unidos en 1966, lo hace para los recursos naturales y uso del suelo. De esta forma se inicia el uso de estos sistemas, y ahora son mundialmente utilizados para muy diversas actividades.

Álvarez (1995) indica que la percepción remota, los sistemas de información geográfica y los sistemas espaciales de comunicación y posicionamiento, son tecnologías de gran servicio a la humanidad, que están ya integradas al estudio de nuestro planeta. El impulso de esta actividad, debe estar acorde con la magnitud del territorio del que somos responsables, para conocerlo, describirlo, protegerlo, preservarlo y explotarlo con criterios de sostenibilidad.

2.5.1. Los SIG y la Percepción Remota en Estudios Ambientales.

En esta sección, se indican algunos trabajos que utilizan la percepción remota y la aplicación de los sistemas de información geográfica, para conocer de manera más rápida y económica la situación de algún problema en general.

Bolaños (2000) realizó un estudio con imágenes de satélite Landsat TM para estimar la superficie cultivada y los volúmenes de agua de riego utilizados en unidades de riego del Estado de Guanajuato, en el cual pudo identificar cuatro clases correspondientes a

cultivos agrícolas, con una precisión global del 82%; además, estimó con precisión adecuada el volumen de agua utilizado en el riego de cultivos durante el ciclo agrícola otoño-invierno del 97-98.

Pulido, *et al.* (1999) utilizaron imágenes de satélite Landsat TM y un sensor electromagnético portátil par identificar áreas con problemas de sales en el Distrito de Riego 075 Río Fuerte, Sinaloa. El estudio se realizó para cuatro cultivos (maíz, trigo, algodón y sorgo), de acuerdo a los resultados obtenidos, la conductividad eléctrica se relaciona linealmente con las reflectancias de las bandas 2, 3 y 4 de la imágenes Landsat TM. Los coeficientes de regresión se encontraron en el rango de 0.67 a 0.85.

Panario (1995) en un estudio realizado en la cuenca de la Laguna de Merín, Uruguay, limítrofe con Brasil, donde el uso de la tierra es: ganadero extensivo, el ganadero con rotación de arroz, el área ha sido afectada por obras de infraestructura indebidamente planificadas (represas, canales y drenajes), que han generado conflictos entre los productores. Con el uso de la imagen Landsat TM de 1992, y realizando y una clasificación (supervisado y no supervisada), se produjo y digitalizó una carta de aptitud arrocera de los suelos, que nos indica que el arroz se produce en áreas no aptas para el cultivo y que la frontera agrícola esta cubierta, además se identificaron tierras en degradación por el mal manejo de las tierras agrícolas.

Watts *et al.* (1999) realizaron un estudio utilizando imágenes de satélite GOES para estimar la radiación solar y evapotranspiración potencial en el Valle del Yaqui, Sonora. Se comparó el método de Makkink (con datos obtenidos de las imágenes de satélite) con

los métodos de Penman, Penman-Monteith y Priestley-Taylor (calculados con datos de estaciones meteorológicas automatizadas). Los resultados obtenidos fueron satisfactorios, ya que las estimaciones hechas con los datos de las imágenes GOES de la radiación solar incidente y evapotranspiración potencial produjeron resultados preciso, comparados con los datos calculados a partir de las variables climatológicas medidas en tierra. En conclusión, es posible utilizar imágenes GOES para producir mapas confiables de evapotranspiración potencial, en lugares donde los datos meteorológicos de superficie no son suficientes.

Pulido, *et. al.* (1995) utilizaron las imágenes de satélite para estimar la pérdida de rendimiento del trigo cultivado en el Valle del Carrizo, Estado de Sinaloa, México; que es una zona con problemas de salinidad en el suelo. Fue una imagen Landsat TM y una SPOT pancromática, de febrero y marzo de 1994, respectivamente; las cuales originaron una imagen compuesta. Por otro lado, en 4 parcelas de trigo se tomaron datos de campo (conductividad eléctrica y rendimiento de grano). Se extrajeron los conteos digitales de la imagen en cada punto de muestreo, y se correlacionaron con los datos de campo para obtener ecuaciones de regresión que estimarán la salinidad y el rendimiento en grano. Los valores medios de las firmas espectrales se sustituyeron por los valores de salinidad y rendimiento, generando un mapa de clases de salinidad y un mapa de clases de rendimiento. Con esto, los resultados indicaron que de las 19,387 ha, 6,927 ha presentan problemas de salinidad (entre 4 y 16 dSm⁻¹), dejando de producir 10 mil toneladas de trigo aproximadamente, pues el promedio del rendimiento es de 5.33 tonha⁻¹. También se concluye que las imágenes de satélite permiten detectar las variaciones de salinidad

de los suelos agrícolas, siempre y cuando se tome un cultivo indicador de sales como es el trigo.

Ibáñez, *et. al.* (1995) estudiaron las zonas degradadas del Valle de Tulum, Argentina, afectadas por el proceso de salinización (50,000 ha). El deterioro de los suelos se debe al mal manejo hídrico, falta de mantenimiento de drenes, y el abandono de parcelas. Se tomo una zona piloto, ubicada al sur del valle y representativa del área de estudio, donde hay cultivos con alta producción, otros con baja producción, cultivos abandonados, charcas, montes naturales y, suelos con escasa cobertura vegetal (suelos salinos). Con información temática a detalle de un estudio de suelos, y con las muestras de cada una de las clases, se verificó en campo la bondad de las clases, dando como resultado la identificación de suelos salinos, con sales en superficie, con alta reflectancia en todas las bandas. Se pudo delimitar claramente el área cultivada de las zonas con vegetación natural por su respuesta espectral y textura. Se cuantificaron las áreas identificadas como salinizadas con un alto grado de confiabilidad.

Montalvo, *et. al.* (1995) en su investigación realizaron la zonificación de áreas húmedas con problemas de drenaje y salinidad en los valles de Jequetepeque-Chaman. El área en estudio se ubica en la región de la costa del Perú a 700 km al norte de Lima, Departamento de la Libertad. Con las tecnologías de los sistemas de información geográfica y percepción remota, alimentada con información cartográfica y bibliográfica existente para la zona y complementada con trabajo de campo, se analizó la información. Existe un incremento de áreas húmedas con problemas de drenaje y salinidad comparando diferentes años, encontrándose que para 1994 existen 25,480 ha

consideradas como áreas húmedas, de las cuales 13,535 ha (52%) pertenece al áreas de influencia del valle Chaman (5,445 ha, la capa freática se encuentra entre 0-0.5 m y 8,090 ha, la capa freática se encuentra entre 0.5-1 m) y 12,304 ha (48%) pertenecen al valle de Jequetepeque (4,121 ha, la capa freática se encuentra entre 0-0.5 m, y 8,183 ha, la capa freática se encuentra entre 0.5-1 m).

Thiruvangadechari y Sakthivadivel (1997) realizaron una evaluación del funcionamiento del sistema de riego de Barda, India; en el cual se utilizaron imágenes de satélite Landsat TM e IRS-LISSI y LISSII (Linear Imaging Self-Scanning Sensor). Se estimó el área cultivada con arroz, se midió el efecto de la inundación del cultivo en la productividad y se obtuvieron modelos matemáticos de predicción de rendimientos, relacionándolo con el NDVI (Índice de Vegetación de Diferencias Normalizadas), obteniendo un coeficiente estadísticos de correlación de 0.76.

Villwock citado. por Buendía (1996) realizó un estudio sobre la geografía física del sureste de Yemen, basada en la evaluación de literatura, mapas, superficies de campo y la interpretación de datos de sensores remotos, realizando un análisis a lo largo de componentes del paisaje. La estructura del paisaje de la región entera y de varias áreas donde la región es característica. De la evaluación general se obtuvo que el 4 % del total de áreas es sustentable para la agricultura arable, y el 75 % es para riego.

Kuntschik, *et. al.* (1995) estimaron la perdida de suelo por erosión hídrica, que es un grave problema en áreas agrícolas, donde la acción antrópica desestabiliza el equilibrio entre formación y pérdida de suelo. Esta pérdida se ve acentuada en regiones donde la

topografía presenta formas muy onduladas y donde los ciclos de los cultivos dejan la superficie de la tierra descubierta por algún intervalo de tiempo. En este trabajo se implementó el modelo *Ecuación Universal de Pérdida de Suelos*, en ambiente SIG, para la cuantificación de la pérdida de suelos en un área de gran importancia agrícola para el Brasil. Se dividió el año agrícola (1992-1993) en cuatro períodos, y se calculó la pérdida en cada uno de ellos, esta se compara con la tolerancia de pérdida para cada tipo de suelo presente en el área y se discriminó el uso adecuado o inadecuado del suelo. Los parámetros incluidos en la ecuación fueron obtenidos a partir de cartas topográficas, datos pluviométricos, cartas de suelos, trabajo de campo e imágenes TM Landsat correspondientes a los distintos periodos del año agrícola elegido.

Moreno, *et. al.* (1995) estudiaron la zona de Vichada, Colombia, que se caracteriza por ser una región plana, con hidrografía abundante, clima cálido, cobertura vegetal densa, humedad constante y zonas de inundación. Utilizaron las imágenes de satélite para identificar drenajes en una superficie con cobertura vegetal, caracterizándolos y obtener mapas temáticos, además de generar una metodología para mapear drenaje. La metodología se basó en un proceso digital básico (análisis radiométrico y bandas que mejor resaltaba el drenaje, con histogramas, filtros y correlaciones) y un proceso digital físico (con algoritmos para correcciones atmosféricas, se obtuvieron nuevas imágenes de reflectancia). Se obtuvo un índice de vegetación normalizado y un índice de suelo-humedad, para calcular el índice de drenajes. Dicho índice de drenajes, permite obtener una cartografía más precisa, una mejor determinación de contornos de superficies de agua, y un inventario aproximado de los drenajes existentes en la zona.

3. OBJETIVOS.

Objetivo general.

3.1. Generar una metodología para la detección de áreas con problemas de concentración de nitratos en zonas agrícolas, utilizando imágenes de satélite.

Objetivos específicos.

3.1.1. Clasificar zonas agrícolas de acuerdo a su nivel de concentración por nitratos.

3.1.2. Delimitar zonas con potencial de lixiviación de nitratos, de acuerdo a las características de suelo y cultivo.

3.1.3. Determinar la eficiencia de las imágenes de satélite Landsat-TM respecto a los datos tomados en campo para clasificar las áreas con problemas de concentración de nitratos.

4. HIPÓTESIS.

4.1.1. En el Valle del Mezquital existen zonas agrícolas que se diferencian por su concentración de nitratos en el perfil del suelo.

4.1.2. En el Valle del Mezquital existen zonas con diferente grado de riesgo de lixiviación de nitratos, cuya concentración en el suelo y plantas pueden captarse en una imagen de satélite.

4.1.3. Las imágenes de satélite Landsat-TM son confiables y precisas para clasificar zonas con problemas de contaminación por lixiviación de nitratos.

5. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1. Área de estudio.

El área de estudio se localiza en la región conocida como el Valle del Mezquital, en el estado de Hidalgo. El suelo y el clima, determinan en cierta medida la existencia de las especies vegetativas, las cuales se ven alteradas por las actividades antropogénicas. La región de estudio esta desprovista de su vegetación natural en gran parte de ella, por la introducción de cultivos (INEGI, 1992).

El motivo de estudio de esta zona radica en el hecho de ser una importante zona agrícola y tener una excesiva cantidad de agua residual empleada, lo que origina la posibilidad de ser un área con problemas de lixiviación de nitratos.

5.1.1. Ubicación geográfica.

La región del Valle del Mezquital se sitúa entre los paralelos 20 00' y 20 26' de latitud norte y los meridianos 98 55' y 99 25' de longitud oeste, y comprende el Distrito de Riego 03 Tula, que cuenta con una superficie de 52,118 ha, ocupando parte de los municipios y poblados de Tula, Tlaxcoapan, Mixquiahuala, Actopan, Tepetepec, Atitalaquia, Tlahuelilpan y Progreso. Presenta altitudes que van de 1900 a 2200 m.s.n.m. Está situado a 80 km al norte de la Ciudad de México (SRH, 1976). En la Figura 4 se puede observar la zona de estudio.

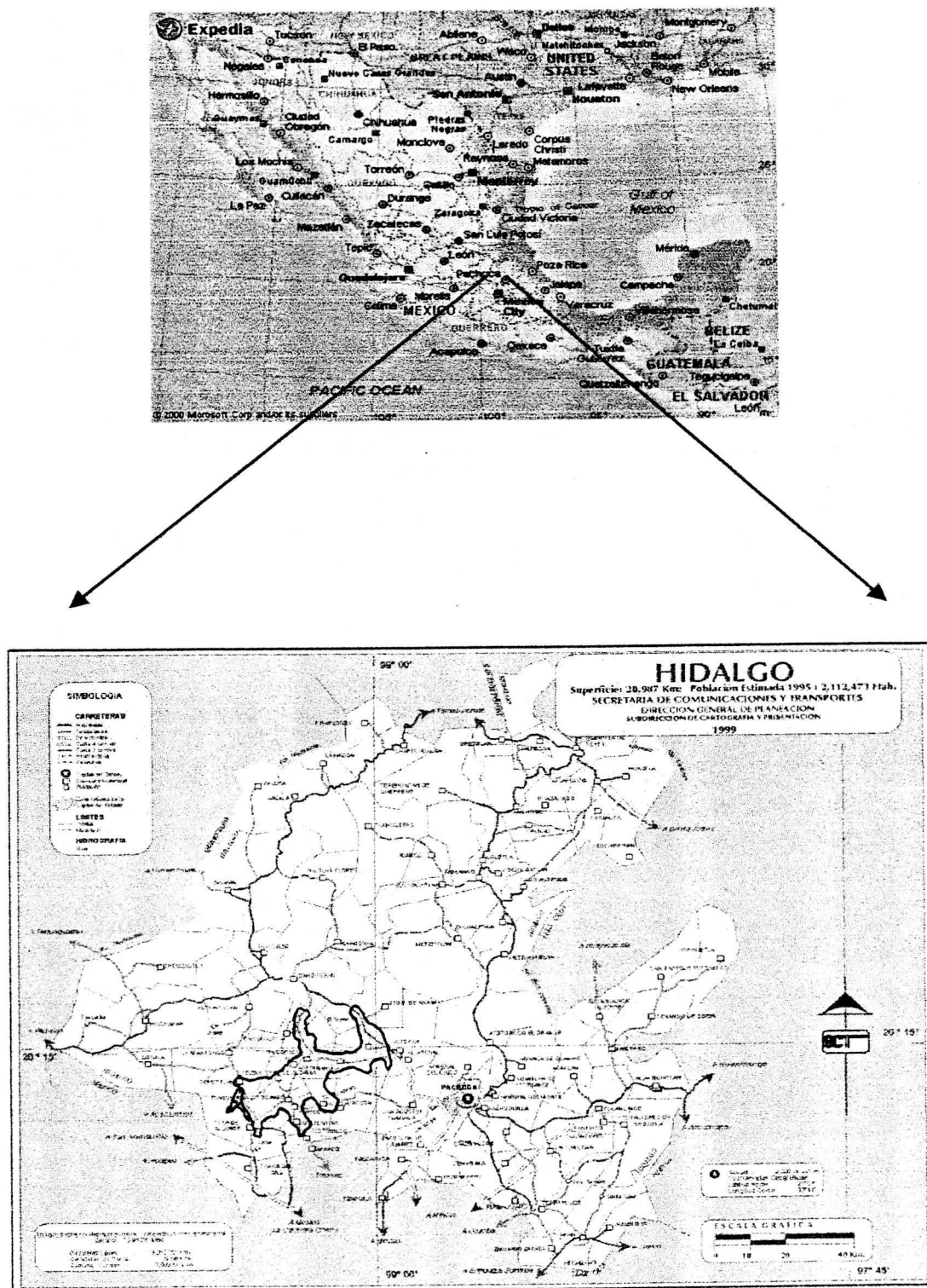


Figura 4. Ubicación geográfica del Valle del Mezquital.

5.1.2. Clima.

El clima representativo del área es Bs1Kw(i)gw'', que es el menos seco de los climas áridos templados (García, 1988). La temperatura media anual es 17.5° C, la evapotranspiración es de 810.3 mm y la precipitación varía con un rango anual de 200 a 500 mm (SRH, 1976).

5.1.3. Hidrología.

La zona de estudio esta inmersa en la Región Hidrológica "Río Panuco" en la cuenca del "Río Moctezuma". El río Tula es el principal de la región o río Moctezuma en la zona limítrofe con el Estado de Querétaro, además de los ríos San Luis, Tepeji y El Salto. Además de contar con los volúmenes de agua de las presas Taxhimay, Requena y Endhó (INEGI, 1992).

Por otra parte Cuadri (1989) menciona que el Distrito de Desarrollo Rural 03, es uno de los más grandes del país con 514,411 ha (16.4% de riego, 33.6% de temporal, 48.9% de ganadería extensiva, y 3.1% de forestal); tiene un volumen aproximado de aguas residuales de 1,800 mil m³ al año, que significan un promedio de 57.08 m³ · seg⁻¹.

5.1.4. Geología.

El Valle del Mezquital esta dentro de la provincia del Eje Neovolcanico y esta constituida predominantemente por rocas volcánicas terciarias y cuaternarias (brechas,

tobas y derrames riolíticos, intermedios y basálticos), superpuestas a las rocas sedimentarias mesozoicas por los fenómenos de vulcanismo (INEGI, 1992).

5.1.5. Suelos.

En la región predominan 4 series de suelos: Tepatepec, Actopan, Progreso y Lagunillas, ocupando el 91.9% (SRH, 1976). Maples (1990) dice que los suelos se derivan de material volcánico y sedimentario, en las partes más altas los suelo son someros desarrollados "*in situ*" y en las partes bajas predominan los suelos aluviales. López et al. (1994) mencionan que los suelos de estas series son: Phaeozems, Leptosoles, Anthroposoles, Regosoles, Fluvisoles y Luvisoles, predominando los dos primeros.

5.1.6. Vegetación.

La vegetación natural se encuentra fuertemente alterada debido a que los suelo han sostenido una agricultura continua por más de 80 años. En terrenos no cultivados predominan: agaves fibrosos, pirules, mezquites, magueyes y frutales; mientras que en terrenos cultivados se produce: maíz, alfalfa, frijol, cebada y trigo, entre otros.

Los cultivos de maíz y alfalfa, cubren el 72.3% de la superficie, de ésta la alfalfa ocupa el 39.3 % que corresponde a 14,682 ha, y el maíz ocupa el 33 % de la superficie (12,328 ha); de ahí la importancia de estos dos cultivos en el presente estudio.

La producción de ciertos cultivos comerciales en la región representa no solo un mayor ingreso para los agricultores, sino también un serio peligro para la tierra, como es la salinidad y la contaminación (por metales pesados, de mantos acuíferos, etc.), ya que para sembrar estos cultivos se requiere de mayores volúmenes de aguas residuales.

5.1.7. Orografía.

El Valle del Mezquital esta inmerso en la Provincia del Eje Neovolcanico y específicamente en la Región del Alto Panuco, se considera una área plana a ligeramente ondulada, bordeada por cerros y serranías de variadas altura y orígenes, por lo que sus condiciones hacen factible el manejo intensivo de la agricultura (SRH, 1976).

5.2. Materiales.

Para el presente estudio se usó el siguiente equipo y material.

Se utilizaron cartas topográficas, de uso del suelo y vegetación, edafológicas y geológicas, a escalas de 1:250,000 y 1:50,000, editadas por el INEGI.

Un GPS (posicionador geográfico espacial) para ubicar geográficamente cada uno de los sitios de muestreo; además de una barrena para estudios ambientales para obtener las muestras de suelo.

Se usó la imagen de satélite Landsat-TM, de abril del 2000 la cual fue proporcionada por el INE (Instituto Nacional de Ecología). Las bandas utilizadas fueron: 1, 2, 3, 4, 5 y 7.

Software. Se utilizaron diversos programas de cómputo: IDRISI, ILWIS, Excel, SAS y Word.

El Laboratorio de Fertilidad de Suelos del Colegio de Postgraduados se utilizó para el análisis químico de las muestras de suelo.

5.3. Metodología.

La metodología se realizó en tres etapas, la primera fue el pretratamiento de la imagen de satélite para que sea útil al trabajo; después se tomaron muestras del perfil del suelo, para determinarles su contenido de nitratos, del área de estudio; y por último, una etapa en la cual se hace el análisis de los valores de nitratos detectados y los valores de reflectancia de la imagen de satélite para obtener una imagen clasificada.

5.3.1. Preparación de la imagen.

En esta fase, se requirió dar ciertas adecuaciones a la imagen, como el recorte de la imagen, su despliegue y obtención de estadísticas (media y desviación estandar), georreferencia y, otras como el *stretch* y la composición en color, para poder trabajar con ella y fuera útil en el estudio.

5.3.1.1. Recorte de imágenes.

Dado que las imágenes obtenidas contenían grandes volúmenes de información, es decir, cubrían mayor área que la relacionada para éste estudio, se obtuvo una subimagen que cubrió a la zona de estudio, para manejarse y manipularse con el software IDRISI.

5.3.1.2. Generación de estadísticas.

Para trabajar las imágenes en posteriores funciones del programa, fue necesario generar estadísticas, como la media y la desviación estándar de los valores de reflectancia.

5.3.1.3. Despliegue de imágenes.

El despliegue de imágenes se realizó en monobanda, para visualizar banda por banda (seis en total) e identificar las coordenadas, los valores de reflectancia y demás objetos que fueron útiles para el estudio.

5.3.1.4. Georreferencia.

El proceso de georreferencia se realiza con el objetivo de cambiar las posiciones de los píxeles en la imagen, corrigiendo el desplazamiento geográfico, producido por la curvatura de la tierra, el movimiento de la tierra, variaciones en altura y velocidad relativa del satélite.

5.3.1.4.1. Puntos de control.

Se identificaron 26 puntos en la imagen y en la carta topográfica de manera uniforme en toda el área. Estos puntos fueron intersecciones de caminos, de escurrimientos, etc. Después de marcar los puntos, se obtuvieron las coordenadas UTM de la carta topográfica y, el número de columna e hilera del píxel en la imagen.

5.3.1.4.2. Transformación.

Este paso, se realizó en el programa IDRISI, para que las coordenadas de la imagen puedan estimarse con las coordenadas de la carta partiendo del número de hilera y columna de cada píxel.

5.3.1.4.3. Transferencia.

Los niveles digitales (ND), es decir el valor de cada píxel, se ajustan a su posición correcta para tener la imagen totalmente corregida, también se realizó con el programa IDRISI.

5.3.1.5. Realces y mejoras a la imagen.

Fueron adecuaciones a la imagen para que sea más nítida y clara, para poder identificar diferentes objetos, formas y estructuras. El *stretch* a la imagen se realizó con el fin de dar mayor contraste y nitidez. La composición en color se refiere a mezclar diferentes bandas para obtener una imagen a colores y poder así identificar más fácilmente los diferentes objetos de la imagen, en este caso, la composiciones en color utilizadas fueron la 1-2-4, 1-2-3 y 4-3-2. Además de la creación de la banda artificial NDVI.

5.3.2. Recolección de datos de campo.

En el área de estudio se seleccionan los sitios de muestreo considerando cuatro características: la serie de suelo, inicio de riego, calidad del agua y tipo de cultivo. Del perfil del suelo se obtuvieron las muestras de 150 sitios seleccionados. Además se tomarán datos generales de la cubierta vegetal, como fue el tipo de vegetación y estado fenológico.

5.3.2.1. Toma de muestras.

En cada sitio se tomaron muestras del suelo cada 30 cm de profundidad hasta 120 cm de profundidad total o hasta donde la capa endurecida impedía la penetración de la barrena. Debido a esto, en algunos sitios de muestreo no se tuvieron muestras para todas las profundidades.

5.3.2.2. Análisis de laboratorio.

En el laboratorio de fertilidad de suelos del Colegio Postgraduados, por medio de análisis físicos y químicos, a cada una de las muestras de suelo se determinó la textura, cantidad de Nitrógeno-nítrico y Nitrógeno-amoniaco.

5.3.3. Ubicación de sitios en terreno e imagen.

Con la ayuda de los GPS, los sitios seleccionados en campo se ubicaron geográficamente. Posteriormente, las coordenadas de dichos puntos se ubicaron en la imagen georrefenciada, esto para conocer la relación sitio-píxel, es decir en que píxeles se encuentran los sitios

5.3.4. Obtención de los valores de reflectancia de las bandas.

Después de ubicado cada sitio en la imagen, se procedió a registrar cada valor de reflectancia del píxel identificado como el del sitio, dicho proceso se hizo con el programa IDRISI, para cada sitio en cada una de las seis bandas de la imagen y de la banda artificial NDVI.

5.3.5. Análisis estadístico.

El análisis estadístico consistió de un análisis de varianza y un análisis de correlación, y con los resultados de estos dos análisis, se obtuvieron los modelos a probar.

5.3.5.1. Análisis de varianza.

El primer paso en esta etapa, fue el de realizar un análisis de varianza de las variables de campo en relación a las cantidades de nitratos, para saber si el contenido de nitratos

(obtenidos del análisis) en el suelo estadísticamente era diferente por cultivo, profundidad o periodo de riego.

5.3.5.2. Análisis de correlación.

La información de las características del suelo (apertura al riego, cantidad de nitratos y cantidad de amonios) y de la vegetación (tipo de cultivo), se correlacionaron con los valores de reflectancia, para determinar cual variable era mejor representada por la imagen.

5.3.5.3. Modelos de regresión.

Por último, se probaron modelos de regresión lineal múltiple para saber si estadísticamente podía la imagen representar los niveles de nitratos en el suelo. Se eligieron los mejores modelos de regresión, con base a su nivel de significancia (0.05% como máximo) y valor de la r^2 (40.00 % como mínimo), para cada cultivo (maíz y alfalfa) y para cada profundidad (0-30 cm, 30-60 cm y 60-90 cm).

5.3.6. Clasificación de la imagen.

En la imagen de satélite, empleando una composición en color (1-2-4), se identificaron 9 clases según el uso de suelo (agricultura cultivo maíz, agricultura cultivo alfalfa, agricultura tierra en descanso, agricultura otros cultivos, vegetación de vega de río,

vegetación xerófita, zona urbana, zona rural y cuerpos de agua), obteniéndose una imagen con dicha identificación de clases.

Con la imagen identificada por clases, se tomaron aquellas clases que se emplearon para los modelos (agricultura cultivo maíz y agricultura cultivo alfalfa), y se aplicó cada modelo matemático a la imagen correspondiente, obteniéndose una imagen clasificada de acuerdo a la concentración de nitratos en cada estrato muestreado en el perfil del suelo para cada cultivo

5.3.7. Verificación de la clasificación.

Después de hacer la clasificación, se verificó que la imagen fuera una herramienta útil para clasificar zonas con problemas de nitratos, mediante el muestreo de los sitios analizados. Se comparan los niveles de nitratos de los sitios con los niveles de nitratos de la imagen clasificada, para cada modelo y así identificar al mejor de ellos.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1. Características de la imagen

6.1.1. Ubicación geográfica de la imagen.

La zona de estudio quedo dentro de la imagen, es un recorte de tamaño de 2001 x 1649 pixeles, cuyas coordenadas son:

Esquina superior izquierda: 449966.9 E con 2259970.0 N

Esquina superior derecha: 509966.9 E con 2259970.0 N

Esquina inferior izquierda: 449966.9 E con 2210500.0 N

Esquina inferior derecha: 509966.9 E con 2210500.0 N

En las Figuras 5, 6, 7, 8, 9 y 10 se muestran cada una de las bandas utilizadas de la imagen de la zona de estudio. Asimismo, en las Figuras 11, 12, 13 y 14 se muestran la imagen con valores NDVI y las imágenes compuestas empleadas en el estudio.

6.1.2. Valores de reflectancia

En el Cuadro 4 se muestran los datos promedio obtenidos de los valores de reflectancia de cada una de las bandas y de la banda artificial NDVI que resulta de la relación entre



Figura 5. Banda 1 de la imagen de satélite Landsat-TM del área de estudio.



Figura 6. Banda 2 de la imagen de satélite Landsat-TM del área de estudio.



Figura 7. Banda 3 de la imagen de satélite Landsat-TM del área de estudio.



Figura 8. Banda 4 de la imagen de satélite Landsat-TM del área de estudio.



Figura 9. Banda 5 de la imagen de satélite Landsat-TM del área de estudio.

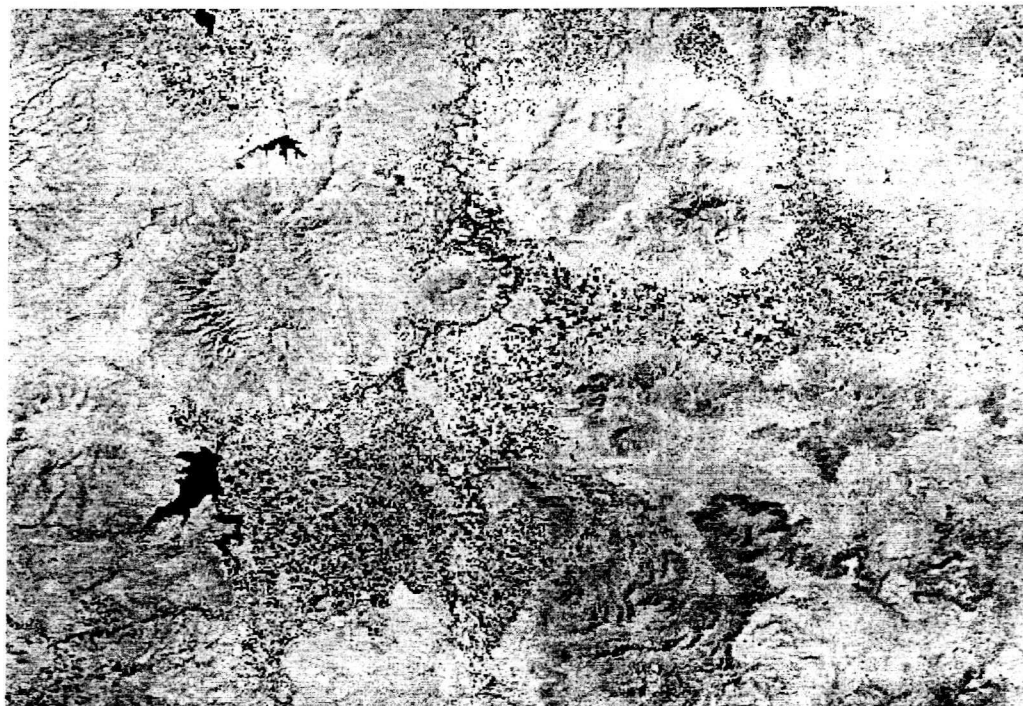


Figura 10. Banda 7 de la imagen de satélite Landsat-TM del área de estudio.

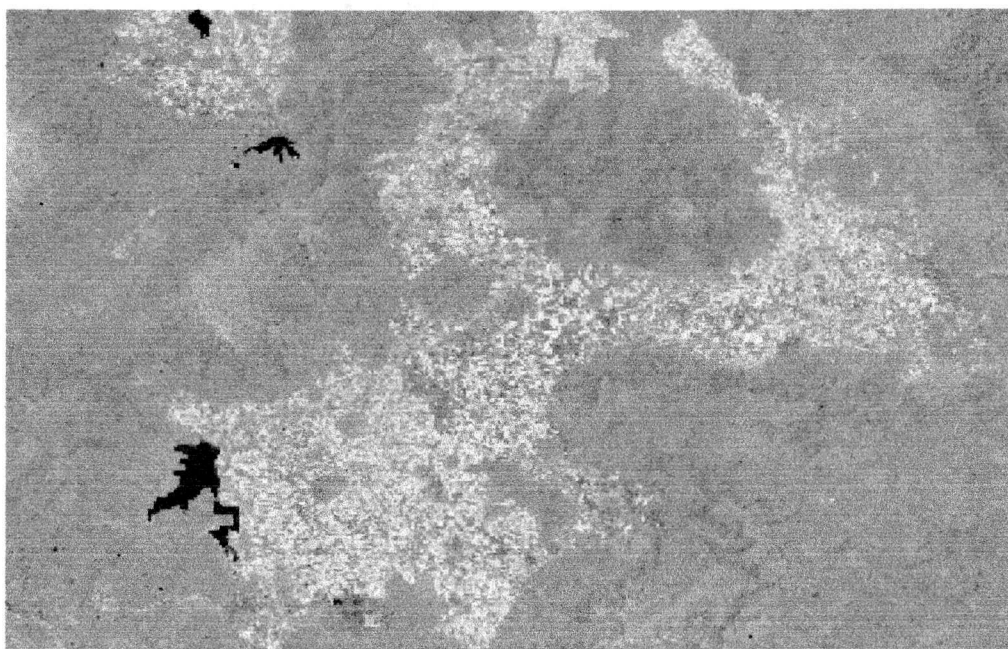


Figura 11. Banda NDVI de la imagen de satélite Landsat-TM del área de estudio.

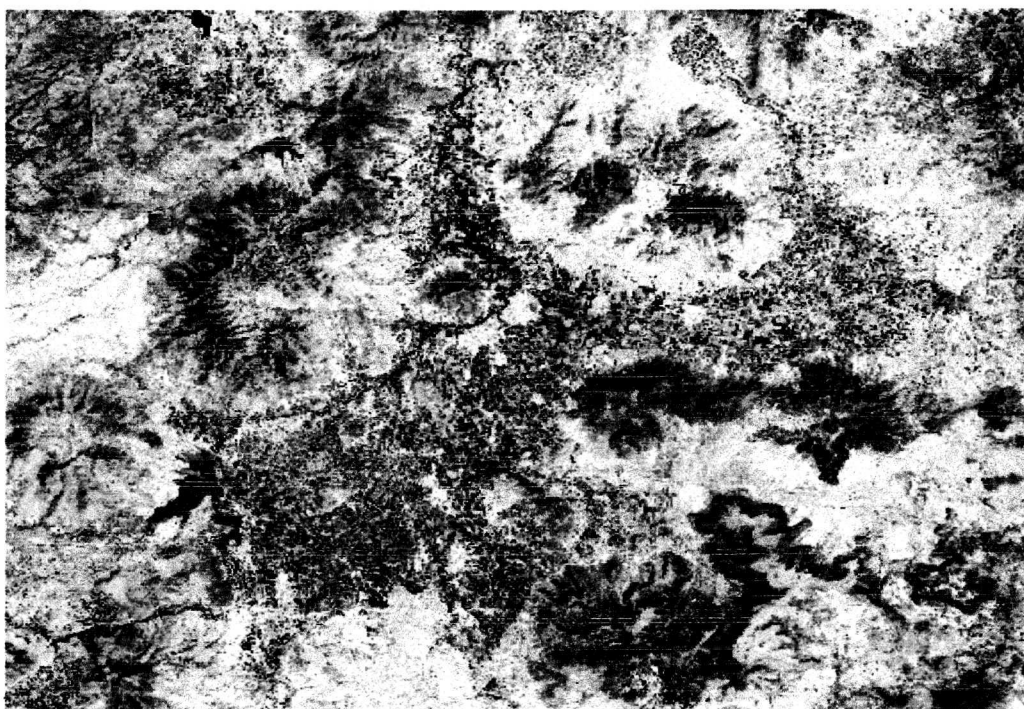


Figura 12. Imagen compuesta 1-2-3 del área de estudio.

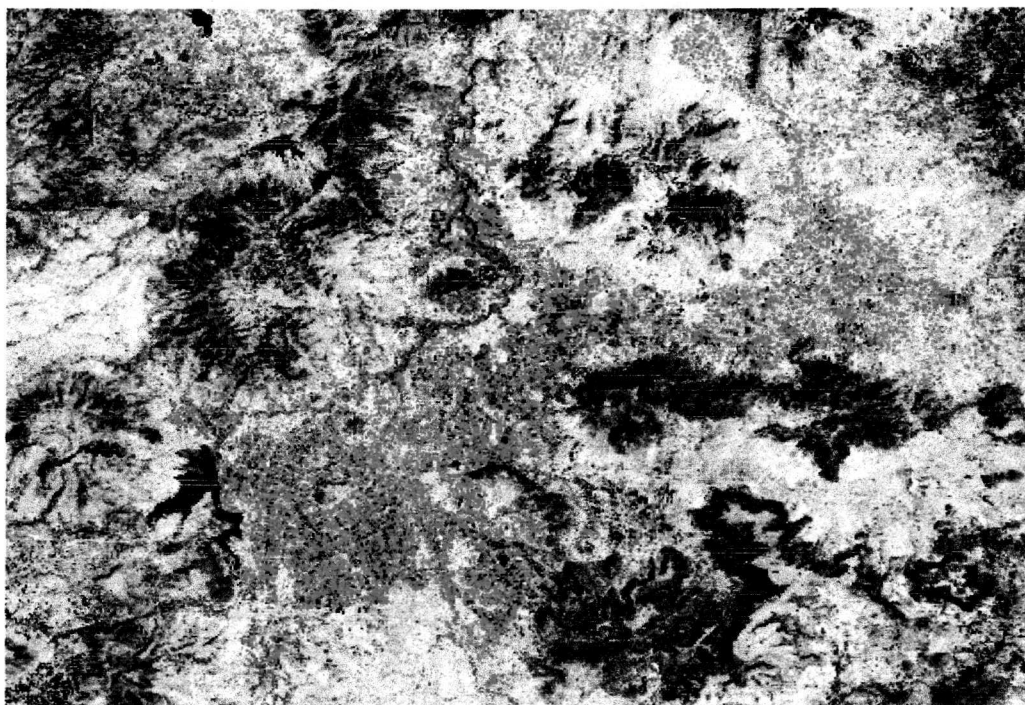


Figura 13. Imagen compuesta 1-2-4 del área de estudio.

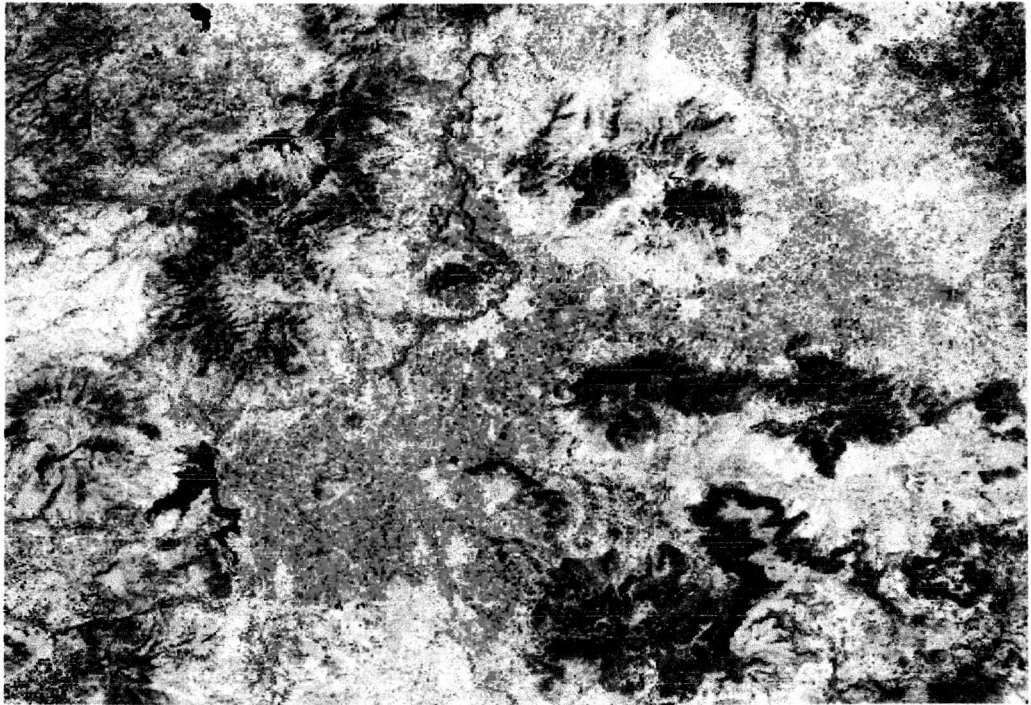


Figura 14. Imagen compuesta 2-3-4 del área de estudio.

la banda 3 y la banda 4, por cultivo para cada profundidad, y en el Anexo 1 están en forma completa.

Cuadro 4. Valores Promedio de Reflectancia y NDVI, por cultivo y profundidad.

CULTIVO	PROFUN DIDAD	BANDA 1	BANDA 2	BANDA 3	BANDA 4	BANDA 5	BANDA 7	NDVI
Alfalfa	0-30 cm	78.60	73.53	87.10	89.48	113.29	80.86	0.003
Alfalfa	30-60 cm	76.59	72.76	86.02	91.88	112.78	79.84	0.016
Alfalfa	60-90 cm	82.38	75.66	88.38	94.66	114.28	81.31	0.020
Alfalfa	90-120 cm	81.78	75.78	89.56	89.22	110.11	77.78	0.016
Maíz	0-30 cm	83.96	75.65	88.51	81.64	117.03	88.82	-0.050
Maíz	30-60 cm	83.15	75.83	88.17	84.85	116.05	87.26	-0.029
Maíz	60-90 cm	87.41	79.06	92.06	85.34	117.81	91.84	-0.052
Maíz	90-120 cm	93.63	82.63	94.43	89.31	126.13	98.69	-0.039

Para el cultivo de alfalfa, los valores de reflectancia de las bandas 1, 2, 5 y 6, son ligeramente inferiores en comparación con los valores presentes para el cultivo de maíz; además, las bandas 3 y 4, tienen valores ligeramente superiores a los presentes en el cultivo de maíz.

La banda de los NDVI, merece una mención especial, ya que sus valores son muy semejantes dentro de un mismo cultivo, y son diferentes entre cultivos. Esto da una referencia para poder diferenciar los cultivos en base a los valores digitales de reflectancia y NDVI.

6.2. Información obtenida en campo

La información de campo que se obtuvo para fines de este estudio fue recabada en un total de 150 sitios, 91 para maíz y 59 para alfalfa. En el laboratorio se determinó

Nitrógeno- NO_3^- y Nitrógeno- NH_4^+ . En el Cuadro 5 se observan estos datos en valores promedio ordenados por cultivo para cada profundidad, y en el Anexo 1 se muestra el total de los análisis obtenidos en el laboratorio.

Cuadro 5. Datos de campo promedio, por cultivo y profundidad.

CULTIVO	PROFUNDIDAD	NITRATO(ppm)	AMONIO(ppm)	RIEGO(años)
Alfalfa	0-30 cm	20.03	5.62	46.1
Alfalfa	30-60 cm	7.19	5.09	46.1
Alfalfa	60-90 cm	5.75	5.40	38.67
Alfalfa	90-120 cm	4.61	6.81	39.0
Maíz	0-30 cm	33.58	5.32	36.0
Maíz	30-60 cm	11.30	5.40	35.52
Maíz	60-90 cm	6.79	5.23	34.7
Maíz	90-120 cm	6.85	5.60	37.2

De los datos, se puede observar que en el maíz se presenta mayor acumulación de nitratos en las diferentes profundidades, comparados con los niveles que tiene la alfalfa: para el caso de los amonios, estos están uniformemente distribuidos en las diferentes profundidades de muestra y con valores similares para ambos cultivos; y el promedio de años de apertura al riego es ligeramente superior para el caso de la alfalfa. El periodo de apertura al riego se obtuvo directamente de los registros del Distrito de Riego.

6.3. Análisis Estadístico

Antes de iniciar con los análisis estadísticos, se observó que el desarrollo de los cultivos en el periodo de muestreo y la fecha de toma de la imagen estaban poco desarrollados, se optó por eliminar algunos sitios de muestreo que tenían un cultivo de maíz apenas establecido (esto quiere decir que la reflectancia era aportada mayoritariamente por el

suelo y enmascaraba el efecto de los nitratos en el cultivo), una alfalfa segada (por la misma razón anterior) y aquellos sitios en que la parcela estaba recién regada (pues el agua cambiaba la reflectancia, enmascarando el efecto de los nitratos).

Esta selección de los sitios a eliminar se hizo con el apoyo del NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada). El NDVI está acotado entre -1 y $+1$, con un umbral crítico en torno a 0.2 (Flores-López y Scott, 2000), es decir a partir de este valor hay un buen desarrollo vegetal. Valores menores a 0.2 indican un cultivo poco desarrollado, un suelo desnudo e incluso un suelo regado o áreas con agua (Soria, 1997).

El criterio seguido fue eliminar aquellos sitios cuyo valor de NDVI era menor a 0.05 , pues indicaba un suelo desnudo, un cultivo apenas establecido o con agua (recién regado). Con esta modificación, se utilizaron solo los sitios seleccionados para los análisis posteriores.

6.3.1. Análisis de Varianza.

Era necesario saber si estadísticamente existían diferencias significativas para determinar un potencial de lixiviación de nitratos en la zona de estudio. Con la información de campo se observaron los valores de nitratos en cada profundidad y se realizó un análisis de varianza para determinar si estadísticamente eran diferentes las concentraciones de nitratos y amonios por nivel de profundidad, tipo de cultivo y periodo de apertura al riego. Fue un análisis de varianza completamente al azar en forma factorial, tanto para las concentraciones de nitratos como para las concentraciones de

amonio En el Cuadro 6 se muestran como fueron organizados los datos para su análisis, en el Cuadro 7 se muestran los resultados del análisis de varianza para los nitratos, y en el Anexo 2 se muestran los análisis completos.

Cuadro 6. Niveles de las variables.

Variable	Niveles	Especificaciones
Profundidad	4	0-30cm, 30-60cm, 60-90cm y 90-120cm
Cultivo	2	Alfalfa y Maíz
Apertura al Riego	3	10-35 años, 36-59 años y 60-90 años

Cuadro 7. Análisis de varianza para nitratos.

Variable	Valor de F	Pr > F
Modelo	6.99	0.0001*
Prof	33.61	0.0001*
Cul	4.28	0.0395+
Prof*Cul	3.56	0.0148+
Riego	0.25	0.7753
Prof*Rie	0.21	0.9740
Cul*Rie	0.46	0.6327
Prof*Cul*Rie	0.20	0.9765
Total		
	Y media =	16.14345277
	R ² =	0.36239

Nota: Prof = Profundidad
Cul = Cultivo
Rie = Apertura al riego

* = Altamente significativo
+ = Significativo

De los resultados anteriores, se puede concluir que en el caso del amonio, no hay diferencias estadísticas entre las diferentes profundidades, pues permaneces estables en cada estrato, tanto en maíz solo, en alfalfa sola y al considerarlos juntos. Ver Anexo 2.

Pero en el caso de los nitratos, las concentraciones para cada cultivo son estadísticamente diferentes, lo que indica que el cultivo si tiene un efecto en el contenido de nitratos, de igual forma sucede con la profundidad y la interacción entre cultivo y

profundidad; pero para el caso de apertura al riego y las interacciones con éste, las concentraciones de los nitratos no son estadísticamente diferentes. Ver Anexo 2.

Además, se observa que en la profundidad 0-30 cm (ver Cuadro 5), independientemente del cultivo, hay gran cantidad de nitratos que son utilizados, pues en profundidades de 60-90 cm y 90-120 cm hay menor cantidad. Se realizó una prueba de medias (Tukey), encontrándose que los valores medios si son estadísticamente diferentes para los nitratos (ver Anexo 2). A pesar de todo esto, los niveles en la última capa son elevados, de 4.61 a 6.85 ppm (9.22 a 13.90 kg ha⁻¹), cantidades que pueden lixiviarse, pues el sistema radicular de los cultivos prácticamente ya no los recupera, pues quedan fuera de su alcance.

Al respecto, Castellanos y Peña (1990) mencionan que durante la lixiviación, la solución del suelo es la que se desplaza; así por ejemplo un excedente de 3 a 6 ppm de nitrato , que expresados en solución serían de 10 a 40 ppm, causarían la pérdida de 10 a 25 kg de nitratos, sin embargo, expresado en solución sería de 3 a 7 veces mayor, es decir, 30 a 100 kg ha⁻¹ de nitratos.

Los mismos autores indican que la fracción de lavado va de 20 a 40 % de la lamina de riego; esto significa que si a lo largo de un ciclo de cultivo se aplica una lámina de 100 cm, existen de 20 a 40 cm de agua disponibles para lixiviar los nitratos. Estas acotaciones, hacen mas sólida la idea expresada en el párrafo anterior, y queda apoyada en la sección de literatura.

Como conclusión del análisis de varianza, las cantidades de nitratos encontrados en las capas del suelo hacen pensar en la posibilidad de tener lixiviación de nitratos, por lo que, para el análisis de correlación siguiente, es necesario ordenar las concentraciones de nitratos por nivel de profundidad y tipo de cultivo.

6.3.2. Análisis de Correlación

Con el propósito de conocer la correlación entre todas las variables que se emplearon en este trabajo, primero se dividieron en variables de campo, aquellas que fueron tomadas en los sitios de muestreo (nitratos, amonio, cultivo y periodo de riego), y variables de la imagen que fueron los valores de reflectancia para cada sitio de muestreo. De acuerdo con el análisis de varianza anterior, para hacer las correlaciones, los datos se organizaron por tipo de cultivo y nivel de profundidad. Para la profundidad, se tomaron los niveles de 0-30 cm, 30-60cm y 60-90cm, de acuerdo a los resultados del análisis de medias, además de no contar con suficientes datos para la profundidad de 90-120 cm., por lo que no se incluyeron en el análisis de correlación.

Complementado, Llanos (1984) reporta que el maíz aprovecha el Nitrógeno en un 90% en forma de nitratos (NO_3^-), pero en etapas tempranas de su desarrollo aprovecha mayoritariamente el amonio (NH_4^+); y su sistema radicular esta mayoritariamente en los primeros 60 cm del suelo. Mientras que la alfalfa, según Pozo (1977) aprovecha el Nitrógeno tanto en forma de amonio como de nitrato, pero mayoritariamente de este último, y su sistema radicular fácilmente alcanza los dos metros de profundidad. Lo

anterior, apoya los resultados del análisis de varianza y explica porque para el análisis de correlación se dividieron por cultivo las concentraciones de nitratos.

Con las consideraciones anteriores se realizaron las correlaciones entre las variables de la imagen, de campo y las variables de campo con las variables de la imagen. Estos análisis de correlación son básicos para este estudio, pues para conocer los niveles de nitratos en el suelo por medio de la imagen de satélite es necesario saber si tienen alguna relación ambos (nitratos e imagen). Obteniéndose los resultados siguientes:

6.3.2.1. Variables de la imagen.

Los valores de reflectancia al organizarse por tipo de cultivo y profundidad no mostraron grandes cambios entre ellos, pero en términos generales mostraron una alta correlación entre cada una de las bandas, no así la banda 4 que tuvo una correlación baja con relación a las demás, esto es normal debido a la naturaleza de esta banda, lo que indica que en el área de estudio hay una heterogeneidad debida al desarrollo vegetativo de los cultivos. En los Cuadro 8, 9, 10, 11, 12 y 13 se muestran las correlaciones entre cada una de las bandas.

Para el cultivo de alfalfa, en todas las profundidades, las correlaciones entre las bandas de la imagen fueron altas entre la banda 5 y la 6, lo que indica que se puede emplear cualquiera de las dos, pues son muy similares. Para las bandas 1 y 2 sucede lo mismo. Caso contrario pasa con las bandas 3 y 4, que tienen correlaciones bajas entre ellas y con

las demás bandas, sin embargo, el NDVI, al ser producto de las bandas 3 y 4, las correlaciones con éste son altas y puede en determinado momento sustituirlas.

Cuadro 8. Análisis de correlación entre valores de reflectancia, para Alfalfa en la profundidad 0-30 cm.

	BANDA 1	BANDA 2	BANDA 3	BANDA 4	BANDA 5	BANDA 7	NDVI
BANDA 1	1.0000 0.0	0.90059 0.0001	0.49568 0.0223	-0.40135 0.0713	0.72463 0.0002	0.81783 0.0001	-0.61808 0.0028
BANDA 2		1.00000 0.0	0.53317 0.0128	-0.24184 0.2909	0.73085 0.0002	0.71838 0.0002	-0.51653 0.0165
BANDA 3			1.00000 0.0	0.02905 0.9005	0.34528 0.1253	0.40125 0.0714	-0.55849 0.0085
BANDA 4				1.00000 0.0	-0.17543 0.4469	-0.44347 0.0440	0.80783 0.0001
BANDA 5					1.00000 0.0	0.88945 0.0001	-0.35686 0.1123
BANDA 7						1.00000 0.0	-0.61099 0.0033
NDVI							1.00000 0.0

Cuadro 9. Análisis de correlación entre valores de reflectancia, para Alfalfa en la profundidad 30-60 cm.

	BANDA 1	BANDA 2	BANDA 3	BANDA 4	BANDA 5	BANDA 7	NDVI
BANDA 1	1.0000 0.0	0.83468 0.0001	0.21596 0.3605	-0.50285 0.0238	0.51501 0.0201	0.41013 0.0725	-0.55499 0.0111
BANDA 2		1.00000 0.0	0.34408 0.1374	-0.26648 0.2561	0.48989 0.0283	0.26651 0.2560	0.43058 0.0581
BANDA 3			1.00000 0.0	0.04867 0.8385	0.67812 0.0010	0.75124 0.0001	-0.50246 0.0240
BANDA 4				1.00000 0.0	0.02223 0.9259	-0.16141 0.4966	0.83387 0.0001
BANDA 5					1.00000 0.0	0.86022 0.0001	-0.55589 0.0109
BANDA 7						1.00000 0.0	-0.35949 0.1195
NDVI							1.00000 0.0

Cuadro 10. Análisis de correlación entre valores de reflectancia, para Alfalfa en la profundidad de 60-90 cm.

	BANDA 1	BANDA 2	BANDA 3	BANDA 4	BANDA 5	BANDA 7	NDVI
BANDA 1	1.0000 0.0	0.92746 0.0001	0.94061 0.0001	-0.36675 0.2409	0.84570 0.0005	-0.49834 0.0992	-0.79287 0.0021
BANDA 2		1.00000	0.95000	-0.11030	0.77389	-0.36605	-0.60285

		0.0	0.0001	0.7329	0.0031	0.2419	0.0380
BANDA 3			1.00000 0.0	-0.08101 0.8024	0.77389 0.0031	-0.36605 0.2419	-0.58576 0.0454
BANDA 4				1.00000 0.0	-0.04081 0.8998	-0.31989 0.3108	0.84994 0.0005
BANDA 5					1.00000 0.0	0.92948 0.0001	-0.41431 0.1806
BANDA 7						1.00000 0.0	-0.65518 0.0207
NDVI							1.00000 0.0

Para el cultivo de maíz, en todas las profundidades, las correlaciones entre las bandas de la imagen fueron altas entre las bandas 1, 2 y 3, lo que indica que se puede emplear cualquiera de las tres, pues son muy similares. Para las bandas 5 y 6 sucede lo mismo.

Caso contrario pasa con la banda 4, que tienen correlaciones bajas con las demás bandas, sin embargo, el NDVI, al ser producto de las bandas 3 y 4, las correlaciones con éste son altas y puede en determinado momento sustituirla.

Cuadro 11. Análisis de correlación entre valores de reflectancia, para Maíz en la profundidad 0-30 cm.

	BANDA 1	BANDA 2	BANDA 3	BANDA 4	BANDA 5	BANDA 7	NDVI
BANDA 1	1.0000 0.0	0.90198 0.0001	0.89660 0.0001	-0.39976 0.0388	0.67107 0.0001	0.72697 0.0001	-0.76610 0.0001
BANDA 2		1.00000 0.0	0.96105 0.0001	-0.22671 0.2555	0.64107 0.0003	0.69675 0.0001	-0.65476 0.0002
BANDA 3			1.00000 0.0	-0.19501 0.3297	0.64059 0.0003	0.66434 0.0002	-0.65644 0.0002
BANDA 4				1.00000 0.0	-0.07568 0.7075	-0.35600 0.0684	0.86303 0.0001
BANDA 5					1.00000 0.0	0.80838 0.0001	-0.37809 0.0518
BANDA 7						1.00000 0.0	0.60638 0.0008
NDVI							1.00000 0.0

Cuadro 12. Análisis de correlación entre valores de reflectancia, para Maíz en la profundidad 30-60cm.

	BANDA 1	BANDA 2	BANDA 3	BANDA 4	BANDA 5	BANDA 7	NDVI
BANDA 1	1.0000 0.0	0.89302 0.0001	0.81080 0.0001	-0.36872 0.0762	0.63781 0.0008	0.69558 0.0002	-0.69613 0.0002
BANDA 2		1.00000 0.0	0.90713 0.0001	-0.18538 0.3858	0.61646 0.0013	0.66915 0.0003	-0.58642 0.0026
BANDA 3			1.00000 0.0	-0.14864 0.4882	0.66311 0.0004	0.66651 0.0004	-0.60728 0.0016
BANDA 4				1.00000 0.0	-0.02997 0.8894	-0.32225 0.1246	0.87166 0.0001
BANDA 5					1.00000 0.0	0.79254 0.0001	-0.35137 0.0923
BANDA 7						1.00000 0.0	-0.58619 0.0026
NDVI							1.00000 0.0

Cuadro 13. Análisis de correlación entre valores de reflectancia, para Maíz, en la profundidad 60-90 cm.

	BANDA 1	BANDA 2	BANDA 3	BANDA 4	BANDA 5	BANDA 7	NDVI
BANDA 1	1.0000 0.0	0.95423 0.0001	0.79666 0.0058	-0.58374 0.0764	0.81700 0.0039	0.84728 0.0020	-0.76283 0.0103
BANDA 2		1.00000 0.0	0.85705 0.0015	-0.49600 0.1448	0.86699 0.0012	0.84011 0.0023	-0.73337 0.0158
BANDA 3			1.00000 0.0	-0.50981 0.1322	0.70480 0.0228	0.73991 0.0144	-0.81366 0.0042
BANDA 4				1.00000 0.0	-0.38660 0.2698	-0.56263 0.0904	0.91167 0.0002
BANDA 5					1.00000 0.0	0.93775 0.0001	-0.60584 0.0634
BANDA 7						1.00000 0.0	-0.73431 0.0156
NDVI							1.00000 0.0

6.3.2.2. Variables de campo.

Para el caso de las variables de campo, las correlaciones entre ellas fueron muy bajas, es decir, poco relacionadas, esto no era lo esperado pues se esperaba que entre mayor fuera el periodo de riego mayor seria el contenido de nitratos y amonios en el perfil del suelo,

y esto no se noto claramente. En los Cuadro 14, 15, 16, 17, 18 y 19 se observan estas correlaciones.

Para el caso del cultivo de alfalfa, las correlaciones entre los niveles de nitratos, niveles de amonios y el periodo de apertura al riego, fueron bajos. Lo que se traduce en que dichas variables son independientes unas de otras, y ninguna variable puede interpretarse por el valor de otra. Sin embargo, en el caso de la profundidad de 60-90 cm, existe una correlación significativa entre el nivel de amonio y el periodo de riego (0.76211). Esto resultó interesante, pues indica que el nivel del contenido de nitratos esta en función de los años que tenga la parcela abierta al riego.

Cuadro 14. Análisis de correlación entre las variables de campo, para Alfalfa en la profundidad 0-30 cm.

	NITRATO	AMONIO	RIEGO
NITRATO	1.00000 0.0	0.26974 0.2370	-0.11210 0.6380
AMONIO		1.00000 0.0	0.06876 0.7733
RIEGO			1.00000 0.0

Cuadro 15. Análisis de correlación entre las variables de campo, para Alfalfa en la profundidad 30-60 cm.

	NITRATO	AMONIO	RIEGO
NITRATO	1.00000 0.0	0.00158 0.9947	-0.21305 0.3812
AMONIO		1.00000 0.0	0.04677 0.8492
RIEGO			1.00000 0.0

Cuadro 16. Análisis de correlación entre las variables de campo, para Alfalfa en la profundidad 60-90 cm

	NITRATO	AMONIO	RIEGO
NITRATO	1.00000 0.0	-0.10430 0.7470	0.76211 0.0040
AMONIO		1.00000 0.0	-0.08624 0.7898
RIEGO			1.00000 0.0

Para el caso del cultivo de maíz, las correlaciones entre los niveles de nitratos, niveles de amonios y el periodo de apertura al riego, fueron bajos, al igual que para la alfalfa. Lo que se traduce en que dichas variables son independientes unas de otras, y ninguna variable puede interpretarse por el valor de otra. Sin embargo, en el caso de la profundidad de 60-90 cm, mejoraron las correlaciones, pero éstas no fueron significativas, concluyendo que para el cultivo de maíz no hay correlación entre las variables de campo.

Cuadro 17. Análisis de correlación entre las variables de campo, para Maíz en la profundidad 0-30 cm

	NITRATO	AMONIO	RIEGO
NITRATO	1.00000 0.0	-0.12522 0.5255	0.11679 0.5782
AMONIO		1.00000 0.0	0.08994 0.6690
RIEGO			1.00000 0.0

Cuadro 18. Análisis de correlación entre las variables de campo, para Maíz en la profundidad 30-60 cm

	NITRATO	AMONIO	RIEGO
NITRATO	1.00000 0.0	-0.00141 0.9947	-0.10062 0.6559
AMONIO		1.00000 0.0	0.09145 0.6857
RIEGO			1.00000 0.0

Cuadro 19. Análisis de correlación entre las variables de campo, para Maíz en la profundidad 60-90 cm

	NITRATO	AMONIO	RIEGO
NITRATO	1.00000 0.0	-0.50280 0.1385	-0.45324 0.2594
AMONIO		1.00000 0.0	0.33274 0.4206
RIEGO			1.00000 0.0

6.3.2.3. Variables de campo vs. Variables de la imagen.

Las correlaciones entre variables de campo y variables de la imagen son las de mayor interés para este estudio, éstas se dividieron por cultivo y profundidad como ya se había mencionado. En términos generales, para el cultivo de alfalfa, solo en la profundidad de 60-90 cm hay correlación significativa, y para el caso del cultivo de maíz no existen correlaciones significativas. En los Cuadros 20, 21, 22, 23, 24 y 25 se muestran los resultados.

Para el cultivo de alfalfa, los niveles de nitratos tuvieron correlación significativa con la banda 4 y el NDVI, lo que quiere decir, que dichas bandas pueden interpretar las cantidades de nitratos que habrían en la profundidad de 60-90 cm.

Cuadro 20. Análisis de correlación entre reflectancia y variables de campo en la profundidad 0-30cm y cultivo de alfalfa.

	BANDA 1	BANDA 2	BANDA 3	BANDA 4	BANDA 5	BANDA 7	NDVI
NO3	-0.03724 0.8727	-0.01122 0.9615	-0.13503 0.5595	0.13214 0.5680	-0.30134 0.1844	-0.24355 0.2874	0.18208 0.4296
NH4	-0.32227 0.1542	-0.32369 0.1523	-0.24876 0.2769	0.26398 0.2476	-0.33295 0.1403	-0.40752 0.0667	0.40067 0.0719
RIEGO	-0.44019 0.0521	-0.40484 0.0766	-0.18901 0.4248	0.37090 0.1074	-0.00687 0.9771	-0.10434 0.6615	0.36744 0.1110

Cuadro 21. Análisis de correlación entre reflectancia y variables de campo en la profundidad 30-60cm y cultivo de alfalfa.

	BANDA 1	BANDA 2	BANDA 3	BANDA 4	BANDA 5	BANDA 7	NDVI
NO3	-0.22118 0.3353	-0.18690 0.4172	-0.26519 0.2453	0.02789 0.9045	-0.29916 0.1877	-0.21978 0.3384	0.16697 0.4694
NH4	-0.32227 0.1542	-0.32369 0.1523	-0.24369 0.2871	0.26398 0.2476	-0.34663 0.1237	-0.37544 0.0935	0.39535 0.0761
RIEGO	-0.44019 0.0521	-0.40484 0.0766	-0.18756 0.4284	0.37090 0.1074	-0.13080 0.5826	-0.05905 0.8047	0.36397 0.1147

Cuadro 22. Análisis de correlación entre reflectancia y variables de campo en la profundidad 60-90cm y cultivo de alfalfa.

	BANDA 1	BANDA 2	BANDA 3	BANDA 4	NDVI	BANDA 5	BANDA 7
NO3	-0.49834 0.0992	-0.36605 0.2419	-0.37798 0.2258	0.69427 0.0122	0.74644 0.0053	-0.10847 0.7372	-0.33223 0.2914
NH4	-0.34028 0.2791	-0.36246 0.2469	-0.24407 0.4446	0.09243 0.7751	0.25076 0.4318	-0.53014 0.0762	-0.50128 0.0969
RIEGO	-0.42436 0.1692	-0.36924 0.2375	-0.42500 0.1684	0.43749 0.1549	0.54551 0.0666	-0.07236 0.8232	-0.23362 0.4649

Para el cultivo de maíz, los niveles de nitratos no tuvieron correlación significativa con ninguna banda, lo que quiere decir, que dichas bandas no pueden interpretar las cantidades de nitratos que habrían en el suelo cuando esta presente el cultivo de maíz.

Cuadro 23. Análisis de correlación entre reflectancia y variables de campo en la profundidad 0-30cm y cultivo de maíz.

	BANDA 1	BANDA 2	BANDA 3	BANDA 4	BANDA 5	BANDA 7	NDVI
NO3	-0.01357 0.9465	0.00272 0.9893	-0.00462 0.9817	-0.30256 0.1250	0.05674 0.7786	0.34029 0.0824	-0.24172 0.2245
NH4	-0.27702 0.1618	-0.14231 0.4789	-0.20818 0.2974	0.26913 0.1746	-0.28393 0.1512	-0.44477 0.0201	0.32576 0.0973
RIEGO	-0.54960 0.0054	-0.45506 0.0255	-0.50321 0.0122	0.21439 0.3144	-0.47129 0.0201	-0.42701 0.0374	0.41970 0.0412

Cuadro 24. Análisis de correlación entre reflectancia y variables de campo en la profundidad 30-60cm y cultivo de maíz.

	BANDA 1	BANDA 2	BANDA 3	BANDA 4	BANDA 5	BANDA 7	NDVI
NO3	-0.05363 0.8034	-0.03802 0.8600	0.02213 0.9182	-0.27746 0.1893	0.00298 0.9890	0.11965 0.5776	-0.23536 0.2683
NH4	-0.25738 0.2247	-0.11457 0.5940	-0.24205 0.2545	0.25362 0.2318	-0.26673 0.2077	-0.42536 0.0383	0.34246 0.1014
RIEGO	-0.59322 0.0046	-0.48274 0.0267	-0.43113 0.0510	0.22080 0.3361	-0.51807 0.0161	-0.46642 0.0331	0.38548 0.0844

Cuadro 25. Análisis de correlación entre reflectancia y variables de campo en la profundidad 60-90cm y cultivo de maíz.

	BANDA 1	BANDA 2	BANDA 3	BANDA 4	BANDA 5	BANDA 7	NDVI
NO3	0.18441	0.05109	0.14952	-0.23833	0.21481	0.28848	-0.28281
	0.6100	0.8885	0.6801	0.5073	0.5512	0.4022	0.4285
NH4	-0.07578	-0.05485	-0.10445	0.29755	-0.44918	-0.51681	0.27882
	0.8352	0.8804	0.7740	0.4205	0.1928	0.1261	0.4353
RIEGO	-0.89602	-0.78077	-0.81752	0.52370	-0.76247	-0.83299	0.73942
	0.0026	0.0222	0.0132	0.1828	0.0278	0.0102	0.0360

6.3.3. Variables Seleccionadas.

Las variables seleccionadas para predecir los niveles de nitratos, tomando como base los análisis de correlación y el análisis de varianza, fueron: B4 y NDVI, y la profundidad de 60-90 cm. para el cultivo de alfalfa. En tanto que las variables de campo, solo el periodo de riego en la profundidad de 60-90 cm, fue la variable que podía representar los niveles de nitratos.

6.3.4. Modelos de Regresión.

Dado que el objetivo de este estudio, fue conocer las concentraciones de los nitratos, estos estuvieron en función de las variables: reflectancia de cada una de las bandas, niveles de amonio y periodo de apertura al riego. A pesar de tener ya las variables seleccionadas, se procedió a realizar un análisis lineal múltiple de regresión que incluyera a todas las variables, para saber si alguna otra variable actuando en conjunto mejoraran los resultados.

6.3.4.1. Modelo lineal múltiple.

Se aplicó el Programa SAS, y se introdujo la orden de seleccionar los mejores modelos en base a la mejor R^2 , la mejor significancia y el menor numero de variables en el modelo. El modelo inicial a probar fue:

$$\text{NO}_3^- = B1 + B2 + B3 + B4 + \text{NDVI} + B5 + B6 + \text{NH}_4^+ + R.$$

Donde: NO_3^- = Cantidad de nitratos
B1 = Reflectancia de la banda 1,
B2 = Reflectancia de la banda 2,
B3 = Reflectancia de la banda 3,
B4 = Reflectancia de la banda 4,
NDVI = Reflectancia de la banda artificial NDVI,
B5 = Reflectancia de la banda 5,
B6 = Reflectancia de la banda 6,
 NH_4^+ = Cantidad de amonios . y
R = Periodo de apertura al riego.

De dicho modelo, se seleccionaron los modelos que mejor representaban los niveles de nitratos para cada cultivo en cada profundidad. De acuerdo con los resultados del modelo anterior (Ver Anexo 3) y las variables a utilizar (basándose en los análisis de varianza y correlación), los modelos que se aplicaron en este estudio para probar las hipótesis planteadas al principio de este trabajo, son los mostrados en el Cuadro 26.

En el Anexo 3 se muestran los resultados del análisis de regresión de los modelos definitivos, de estos seis modelos, en tres de ellos se presenta una R^2 aceptable y una significancia menor al 5%, haciendo hincapié en el hecho de seleccionar el mejor modelo para cada profundidad. De estos modelos es importante hacer notar que el cultivo de maíz generó dos modelos (Modelo 2 y Modelo 5) y el cultivo de alfalfa solo un modelo (Modelo 6), pero con la mayor significancia y mayor R^2 .

Cuadro 26. Modelos definitivos.

NUMERO	MODELOS DEFINITIVOS	CULTIVO	PROFUNDIDAD (cm)	SIGNIFICANCIA	R ²
1	$\text{NO}_3^- = -16.6526 + 1.2088\text{B2} + 74.9765\text{NDVI} - 0.5788\text{B5}$	ALFALFA	0-30	0.1516	0.2613
2	$\text{NO}_3^- = 61.1263 - 0.7709\text{B1} - 0.7592\text{B5} + 1.4754\text{B6}$	MAÍZ	0-30	0.0178	0.3496
3	$\text{NO}_3^- = 14.6237 - 0.0673\text{B5}$	ALFALFA	30-60	0.1877	0.0895
4	$\text{NO}_3^- = 24.5207 - 0.7375\text{B2} + 0.5423\text{B4} - 167.8530\text{NDVI}$	MAÍZ	30-60	0.6747	0.0721
5	$\text{NO}_3^- = 12.9305 - 0.8853\text{B2} + 0.8240\text{B3} - 0.2023\text{B6}$	MAÍZ	60-90	0.0448	0.2542
6	$\text{NO}_3^- = -5.4702 + 62.8005\text{NDVI}$	ALFALFA	60-90	0.0053	0.5572

Por otra parte, también es importante señalar que conforme se aumentaba en profundidad, los resultados de los modelos mejoraban, esto quiere decir, que entre mayor profundidad, la imagen de satélite podía interpretar mejor los niveles de nitratos. Esto último es importante, porque interesaba saber si existía lixiviación de nitratos, y si estos podían ser interpretados por la imagen de satélite, y con base a estos resultados se puede tener la certeza de determinar los niveles de concentración de nitratos en cada profundidad y con ello estar en condiciones de indicar cuales áreas tienen un potencial de lixiviación de nitratos.

Con estos modelos, el siguiente paso fue su aplicación en la imagen de satélite, para ubicar zonas de acuerdo a su nivel de nitratos, y delimitar aquellas áreas que representen un problema por lixiviación de nitratos, y determinar cual modelo tiene la mejor exactitud.

6.4. Clasificación de la Imagen

Siguiendo la metodología, en el manejo de la imagen de satélite, se creo una imagen compuesta, con las bandas 1, 2 y 4, que a partir de esta se crearon 9 clases que se podían identificar en la imagen, estas clases están en el Cuadro 27 y en la figura 15, se muestra la imagen de satélite clasificada por clases.

Cuadro 27. Clases identificadas en la composición en color de la imagen.

CLASE	CARACTERISTICA	CLAVE
1	Agricultura cultivo maíz	ACM
2	Agricultura cultivo alfalfa	ACA
3	Agricultura tierra en descanso	ATD
4	Agricultura otros cultivos	AOC
5	Vegetación de vega de río	VVR
6	Vegetación xerófita	VXM
7	Zona urbana	ZUB
8	Zona rural	ZRL
9	Cuerpos de agua	CDA

Con la clasificación de la zona de estudio por clases, se realizó una visita de campo para verificar dicha clasificación que se hizo con el programa IDRISI. Se tomaron 20 sitios de prueba para cada cultivo (maíz y alfalfa), en los cuales era plenamente identificable el cultivo. De estos 40 sitios, 32 de ellos fueron correctos de acuerdo a la clasificación, el decir el 80.0 %; siendo para el cultivo de alfalfa el 81.81 % y para el cultivo de maíz del 78.19 %.

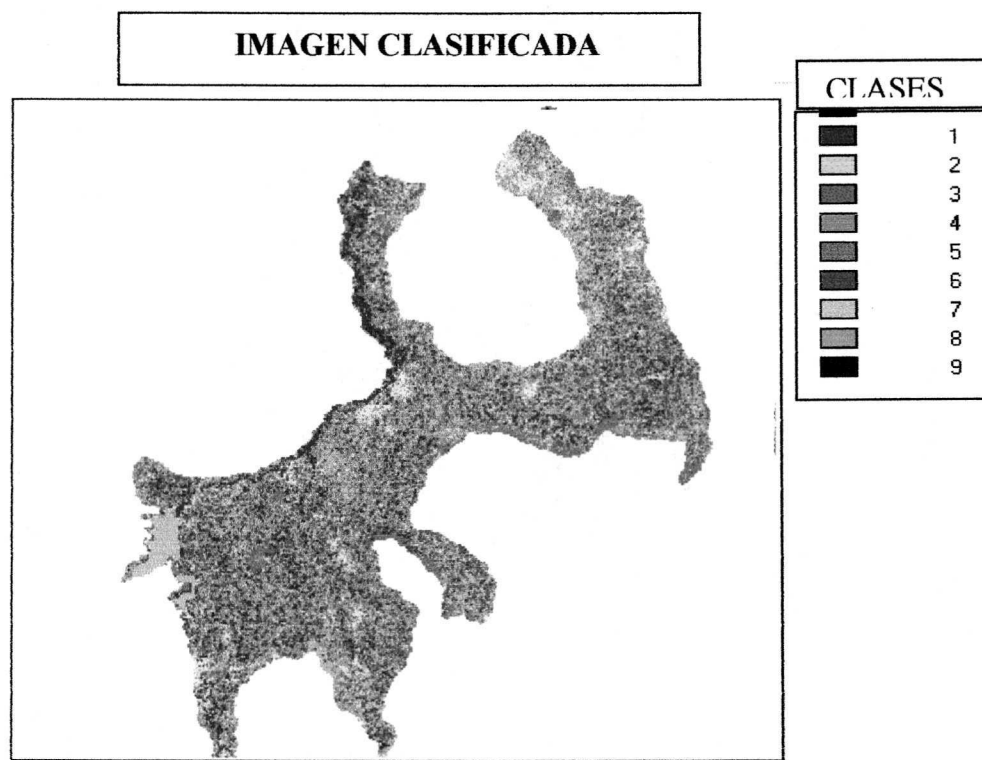


Figura 15. Imagen de satélite Landsat-TM clasificada.

- | | |
|-----------------------------------|--------------------------------|
| 1. Agricultura cultivo maíz | 5. . Vegetación de vega de río |
| 2. Agricultura cultivo alfalfa | 6. . Vegetación xerofita |
| 3. Agricultura tierra en descanso | 7. . Zona urbana |
| 4. Agricultura otros cultivos | 8. . Zona rural |
| 9. . Cuerpos de agua . | |

Al tener ya validada la imagen de satélite clasificada, a partir de ésta se obtuvieron otras dos imágenes que tuvieran solo el cultivo de alfalfa y otra solo el cultivo de maíz. A estas nuevas imágenes se procedió a aplicar los modelos definitivos para predecir los niveles de nitratos, según cultivo y profundidad

Con lo anterior, se estuvieron seis imágenes clasificadas de acuerdo con los niveles de nitratos para cada cultivo (maíz y alfalfa) y profundidad (0-30 cm, 30-60 cm y 60-90 cm). En las Figuras 16, 17, 18, 19, 20 y 21 se muestran las imágenes de satélite clasificadas para cada modelo.

6.5. Validación de la Clasificación

Con las imágenes obtenidas de acuerdo a la cantidad de nitratos para cada cultivo y profundidad, se procedió a realizar la verificación de las mencionadas imágenes. Para tal efecto, se tomó una muestra de 20 sitios para cada profundidad y para cada cultivo, de los sitios originales que contienen la información de cantidad de nitratos (en ppm), los cuales se compararon con los valores que dio por resultado en la imagen clasificada (en ppm).

Para realizar la comparación y decidir si un valor de los datos de campo es igual estadísticamente a un valor de la imagen clasificada, se hizo uso de los intervalos de confianza que se obtuvieron de los modelos de regresión (ver Anexo 3). Así, si un valor de los datos de campo estaba dentro del intervalo de confianza, se consideraba igual al del modelo.

Los 6 modelos fueron sometido a la verificación de las concentraciones de nitratos con los datos de campo, obteniendo los siguientes resultados:

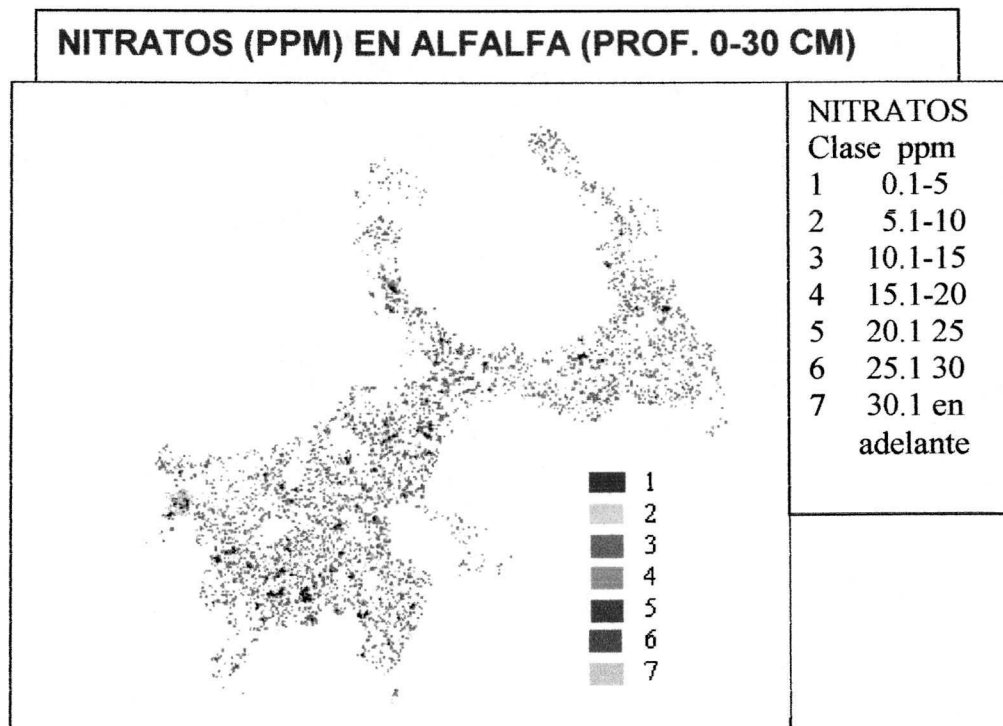


Figura 16. Imagen de satélite Landsat-TM para el Modelo 1.

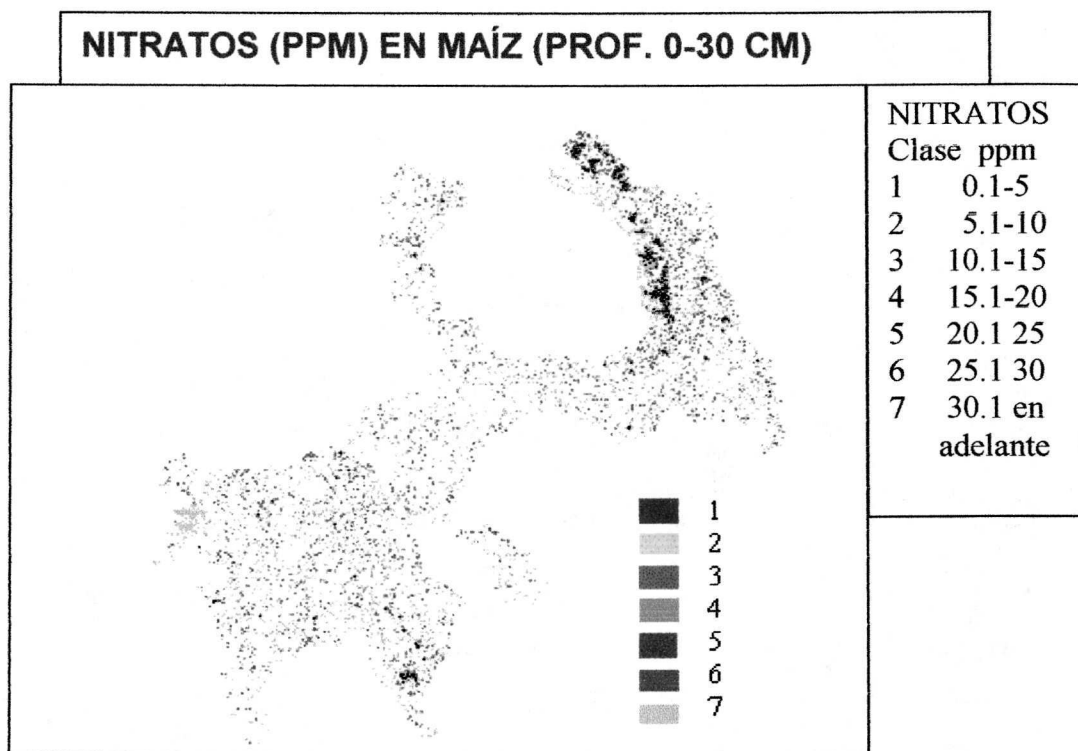


Figura 17. Imagen de satélite Landsat-TM para el Modelo 2.

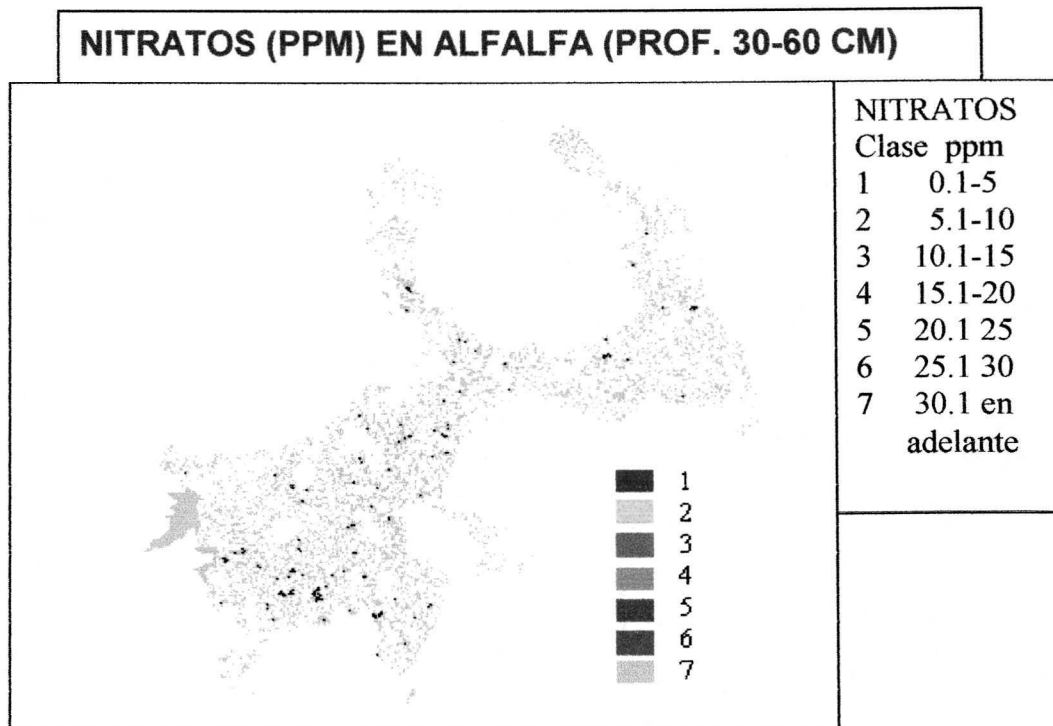


Figura 18. Imagen de satélite Landsat-TM para el Modelo 3.

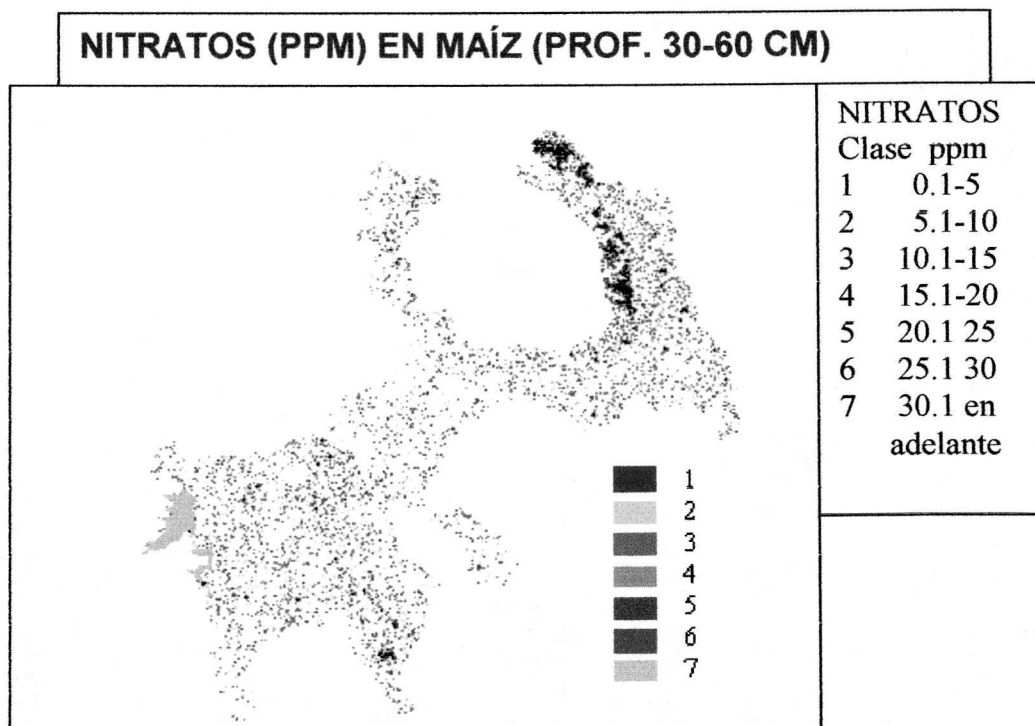


Figura 19. Imagen de satélite Landsat-TM para el Modelo 4.

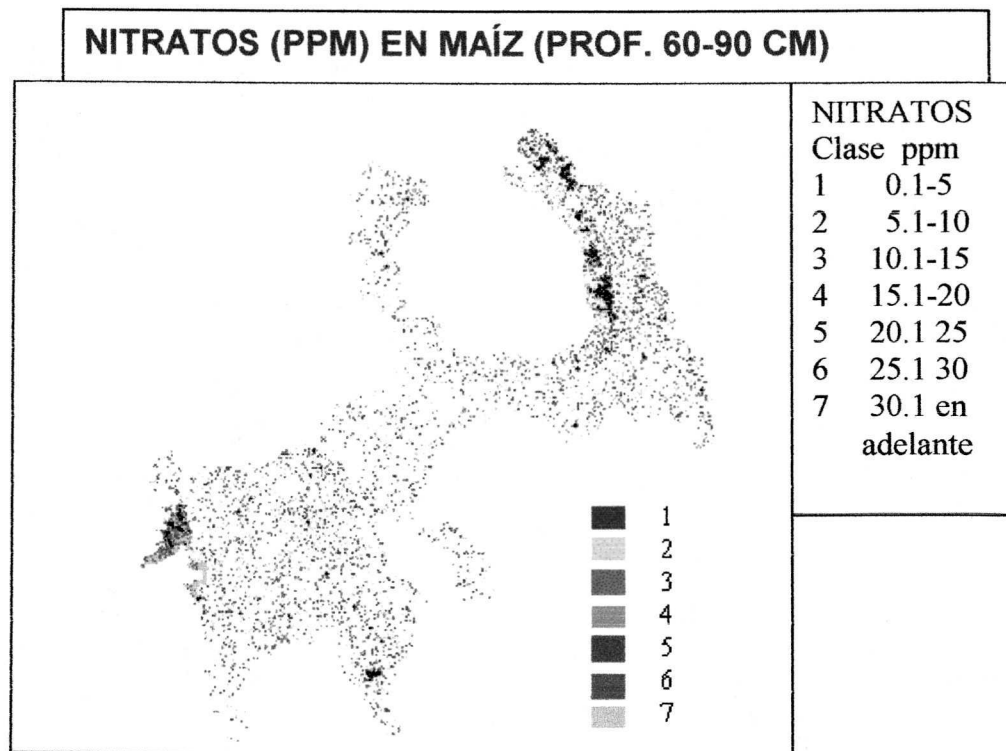


Figura 20. Imagen de satélite Landsat-TM para el Modelo 5.

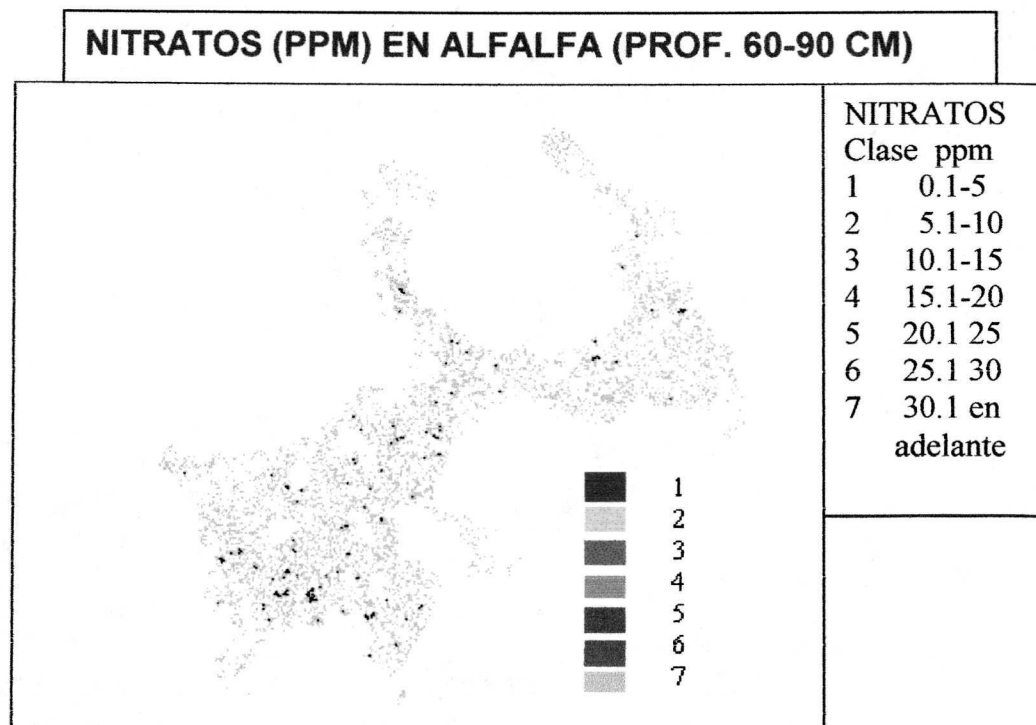


Figura 21. Imagen de satélite Landsat-TM para el Modelo 6.

1. Modelo 1. No aplicó, porque estadísticamente no era confiable el modelo.
2. Modelo 2. Tuvo una eficiencia del 43.84%, donde la mayoría de los valores sobrestimaban la cantidad de nitratos en el perfil.
3. Modelo 3. No aplicó, porque estadísticamente no era confiable el modelo.
4. Modelo 4. No aplicó, porque estadísticamente no era confiable el modelo.
5. Modelo 5. Tuvo una eficiencia del 63.33%, donde las variaciones de los valores erróneos fueron subestimando la cantidad de nitratos en el perfil.
6. Modelo 6. Tuvo una eficiencia del 91.88%, resultando ser el mejor modelo.

El Modelo 5 tiene en la zona entre Dextho y Yolotepec (al Noroeste de Actopan), la zona de Santa Ana (al Norte de Progreso) y la zona de Iturbe a Tlahuelilpan (entre Tula y Mixquiahuala) las mayores cantidades de nitratos en el perfil de 60-90 cm. Estos datos

concuerdan con los obtenidos en el muestreo de sitios, donde la zona de Iturbe a Tlahuelilpan y la zona De El Rosario a Santa Maria Amojoc (al Oeste de Actopan) muestran los mayores niveles de nitratos en dicho perfil; sin embargo, las zonas al Noroeste de Actopan y Norte de Progreso, no pudieron verificarse por falta de datos de campo. En el Anexo 4 se muestra la zona de estudio con sus vías de comunicación y poblados.

El Modelo 6, tiene distribuido en todo el Valle del Mezquital los niveles de nitratos, sin tener zonas claramente definidas con excesos de nitratos, sin embargo, la franja de desde Iturbe hasta Progreso (pasando por Tlahuelilpan y Mixquihuala) es la que presente los mayores niveles de nitratos. Por su parte, en los sitios de muestreo ocurre algo similar, pues no se encuentra una zona claramente distinguida por sus altos contenidos de

nitratos, a excepción de la zona de Iturbe a Tlahualilpan y una pequeña porción de Caxuxi a Dextho (al Noroeste de Actopan) con los mas altos niveles de nitratos. Ver Anexo 4.

Al respecto, Palacio-prieto *et al* (1994) delimitan tres áreas con alto riesgo de contaminación de mantos acuíferos por lixiviación de nitratos en suelos del Distrito de riego 03 (zona de estudio), las cuales están en las parcelas con mayor tiempo de apertura al riego (alrededor de Mixquiahuala, Tlahuelilpan y Tlaxcoapan), a excepción de la zona al Este-Noroeste de Actopan, la cual no era considerada como un área con problemas de lixiviación de nitratos

Por último en le Anexo 5, se indica el forma resumida y en diagrama, de la metodología propuesta. y que se sugiere como modelo para investigaciones similares.

7. CONCLUSIONES

Con base en los resultados obtenidos y la discusión realizada, se concluye lo siguiente:

7.1. Se logró, con este trabajo, indicar una metodología para determinar niveles de nitratos usando imágenes de satélite Landsat-TM.

7.2. La región del Valle del Mezquital, muestra zonas con diferentes concentraciones de nitratos para cada profundidad de muestra (0-30, 30-60 y 60-90 cm).

7.3. El cultivo de alfalfa es buen indicador de los niveles de nitratos para la capa de 60-90 cm, principalmente.

7.4. Las imágenes de satélite Landsat-TM, si pueden determinar zonas con problemas de concentración de nitratos, hasta en un 91.88% de precisión (Modelo 6), y con un mínimo de 63.33% (Modelo 5), para la profundidad de 60-90 cm.

8. RECOMENDACIONES

8.1. Cuando se elijan los sitios de muestreo, deberán hacerse al centro de la parcela para evitar posibles confusiones al no tener bien definido en la imagen el sitio.

8.2. Con la identificación de las zonas con problemas de concentración de nitratos, es necesario hacer un análisis químico del agua de pozos aledaños, para conocer si los nitratos se lixiviaron a los mantos acuíferos.

8.3. Los sitios de muestreo deben contener, de preferencia, datos de todas las profundidades muestreadas, ya que la falta de estos en la capa de 90-120 cm. fue la causa que no se incluyeran en el análisis de este trabajo.

8.4. Realizar un estudio similar cuando el cultivo de maíz este completamente desarrollado, para que la reflectancia fuera solo del maíz, ya que durante la época (abril-mayo) en que se realizó el estudio, éste estaba en un desarrollo inicial e incluso en algunos sitio el suelo era el que aportaba mayoritariamente la reflectancia, los cuales tuvieron que ser eliminados.

8.5. Realizar un muestreo de suelo en la zona Noroeste de Actopan, ya que según los modelos presentados en este trabajo, hay altos niveles de nitratos, los cuales no pudieron ser corroborados por la falta de datos de esa zona.

9. LITERATURA CITADA

- Álvarez, R. 1995. Memorias. *In*: VII Simposio Latinoamericano de Percepción Remota, SELPER, México, 973p.
- Bolaños, M. 2000. Estimación de los volúmenes de agua usados en zonas de riego mediante uso de sensores remotos. Tesis de licenciatura, Colegio de Postgraduados, Motecillo, México.
- Buendía, E. R. 1996. Aplicación de las imágenes de satélite en la cartografía de uso de suelo y vegetación en una región del Oriente del Valle de México. Tesis de licenciatura, DICIFO, UACH, México, 106p.
- Cajuste, L. J., Cruz, y B. A. Ruiz. 1998. Distribución y biodisponibilidad de elementos traza en suelos contaminados con metales. *In*: Memorias del 29 Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo. Chiapas, México.
- Cuadri de la T. G. 1989. Aguas residuales de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. Fundación Friedrich Ebert, Departamento del Distrito Federal, México, 134p.
- Chuvieco, E. 1990. Fundamentos de teledetección espacial. Editorial Rial, Madrid, España, 453p.
- Eustaquio V., C. E., y J. L. Quispe V. 1995. Uso de la percepción remota y los sistemas de información geográfica en la determinación de áreas vulnerables a riesgos naturales. *In*: VII Simposio Latinoamericano de Percepción Remota, SELPER, México, 973p.
- Flores-López F. J. Y Scott, C. A. 2000. Superficie agrícola estimada mediante análisis de imágenes de satélite en Guanajuato, México. IWMI, Instituto Internacional del Manejo del Agua, Serie Latinoamericana No. 15, México, 43p.
- Galvis, E. A. 1998. Diagnóstico y simulación del suministro de nitrógeno edáfico para cultivos anuales. Tesis de doctorado, Colegio de Posgraduados, Texcoco, México.
- Gamrasni, M. A. 1985. Aprovechamiento agrícola de aguas negras urbanas, AFEA, Editorial LIMUSA, México, 143p.
- Garnes, T. P. y S. T. Garnes. 1994. Soil texture effect on nitrate leaching in soil percolates commun. Soil Sci. Plant Anal., 25 (13&14):2561-2570.

- Gutierrez R. M., Ch. Siebe, y I. Summer. 1994. Environmental aspects of land application of wastewater from México City metropolitan area: a bibliographical review and analysis of implication. *In: 15th Worl Congress of Soil Sci.* Acapulco, México, 445p.
- Hernández, S. G., D. L. Flores, V. M. Maples, M. G. Solorio, M. R. Alcala y S. D. Hernández. 1993. *Actas del XII Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo.* Salamanca, España.
- Ibáñez, G., G. Salinas de S., M. I. Lund, y F. Maldonado. 1995. Análisis de áreas salinizadas del Valle de Tulum, mediante el uso de imágenes Landsat TM. *In: VII Simposio Latinoamericano de Percepción Remota, SELPER, México, 973p.*
- INEGI. 1992. *Síntesis Geográfica del Estado de Hidalgo.* INEGI, México, 134p.
- Keeney, D. R., y R. F. Follet. 1991. Managing nitrogen for groundwater quality and farm profitability: Overview an introduction. Pp. 1-7, *In: Managing nitrogen, Soil Science Society, Wisconsin, U. S. A.*
- Kowal, E. N., H. R. Pahren, y E. W. Akin. 1981. Microbiological Health effects associated with the use of municipal wastewater for irrigation. Pp 271-342. *In: Municipal Wastewater Agriculture, Academic Press, New York, U. S. A.*
- Kuntschik, G., A. R. Formaggio, y J. Marinaldo, G. 1995. Cuantificación de pérdida del suelo por erosión hídrica en la cuenca del Ribeirao das Araras (SP, Brasil) en ambiente SIG, usando imágenes TM. *In: VII Simposio Latinoamericano de Percepción Remota, SELPER, México, 973p.*
- Llanos C., M. 1984. *El Maíz: su cultivo y aprovechamiento.* Editorial Mundi-prensa, Madrid, España, 318p.
- Legg, J. O., y J. J. Meisinger. 1982. Soil nitrogen budgets. Pp. 503-566. *In: Nitrogen in agricultural soil, Agronomy 22, American Society of Agronomy, Wisconsin, U. S. A.*
- Lillesand, T. M., y R. W. Kiefer. 1979. *Remote Sensing and Image Interpretation.* John Wiley and sons Inc., New York, U. S. A.
- Lillesand, T. M., y R. W. Kiefer. 1994. *Remote Sensing and Image Interpretation .* John Wiley and sons Inc., 3d ed., New York, U. S. A., 750p.
- López, F., D. Muñoz, A. Mendoza, y A. Soler. 1994. Resources evaluation environmental damage adn ecological planning in land use in the Mezquital Valley, Hidalgo, Mexico. Pp. 22-23, *In: Trnsactions of 15 World Congress of Soil Science, Volumen 6, Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, México.*

- Maples, V. M. 1990. Antecedentes físicos, históricos y socioeconómicos del Distrito Rural 063. Estado de Hidalgo. *In*: 1er. Simposium Nacional sobre degradación del Suelo, Instituto de Geología, UNAM, México, pp38-39.
- Martínez, C. A. 1997. Determinación de la Relación Espectral ente características de la Cubierta Vegetal y datos de Imágenes de satélite Landsat-TM. Tesis de Licenciatura, DICIFO, UACH, México, 99p.
- Mendoza, M. H. 1981. Lands treatment: a viable solution for management of wastewater in the metropolitan area of the Valley of Mexico. Pp. 163-193. *In*: Municipal Wastewater in Agriculture, Academic Press, New York, U. S. A.
- Melesio-Nolasco. 1991. Bases teóricas de la percepción remota. Apuntes del Curso "Satélites y agricultura: el ejmplo Spot". *In*: Soran, V., L. Cajuste y E. Ojeda (ed), p2-19, Colegio de Postgraduados, Texcoco, México.
- Montalvo, Castro, Vázquez y Ascensios. 1995. Zonificación de áreas húmedas con problemas de drenaje y salinidad en los valles de Jequetepeque-Chaman, Lima, Perú. *In*: VII Simposio Latinoamericano de Percepción Remota, SELPER, México, 973p.
- Moreno. Ardila, y Gondina. 1995. Identificación de superficies con drenaje deficiente en la zona de Vichada, Colombia. *In*: VII Simposio Latinoamericano de Percepción Remota, SELPER, México, 973p.
- Navarro, G., O. M. A. Pérez, y S. D. Flores. 1998. Producción de avena irrigada con agua residual tratada. *In*: La Investigación Edafológica en México 1997-1998. Memorias del 29 Congreso Nacional de la Ciencia del suelo, Chiapas, México.
- Nieves. J. y V. Sorani. 1995. Estudio de las Relaciones suelo-vegetación en las áreas forestales de la República Mexicana. *In*: VII Simposio Latinoamericano de Percepción Remota, SELPER, México, 973p.
- Palacio-prieto, J. L., Ch. Siebe, y L. L. Domínguez. 1994. Evaluation of soil buffer capacities using geostatistical techniques and GIS in an area under wastewater irrigation in México. Pp. 329-330. *In*: Transactions of 15 world congress of soil science, volume 6b. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, México.
- Panario, D. 1995. La evaluación de usos de agua, terrenos y recursos de la cuenca de la Laguna Merín-Uruguay. *In*: VII Simposio Latinoamericano de Percepción Remota, SELPER, México, 973p.
- Pozo Ibáñez, M. 1977. La Alfalfa: su cultivo y aprovechamiento. 2da. Edición, Editorial Mundi-Prensa, Madrid, España, 378p.

- Pulido M., L., H. Sanvicente, C. L. Wiegana, y G. L. Anderson. 1995. Estimación de perdidas de cosecha en suelos ensalitrados mediante imágenes de satélite. *In: VII Simposio Latinoamericano de Percepción Remota*, SELPER, México, 973p.
- Pulido M., L. *et al.* 1999. Identificación de la salinidad del suelo con imágenes de satélite Landsat TM y un sensor electromagnético en el Distrito de Riego 075 Río Fuerte, Sinaloa. *In: Memorias de la X reunión nacional de la sociedad Latinoamericana de Especialistas en Percepción Remota y Sistemas de Información Espacial (SELPER)*, 11-12 de Noviembre de 1999, Guanajuato, México.
- Ramos, C. 1997. El uso de aguas residuales en riegos localizados y en cultivos hidropónicos. Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias, Moncada, España.
- Seoáñez C., M. 1995. Aguas Residuales Urbanas: Tratamientos Naturales de Bajo Costo y Aprovechamiento, Editorial Mundi-Prensa, España, 368p.
- S. R. H. 1976. Estudio agrológico complementario del Distrito de Riego 03 de Tula, Hidalgo. Serie de Estudios, Publicación No. 10, Secretaria de Recursos Hidráulicos, México, 66p.
- Soria, R. J., Ortiz S., C. A., Islas G., F. Y Volke H. V. 1998. Sensores remotos: Principios y Aplicaciones en la evaluación de recursos naturales, Experiencias en México. CONACYT, Publicación especial 7, Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, Colegio de Postgraduados, Chapingo, México.
- Soria, R. J. 1999. Determinación de sitios de ocurrencia y estimación de rendimientos de maíz (*Zea mays* L.) a través de sensores remotos. Tesis de Doctorado, Col. de Postgraduados, Texcoco, México, 118p.
- Thiruvengadachari, S. and Sakthivadivel, R. 1997. Satellite remote sensing for assessment of irrigation system performance: a case study in India. International Water Management Institute, IWMI, Colombo, Sri Lanka.
- U.S.G.S. 1995. T M (Landsat Thematic Mapper Data). "Remote Sensing Image", Sioux Falls, United State Geological Survey, U. S. A.
- Vázquez, A. A. 1999. Evaluación del riesgo a la contaminación con metales pesados, en la región del Valle del Mezquital, Hidalgo. Tesis de Doctorado, Col. De Posgraduados, Texcoco, México.
- Vázquez, M. M. P. 1997. Clasificación de niveles de mortalidad en bosques de Abies religiosa, mediante imágenes de satélite Landsat-TM. Tesis de Licenciatura, DICIFO, UACH, México, 119p.

Watts, C. *et al.* 1999. Estimación de evaporación y radiación solar en el Valle del Yaqui, Sonora, usando datos de satélite. Ingeniería Hidráulica en México, Volumen XIV, Número 3, México.

Yadav S. N. 1997. Formulation and estimation of nitrate-nitrogen leaching corn cultivation. J. Environ. Qual. 26:808-814.

ANEXO 1

Cuadro 1: Datos de reflectancia y de campo para la Profundidad de 0-30 cm.

Cultivo	SITIO	Reflec.1	Reflec.2	Reflec.3	Reflec.4	Reflec.5	Reflec.6	NDVI	NO3 (ppm)	NH4 (ppm)	Rie añ
Alfalfa	18	75	67	84	51	100	90	-0.0526	17.61	4.06	24
Alfalfa	148	93	79	96	62	118	106	-0.0536	7.11	3.04	88
Alfalfa	75	70	63	82	53	88	77	-0.0667	13.88	3.72	88
Alfalfa	60	87	75	92	60	107	88	-0.0974	35.22	4.40	80
Alfalfa	145A	67	62	84	55	90	73	-0.1043	7.11	1.01	.
Alfalfa	79	102	81	97	64	137	125	-0.0458	14.22	5.08	31
Alfalfa	66	87	74	90	61	120	100	-0.0909	58.26	2.03	80
Alfalfa	34C	74	67	88	60	107	89	-0.0918	17.27	6.43	.
Alfalfa	56	103	86	99	69	146	130	-0.058	23.03	5.41	88
Alfalfa	112	85	75	90	64	111	87	-0.1212	14.90	8.80	28
Alfalfa	51	104	84	100	73	144	123	-0.0787	2.37	49.79	88
Alfalfa	120A	123	96	108	79	132	112	-0.082	11.17	3.04	.
Alfalfa	78A	90	78	96	72	110	86	-0.1224	13.54	5.41	.
Alfalfa	93	97	84	94	71	125	98	-0.1211	29.13	2.03	68
Alfalfa	122	104	84	99	77	160	122	-0.1348	21.67	7.45	28
Alfalfa	55	58	58	76	60	90	84	-0.0345	27.43	5.41	88
Alfalfa	53	86	77	90	72	111	80	-0.1623	27.09	9.14	75
Alfalfa	62	59	64	74	60	97	58	-0.2516	19.64	4.40	88
Alfalfa	138	98	85	101	82	126	98	-0.125	24.72	2.37	25
Alfalfa	72	71	66	80	65	104	78	-0.1429	17.95	1.69	88
Alfalfa	134	96	84	99	83	109	81	-0.1474	16.59	2.70	40
Alfalfa	124	74	71	83	71	82	52	-0.2239	14.90	2.03	40
Alfalfa	133	110	69	82	71	114	94	-0.0962	32.17	3.38	40
Alfalfa	25	88	77	93	82	135	94	-0.179	15.92	6.43	75
Alfalfa	69A	83	73	85	75	123	92	-0.1442	39.97	6.77	.
Alfalfa	29	91	79	95	85	116	76	-0.2083	42.34	2.03	21
Alfalfa	38	87	78	93	85	141	101	-0.1653	9.82	7.11	24
Alfalfa	59	99	82	80	74	142	117	-0.0965	13.54	1.35	88
Alfalfa	132	103	82	98	91	122	91	-0.1455	11.17	3.38	25
Alfalfa	135	109	91	98	94	154	118	-0.1324	13.88	1.01	15
Alfalfa	108A	98	86	99	95	137	94	-0.1861	63.68	6.77	.
Alfalfa	126	82	74	87	84	108	73	-0.1934	10.50	7.79	28
Alfalfa	97	78	72	83	81	105	77	-0.1538	7.45	5.41	36
Alfalfa	143	100	91	98	96	117	78	-0.2	6.09	0.33	20
Alfalfa	87	84	79	88	87	128	85	-0.2019	21.00	24.38	31
Alfalfa	149	82	71	85	85	127	91	0	13.54	4.06	.
Alfalfa	139	98	89	100	106	154	106	-0.1846	14.56	3.72	20
Alfalfa	136	109	95	101	112	124	90	-0.1589	34.22	2.37	25
Alfalfa	48	66	67	83	96	120	96	-0.125	4.40	1.35	88
Alfalfa	92	61	64	75	89	102	69	-0.193	23.03	2.03	68
Alfalfa	127	58	62	70	85	80	50	-0.2308	15.92	0.67	40
Alfalfa	80	53	76	87	106	106	54	-0.325	17.61	5.08	46
Alfalfa	104	66	70	83	102	105	62	-0.2575	25.74	0.67	10
Alfalfa	129	87	86	92	115	144	100	-0.1803	4.74	4.06	40
Alfalfa	19	69	74	82	105	105	64	-0.2426	10.5	0.33	39
Alfalfa	128	76	72	84	111	134	85	-0.2237	9.14	2.70	40
Alfalfa	74	36	51	103	139	73	36	-0.3394	10.16	4.74	68
Alfalfa	140	62	67	78	110	96	53	-0.2886	6.77	1.69	20
Alfalfa	106	59	67	77	113	100	63	-0.227	23.71	9.48	40
Alfalfa	115	67	71	81	120	105	62	-0.2575	21.33	3.72	40
Alfalfa	31	56	65	74	115	112	75	-0.1979	15.92	0.33	39
Alfalfa	27	51	61	73	115	74	39	-0.3097	49.45	21.67	39
Alfalfa	90	53	58	75	122	77	44	-0.2727	7.45	2.70	31
Alfalfa	57	47	61	73	119	97	47	-0.3472	8.46	2.37	80

Alfalfa	13	42	53	72	122	75	37	-0.3393	25.4	16.93	39
Alfalfa	49A	55	74	81	147	97	47	-0.3472	13.21	5.75	.
Alfalfa	67	49	58	71	138	113	50	-0.3865	0.33	15.92	88
Alfalfa	41	42	60	71	154	95	43	-0.3768	49.11	0.67	88
	Media	78.603	73.534	87.103	89.483	113.29	80.862	-0.178	19.4317	5.66534	43.55
Maíz	147	65	61	79	45	87	78	-0.0545	34.21	15.58	88
Maíz	212	168	138	146	84	143	141	-0.007	32.17	5.41	.
Maíz	69	71	62	79	48	100	87	-0.0695	35.90	5.41	68
Maíz	94	70	64	81	50	121	106	-0.0661	15.58	5.41	10
Maíz	89	77	65	79	50	116	99	-0.0791	4.74	10.83	31
Maíz	110	84	72	89	57	112	95	-0.0821	105.00	9.48	40
Maíz	100	99	79	96	63	128	114	-0.0579	96.87	3.72	68
Maíz	71	67	61	81	54	43	80	0.30081	8.46	0.33	88
Maíz	73A	106	90	103	69	127	111	-0.0672	29.80	4.74	.
Maíz	34	74	67	88	60	107	89	-0.0918	76.89	5.41	39
Maíz	58	63	60	80	55	89	67	-0.141	8.12	3.72	80
Maíz	52	77	66	84	58	98	85	-0.071	19.98	1.69	88
Maíz	5	110	91	104	73	145	132	-0.0469	17.95	21.33	75
Maíz	15	96	83	91	64	135	114	-0.0843	6.43	0.33	25
Maíz	103	120	99	113	80	124	93	-0.1429	71.81	7.45	40
Maíz	17	96	83	97	69	132	115	-0.0688	17.27	5.08	75
Maíz	131	106	87	102	74	117	95	-0.1038	68.08	1.35	40
Maíz	95	132	108	118	86	147	123	-0.0889	7.45	5.41	31
Maíz	123	99	80	96	70	126	109	-0.0723	45.38	2.70	40
Maíz	73	90	80	90	66	115	88	-0.133	71.13	3.72	46
Maíz	7	80	73	88	65	94	68	-0.1605	17.61	0.67	75
Maíz	121	107	90	101	75	140	117	-0.0895	64.35	8.12	28
Maíz	133A	105	89	103	77	131	114	-0.0694	53.85	3.72	.
Maíz	119	103	86	97	73	119	102	-0.0769	19.64	10.16	40
Maíz	22	76	86	86	65	90	61	-0.1921	17.95	12.53	24
Maíz	91	89	77	91	69	100	66	-0.2048	48.09	3.04	46
Maíz	114	74	67	85	65	103	86	-0.0899	19.98	4.40	40
Maíz	86	94	74	94	72	143	110	-0.1304	10.16	9.48	31
Maíz	78	100	86	99	76	101	78	-0.1285	17.61	5.75	68
Maíz	10	97	77	91	70	125	99	-0.1161	4.74	2.7	24
Maíz	37	90	78	90	70	133	100	-0.1416	23.37	7.11	75
Maíz	40	100	82	99	77	148	123	-0.0923	36.24	0.67	24
Maíz	12	70	65	77	60	107	76	-0.1694	26.75	3.04	25
Maíz	101	116	94	106	84	150	125	-0.0909	16.25	0.67	10
Maíz	142	119	101	111	88	143	122	-0.0792	29.13	5.08	20
Maíz	35	82	73	87	69	101	82	-0.1038	21.33	1.35	39
Maíz	119A	105	90	103	82	117	93	-0.1143	27.09	3.38	.
Maíz	56A	93	80	94	75	129	107	-0.0932	6.77	0.67	.
Maíz	125	87	76	91	73	119	92	-0.128	14.90	2.03	40
Maíz	5A	98	84	97	78	137	117	-0.0787	10.16	0.67	.
Maíz	54	66	65	82	67	96	77	-0.1098	12.53	0.33	24
Maíz	79A	83	76	91	75	119	87	-0.1553	77.23	1.35	.
Maíz	23	128	103	109	90	165	126	-0.134	42	0.33	39
Maíz	64	95	81	96	80	110	79	-0.164	67.06	0.67	68
Maíz	108	100	91	99	83	164	138	-0.0861	9.48	0.67	10
Maíz	98	73	69	83	70	110	83	-0.1399	33.87	11.51	36
Maíz	33	96	84	96	81	125	88	-0.1737	38.27	5.41	21
Maíz	16	99	81	92	78	136	105	-0.1286	7.79	4.74	39
Maíz	117	112	91	101	86	150	114	-0.1364	16.93	4.06	28
Maíz	111	94	81	93	80	147	106	-0.1621	8.12	2.70	40
Maíz	37A	79	75	91	79	134	98	-0.1552	20.66	6.43	.

Maíz	85A	71	65	78	68	96	69	-0.1636	55.55	20.32	.
Maíz	30	87	79	91	80	123	95	-0.1284	46.74	2.37	24
Maíz	9	60	61	76	67	78	53	-0.1908	74.85	11.17	24
Maíz	118	93	80	93	82	136	103	-0.1381	17.61	2.70	28
Maíz	105	93	83	94	84	140	112	-0.1111	34.88	9.48	31
Maíz	99	94	81	96	87	134	94	-0.1754	50.80	5.41	40
Maíz	150	61	61	77	70	103	51	-0.3377	23.71	2.03	.
Maíz	68	50	60	71	66	94	42	-0.3824	42.67	3.72	46
Maíz	14	85	77	91	89	101	66	-0.2096	52.16	4.06	24
Maíz	85	70	67	80	79	123	87	-0.1714	24.38	0.67	68
Maíz	45	75	69	81	80	99	69	-0.2174	30.48	3.72	75
Maíz	47	91	83	94	93	125	98	-0.1211	51.14	2.70	88
Maíz	49	105	86	84	84	142	116	0	28.11	0.33	88
Maíz	43	78	74	87	88	113	88	-0.1244	26.42	0.33	39
Maíz	137	114	103	110	112	144	105	-0.1857	10.33	8.46	15
Maíz	109	92	81	92	96	135	95	-0.1739	35.90	6.77	40
Maíz	81	78	75	86	90	99	63	-0.2222	75.19	7.45	68
Maíz	130	82	75	88	93	115	82	-0.1675	26.08	4.40	25
Maíz	107	89	79	92	98	143	107	-0.144	47.42	0.67	40
Maíz	26	70	69	82	88	108	109	0.00461	115.5	3.04	24
Maíz	128A	86	78	90	98	128	89	-0.1797	70.11	3.72	.
Maíz	46	73	55	68	77	106	61	-0.2695	22.69	2.37	24
Maíz	141	71	71	86	98	108	69	-0.2203	15.92	2.37	15
Maíz	39	87	80	89	104	137	92	-0.1965	17.95	4.74	24
Maíz	102	79	73	81	99	123	79	-0.2178	8.46	4.06	31
Maíz	116	93	80	91	112	119	97	-0.1019	44.71	7.45	28
Maíz	20A	64	69	80	100	110	76	-0.1828	107.37	10.5	.
Maíz	145	62	67	83	104	110	65	-0.2571	21.67	2.03	24
Maíz	32	60	64	77	98	103	58	-0.2795	29.80	22.69	39
Maíz	84	48	56	69	92	84	66	-0.12	32.51	5.75	68
Maíz	42	76	75	82	111	129	102	-0.1169	21.33	0.33	39
Maíz	117A	63	69	76	108	104	78	-0.1429	32.51	3.38	.
Maíz	21	79	69	87	125	161	99	-0.2385	24.04	1.01	24
Maíz	28	58	66	82	118	94	50	-0.3056	13.21	3.38	21
Maíz	4	56	61	75	109	69	34	-0.3398	1.69	13.21	75
Maíz	113	64	65	78	116	119	66	-0.2865	33.19	9.48	40
Maíz	82	46	58	71	109	124	83	-0.1981	73.84	0.67	68
Maíz	96	47	62	72	135	108	52	-0.35	12.19	29.80	31
Maíz	63	53	54	72	145	82	44	-0.3016	20.32	5.75	46
Maíz	61	41	59	72	152	100	48	-0.3514	30.48	6.43	80
Maíz	65	.	.	.	.	.	.	.	13.54	6.09	80
	Media	83.957	75.652	88.511	81.641	117.03	88.826	-0.1428	33.8107	5.29946	37.28

Cuadro 2: Datos de reflectancia y de campo para la Profundidad de 30-60 cm.

Cultivo	SITIO	Reflec.1	Reflec.2	Reflec.3	Reflec.4	Reflec.5	Reflec.6	NDVI	NO3 (ppm)	NH4 (ppm)	Rie añ
Alfalfa	18	75	67	84	51	100	90	-0.0526	29.13	4.06	24
Alfalfa	148	93	79	96	62	118	106	-0.0536	0.33	3.04	88
Alfalfa	60	87	75	92	60	107	88	-0.0974	1.35	4.40	80
Alfalfa	145A	67	62	84	55	90	73	-0.1043	1.01	1.01	.
Alfalfa	79	102	81	97	64	137	125	-0.0458	3.38	5.08	31
Alfalfa	34C	74	67	88	60	107	89	-0.0918	5.75	6.43	.
Alfalfa	56	103	86	99	69	146	130	-0.058	0.67	5.41	88
Alfalfa	112	85	75	90	64	111	87	-0.1212	5.41	8.80	28
Alfalfa	120A	123	96	108	79	132	112	-0.082	3.72	3.04	.
Alfalfa	122	104	84	99	77	160	122	-0.1348	7.45	7.45	28
Alfalfa	75	70	63	68	53	73	36	-0.3394	4.40	3.72	88

Alfalfa	55	58	58	76	60	90	84	-0.0345	13.88	5.41	88
Alfalfa	53	86	77	90	72	111	80	-0.1623	8.12	9.14	75
Alfalfa	62	59	64	74	60	97	58	-0.2516	20.32	4.40	88
Alfalfa	138	98	85	101	82	126	98	-0.125	5.75	2.37	25
Alfalfa	72	71	66	80	65	104	78	-0.1429	27.43	1.69	88
Alfalfa	134	96	84	99	83	109	81	-0.1474	7.11	2.70	40
Alfalfa	133	110	69	82	71	114	94	-0.0962	1.01	3.38	40
Alfalfa	25	88	77	93	82	135	94	-0.179	6.43	6.43	75
Alfalfa	38	87	78	93	85	141	101	-0.1653	8.46	7.11	24
Alfalfa	59	99	82	80	74	142	117	-0.0965	0.67	1.35	88
Alfalfa	132	103	82	98	91	122	91	-0.1455	20.66	3.38	25
Alfalfa	135	109	91	98	94	154	118	-0.1324	3.04	1.01	15
Alfalfa	126	82	74	87	84	108	73	-0.1934	5.75	7.79	28
Alfalfa	97	78	72	83	81	105	77	-0.1538	15.58	5.41	36
Alfalfa	143	100	91	98	96	117	78	-0.2	4.74	0.33	20
Alfalfa	87	84	79	88	87	128	85	-0.2019	1.35	24.38	31
Alfalfa	139	98	89	100	106	154	106	-0.1846	1.69	3.72	20
Alfalfa	136	109	95	101	112	124	90	-0.1589	2.37	2.37	25
Alfalfa	48	66	67	83	96	120	96	-0.125	7.70	1.35	88
Alfalfa	80	53	76	91	106	106	54	-0.325	5.41	5.08	46
Alfalfa	92	61	64	75	89	102	69	-0.193	14.22	2.03	68
Alfalfa	127	58	62	70	85	80	50	-0.2308	1.69	0.67	40
Alfalfa	104	66	70	83	102	105	62	-0.2575	14.90	0.67	10
Alfalfa	129	87	86	92	115	144	100	-0.1803	3.04	4.06	40
Alfalfa	19	69	74	82	105	105	64	-0.2426	8.46	0.33	39
Alfalfa	128	76	72	84	111	134	85	-0.2237	7.11	2.70	40
Alfalfa	74	36	51	103	139	127	111	-0.0672	4.74	4.74	68
Alfalfa	140	62	67	78	110	96	53	-0.2886	2.03	1.69	20
Alfalfa	106	59	67	77	113	100	63	-0.227	11.51	9.48	40
Alfalfa	115	67	71	81	120	105	62	-0.2575	11.17	3.72	40
Alfalfa	31	56	65	74	115	112	75	-0.1979	11.17	0.33	39
Alfalfa	27	51	61	73	115	74	39	-0.3097	8.80	21.67	39
Alfalfa	90	53	58	75	122	77	44	-0.2727	8.12	2.70	31
Alfalfa	57	47	61	73	119	97	47	-0.3472	4.01	2.37	80
Alfalfa	13	42	53	72	122	75	37	-0.3393	13.88	16.93	39
Alfalfa	49A	55	74	81	147	97	47	-0.3472	11.85	5.75	
Alfalfa	67	49	58	71	138	113	50	-0.3865	0.33	15.92	88
Alfalfa	41	42	60	71	154	95	43	-0.3768	11.17	0.67	88
	Media	76.592	72.755	86.02	91.878	112.78	79.837	-0.1867	7.7198	5.05449	45.49
Maíz	147	65	61	79	45	87	78	-0.0545	7.79	15.58	88
Maíz	212	168	138	146	84	143	141	-0.007	11.25	5.41	
Maíz	89	77	65	79	50	116	99	-0.0791	4.74	10.83	31
Maíz	58	63	60	80	55	89	67	-0.141	4.06	3.72	80
Maíz	52	77	66	84	58	98	85	-0.071	10.50	1.69	88
Maíz	5	110	91	104	73	145	132	-0.0469	0.33	21.33	75
Maíz	15	96	83	91	64	135	114	-0.0843	4.40	0.33	25
Maíz	17	96	83	97	69	132	115	-0.0688	7.11	5.08	75
Maíz	131	106	87	102	74	117	95	-0.1038	11.85	1.35	40
Maíz	123	99	80	96	70	126	109	-0.0723	12.19	2.70	40
Maíz	73	90	80	90	66	115	88	-0.133	28.45	3.72	46
Maíz	7	80	73	88	65	94	68	-0.1605	11.51	0.67	75
Maíz	121	107	90	101	75	140	117	-0.0895	12.87	8.12	28
Maíz	133A	105	89	103	77	131	114	-0.0694	0.33	3.72	
Maíz	119	103	86	97	73	119	102	-0.0769	21.00	10.16	40
Maíz	22	76	86	86	65	90	61	-0.1921	3.04	12.53	24
Maíz	114	74	67	85	65	103	86	-0.0899	1.69	4.40	40

Maíz	78	100	86	99	76	101	78	-0.1285	2.70	5.75	68
Maíz	12	70	65	77	60	107	76	-0.1694	9.14	3.04	25
Maíz	101	116	94	106	84	150	125	-0.0909	5.41	0.67	10
Maíz	142	119	101	111	88	143	122	-0.0792	8.46	5.08	20
Maíz	35	82	73	87	69	101	82	-0.1038	1.69	1.35	39
Maíz	119A	105	90	103	82	117	93	-0.1143	17.61	3.38	
Maíz	56A	93	80	94	75	129	107	-0.0932	0.67	0.67	
Maíz	125	87	76	91	73	119	92	-0.128	14.22	2.03	40
Maíz	5A	98	84	97	78	137	117	-0.0787	3.38	0.67	
Maíz	23	128	103	109	90	165	126	-0.134	8.80	0.33	39
Maíz	64	95	81	96	80	110	79	-0.164	17.61	0.67	68
Maíz	108	100	91	99	83	164	138	-0.0861	16.93	0.67	10
Maíz	98	73	69	83	70	110	83	-0.1399	8.12	11.51	36
Maíz	33	96	84	96	81	125	88	-0.1737	5.75	5.41	21
Maíz	117	112	91	101	86	150	114	-0.1364	4.74	4.06	28
Maíz	30	87	79	91	80	123	95	-0.1284	15.92	2.37	24
Maíz	9	60	61	76	67	78	53	-0.1908	7.11	11.17	24
Maíz	118	93	80	93	82	136	103	-0.1381	4.06	2.70	28
Maíz	105	93	83	94	84	140	112	-0.1111	15.92	9.48	31
Maíz	99	94	81	96	87	134	94	-0.1754	47.42	5.41	40
Maíz	68	50	60	71	66	94	42	-0.3824	14.22	3.72	46
Maíz	14	85	77	91	89	101	66	-0.2096	18.96	4.06	24
Maíz	47	91	83	94	93	125	98	-0.1211	5.08	2.70	88
Maíz	49	105	86	84	84	142	116	0	9.14	0.33	88
Maíz	43	78	74	87	88	113	88	-0.1244	20.32	0.33	39
Maíz	137	114	103	110	112	144	105	-0.1857	6.33	8.46	15
Maíz	81	78	75	87	90	99	63	-0.2222	18.96	7.45	68
Maíz	130	82	75	88	93	115	82	-0.1675	15.24	4.40	25
Maíz	26	70	69	82	88	108	109	0.00461	14.56	3.04	24
Maíz	128A	86	78	90	98	128	89	-0.1797	1.69	3.72	
Maíz	46	73	55	68	77	106	61	-0.2695	14.23	2.37	24
Maíz	141	71	71	86	98	108	69	-0.2203	2.37	2.37	15
Maíz	39	87	80	89	104	137	92	-0.1965	7.11	4.74	24
Maíz	102	79	73	81	99	123	79	-0.2178	1.01	4.06	31
Maíz	116	93	80	91	112	119	97	-0.1019	12.87	7.45	28
Maíz	20A	64	69	80	100	110	76	-0.1828	65.77	10.50	
Maíz	145	62	67	83	104	110	65	-0.2571	21.67	2.03	24
Maíz	82	46	58	86	109	124	83	-0.1981	24.38	0.67	68
Maíz	32	60	64	77	98	103	58	-0.2795	15.32	22.69	39
Maíz	84	48	56	69	92	84	66	-0.12	7.66	5.75	68
Maíz	42	76	75	82	111	129	102	-0.1169	13.21	0.33	39
Maíz	117A	63	69	76	108	104	78	-0.1429	4.74	3.38	
Maíz	21	79	69	87	125	161	99	-0.2385	4.83	1.01	24
Maíz	28	58	66	82	118	94	50	-0.3056	7.11	3.38	21
Maíz	4	56	61	75	109	69	34	-0.3398	0.33	13.21	75
Maíz	96	47	62	72	135	108	52	-0.35	4.22	29.80	31
Maíz	63	53	54	72	145	82	44	-0.3016	10.16	5.75	46
Maíz	61	41	59	72	152	100	48	-0.3514	0.33	6.43	80
Maíz	65								1.35	6.09	80
Media	83.152	75.833	88.167	84.848	116.05	87.258	-0.1497	10.787	5.42394	37.58	

Cuadro 3: Datos de reflectancia y de campo para la Profundidad de 60-90 cm.

Cultivo	SITIO	Reflec.1	Reflec.2	Reflec.3	Reflec.4	Reflec.5	Reflec.6	NDVI	NO3 (ppm)	NH4 (ppm)	Rie añ
Alfalfa	148	93	79	96	62	118	106	-0.0536	3.04	3.04	88
Alfalfa	60	87	75	92	60	107	88	-0.0974	7.45	4.40	80
Alfalfa	145A	67	62	84	55	90	73	-0.1043	4.06	1.01	

Alfalfa	79	102	81	97	64	137	125	-0.0458	0.33	5.08	31
Alfalfa	56	103	86	99	69	146	130	-0.058	2.55	5.41	88
Alfalfa	120A	123	96	108	79	132	112	-0.082	1.69	3.04	.
Alfalfa	122	104	84	99	77	160	122	-0.1348	7.45	7.45	28
Alfalfa	53	86	77	90	72	111	80	-0.1623	7.45	9.14	88
Alfalfa	138	98	85	101	82	126	98	-0.125	5.08	2.37	25
Alfalfa	134	96	84	99	83	109	81	-0.1474	8.46	2.70	40
Alfalfa	133	110	69	82	71	114	94	-0.0962	1.01	3.38	40
Alfalfa	25	88	77	93	82	135	94	-0.179	7.11	6.43	75
Alfalfa	132	103	82	98	91	122	91	-0.1455	10.50	3.38	25
Alfalfa	135	109	91	98	94	154	118	-0.1324	2.37	1.01	15
Alfalfa	126	82	74	87	84	108	73	-0.1934	1.01	7.79	28
Alfalfa	143	100	91	98	96	117	78	-0.2	2.70	0.33	20
Alfalfa	139	98	89	100	106	154	106	-0.1846	2.37	3.72	20
Alfalfa	136	109	95	101	112	124	90	-0.1589	1.69	2.37	25
Alfalfa	127	58	62	70	85	80	50	-0.2308	1.69	0.67	40
Alfalfa	19	69	74	82	105	105	64	-0.2426	1.69	0.33	39
Alfalfa	128	76	72	84	111	134	85	-0.2237	1.69	2.70	40
Alfalfa	140	62	67	78	110	96	53	-0.2886	7.45	1.69	20
Alfalfa	115	67	71	81	120	105	62	-0.2575	10.33	3.72	40
Alfalfa	31	56	65	74	115	112	75	-0.1979	9.22	0.33	39
Alfalfa	27	51	61	73	115	74	39	-0.3097	0.67	21.67	39
Alfalfa	90	53	58	75	122	77	44	-0.2727	3.22	2.70	31
Alfalfa	13	42	53	72	122	75	37	-0.3393	12.53	16.93	39
Alfalfa	49A	55	74	81	147	97	47	-0.3472	6.21	5.75	24
Alfalfa	41	42	60	71	154	95	43	-0.3768	26.75	0.67	88
	Media	82.379	75.655	88.379	94.655	114.28	81.31	-0.1858	5.44034	4.45552	39.83
Maíz	147	65	61	79	45	87	78	-0.0545	3.04	15.58	88
Maíz	58	63	60	80	55	89	67	-0.141	0.67	3.72	80
Maíz	52	77	66	84	58	98	85	-0.071	9.14	1.69	88
Maíz	5	110	91	104	73	145	132	-0.0469	0.33	21.33	75
Maíz	15	96	83	91	64	135	114	-0.0843	4.40	0.33	25
Maíz	17	96	83	97	69	132	115	-0.0688	6.33	5.08	75
Maíz	131	106	87	102	74	117	95	-0.1038	5.75	1.35	40
Maíz	7	80	73	88	65	94	68	-0.1605	9.48	0.67	75
Maíz	121	107	90	101	75	140	117	-0.0895	10.83	8.12	28
Maíz	133A	105	89	103	77	131	114	-0.0694	0.33	3.72	.
Maíz	22	76	86	86	65	90	61	-0.1921	2.37	12.53	24
Maíz	78	100	86	99	76	101	78	-0.1285	2.70	5.75	68
Maíz	101	116	94	106	84	150	125	-0.0909	3.44	0.67	10
Maíz	142	119	101	111	88	143	122	-0.0792	2.03	5.08	20
Maíz	35	82	73	87	69	101	82	-0.1038	3.04	1.35	39
Maíz	56A	93	80	94	75	129	107	-0.0932	0.67	0.67	.
Maíz	5A	98	84	97	78	137	117	-0.0787	2.33	0.67	.
Maíz	23	128	103	109	90	165	126	-0.134	9.21	0.33	39
Maíz	108	100	91	99	83	164	138	-0.0861	14.22	0.67	10
Maíz	9	60	61	76	67	78	53	-0.1908	9.82	11.17	24
Maíz	105	93	83	94	84	140	112	-0.1111	16.59	9.48	10
Maíz	14	85	77	91	89	101	66	-0.2096	14.90	4.06	24
Maíz	43	78	74	87	88	113	88	-0.1244	16.25	0.33	39
Maíz	137	114	103	110	112	144	105	-0.1857	6.33	8.46	15
Maíz	130	82	75	88	93	115	82	-0.1675	15.24	4.40	25
Maíz	117A	63	69	101	108	104	78	-0.1429	10.16	3.38	.
Maíz	128A	86	78	90	98	128	89	-0.1797	9.82	3.72	.
Maíz	116	93	80	91	112	119	97	-0.1019	14.22	7.45	28
Maíz	42	76	75	82	111	129	102	-0.1169	4.40	0.33	39

Maiz	4	56	61	75	109	69	34	-0.3398	0.33	13.21	75
Maiz	63	53	54	72	145	82	44	-0.3016	11.51	5.75	46
Maiz	61	41	59	72	152	100	48	-0.3514	8.46	6.43	80
	Media	87.406	79.063	92.063	85.344	117.81	91.844	-0.1375	7.13563	5.23375	37.16

Cuadro 4: Datos de reflectancia y de campo para la Profundidad de 90-120 cm.

Cultivo	SITIO	Reflec.1	Reflec.2	Reflec.3	Reflec.4	Reflec.5	Reflec.6	NDVI	NO3 (ppm)	NH4 (ppm)	Rie añ
Alfalfa	60	87	75	92	60	107	88	-0.0974	2.70	4.40	80
Alfalfa	145A	67	62	84	55	90	73	-0.1043	2.33	1.01	
Alfalfa	53	86	77	90	72	111	80	-0.1623	5.41	3.72	75
Alfalfa	134	96	84	99	83	109	81	-0.1474	9.82	2.70	40
Alfalfa	135	109	91	98	94	154	118	-0.1324	3.04	1.01	85
Alfalfa	143	100	91	98	96	117	78	-0.2	3.38	0.33	80
Alfalfa	139	98	89	100	106	154	106	-0.1846	1.69	3.72	20
Alfalfa	27	51	61	73	115	74	39	-0.3097	5.33	21.67	39
Alfalfa	13	42	52	72	122	75	37	-0.3393	9.14	16.93	39
	Media	81.778	75.778	89.556	89.222	110.11	77.778	-0.1864	4.76	6.16556	50.89
Maiz	5	110	91	104	73	145	132	-0.0469	0.33	21.33	75
Maiz	15	96	83	91	64	135	114	-0.0843	1.01	0.33	25
Maiz	17	96	83	97	69	132	115	-0.0688	12.74	5.08	75
Maiz	131	106	87	102	74	117	95	-0.1038	11.85	1.35	40
Maiz	121	107	90	101	75	140	117	-0.0895	8.80	8.12	28
Maiz	133A	110	89	103	77	131	114	-0.0694	11.85	3.72	
Maiz	35	82	73	87	69	101	82	-0.1038	1.69	1.35	39
Maiz	5A	98	84	97	78	137	117	-0.0787	8.44	0.67	
Maiz	23	128	103	109	90	165	126	-0.134	13.54	0.33	39
Maiz	105	93	83	94	84	140	112	-0.1111	4.06	9.48	31
Maiz	137	114	103	110	112	144	105	-0.1857	3.46	8.46	15
Maiz	130	82	75	88	93	115	82	-0.1675	11.17	4.40	25
Maiz	128A	86	78	90	98	128	89	-0.1797	3.04	3.72	
Maiz	116	93	80	91	112	119	97	-0.1019	15.58	7.45	28
Maiz	4	56	61	75	109	69	34	-0.3398	0.33	13.21	75
Maiz	61	41	59	72	152	100	48	-0.3514	0.33	6.43	80
	Media	93.625	82.625	94.438	89.313	126.13	98.688	-0.1385	6.76375	5.96438	35.94

ANEXO 2

A continuación se presentan tres salidas del Programa SAS, la primera indica el análisis de varianza para los niveles de nitratos, la segunda indica el análisis de varianza para los niveles de amonios y la última es la comparación de medias para los niveles de nitratos y amonios.

P = profundidad de muestra, C = tipo de cultivo y R = periodo de riego.

The SAS System 08:07 Saturday, October 25, 1997 43
General Linear Models Procedure
Class Level Information

Class	Levels	Values
P	4	1 2 3 4
C	2	1 2
R	3	1 2 3

Number of observations in data set = 351

NOTE: Due to missing values, only 307 observations can be used in this analysis.

The SAS System 08:07 Saturday, October 25, 1997 44
General Linear Models Procedure
Dependent Variable: NITRA

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	23	34628.36425661	1505.58105464	6.99	0.0001
Error	283	60927.22928346	215.29056284		
Corrected Total	306	95555.59354007			

R-Square	C.V.	Root MSE	NITRA Mean
0.362390	90.88999	14.67278306	16.14345277

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
P	3	27662.40422970	9220.80140990	42.83	0.0001
C	1	3518.32743147	3518.32743147	16.34	0.0001
P*C	3	2288.97750796	762.99250265	3.54	0.0151
R	2	207.31035807	103.65517904	0.48	0.6184
P*R	6	339.73624819	56.62270803	0.26	0.9537
C*R	2	352.76215577	176.38107788	0.82	0.4418
P*C*R	6	258.84632544	43.14105424	0.20	0.9765

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
P	3	21706.40170470	7235.46723490	33.61	0.0001
C	1	920.83996384	920.83996384	4.28	0.0395
P*C	3	2296.37163027	765.45721009	3.56	0.0148
R	2	109.70095529	54.85047764	0.25	0.7753
P*R	6	269.32160547	44.88693424	0.21	0.9740
C*R	2	197.39146322	98.69573161	0.46	0.6327
P*C*R	6	258.84632544	43.14105424	0.20	0.9765

The SAS System 08:07 Saturday, October 25, 1997 80

General Linear Models Procedure

Class Level Information

Class Levels Values

P	4	1 2 3 4
C	2	1 2
R	4	1 2 3 5.41

Number of observations in data set = 346

NOTE: Due to missing values, only 304 observations can be used in this analysis.

The SAS System 08:07 Saturday, October 25, 1997 81

General Linear Models Procedure

Dependent Variable: AMONI

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	23	929.95716653	40.43292028	1.14	0.3015
Error	280	9932.21958841	35.47221282		
Corrected Total	303	10862.17675493			

R-Square	C.V.	Root MSE	AMONI Mean
0.085614	107.5198	5.95585534	5.53930921

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
P	3	43.72336487	14.57445496	0.41	0.7453
C	1	1.14903235	1.14903235	0.03	0.8573
P*C	3	27.35474667	9.11824889	0.26	0.8563
R	3	232.46986766	77.48995589	2.18	0.0901
P*R	6	121.04884441	20.17480740	0.57	0.7551
C*R	2	85.96656498	42.98328249	1.21	0.2992
P*C*R	5	418.24474560	83.64894912	2.36	0.0405

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
P	3	56.92165353	18.97388451	0.53	0.6587
C	1	0.85359259	0.85359259	0.02	0.8768
P*C	3	17.96462052	5.98820684	0.17	0.9174
R	3	108.67797298	36.22599099	1.02	0.3836
P*R	6	157.96892527	26.32815421	0.74	0.6161
C*R	2	373.33582300	186.66791150	5.26	0.0057
P*C*R	5	418.24474560	83.64894912	2.36	0.0405

The SAS System 08:07 Saturday, October 25, 1997 83

General Linear Models Procedure

Tukey's Studentized Range (HSD) Test for variable: AMONI

NOTE: This test controls the type I experimentwise error rate, but generally has a higher type II error rate than REGWQ.

Alpha= 0.05 df= 280 MSE= 35.47221
Critical Value of Studentized Range= 2.784
Minimum Significant Difference= 1.3649
WARNING: Cell sizes are not equal.
Harmonic Mean of cell sizes= 354.5526

Means with the same letter are not significantly different.

Tukey Grouping	Mean	N	C
A	5.6090	304	4
A	5.6090	304	3
A	5.6090	304	1
A	5.6090	304	2

The SAS System 08:07 Saturday, October 25, 1997 83

General Linear Models Procedure

Tukey's Studentized Range (HSD) Test for variable: AMONI

NOTE: This test controls the type I experimentwise error rate, but generally has a higher type II error rate than REGWQ.

Alpha= 0.05 df= 280 MSE= 73.46211
Critical Value of Studentized Range= 10.082
Minimum Significant Difference= 8.899
WARNING: Cell sizes are not equal.
Harmonic Mean of cell sizes= 354.5526

Means with the same letter are not significantly different.

Tukey Grouping	Mean	N	C
A	26.8050	307	1
C	9.2450	307	2
D	6.2790	307	3
D	5.2300	307	4

ANEXO 3

A continuación se muestran 6 análisis de regresión como se obtienen del Programa SAS para cada modelo incluyendo los intervalos de confianza para cada uno de ellos.

MODELO 1

The SAS System 08:07 Saturday, October 25, 1997 26

General Linear Models Procedure
Number of observations in data set = 21

The SAS System 08:07 Saturday, October 25, 1997 27

General Linear Models Procedure

Dependent Variable: NITRA

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	3	949.25813016	316.41937672	2.00	0.1516
Error	17	2683.74073651	157.86710215		
Corrected Total	20	3632.99886667			

R-Square	C.V.	Root MSE	NITRA Mean
0.261288	70.06237	12.56451759	17.93333333

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
REFL2	1	0.45694869	0.45694869	0.00	0.9577
NDVI	1	174.89222859	174.89222859	1.11	0.3073
REFL5	1	773.90895288	773.90895288	4.90	0.0408

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
REFL2	1	596.23330294	596.23330294	3.78	0.0687
NDVI	1	201.61591378	201.61591378	1.28	0.2741
REFL5	1	773.90895288	773.90895288	4.90	0.0408

Parameter	T for H0: Estimate	Pr > T	Std Error of Parameter=0	Estimate
INTERCEPT	1.67496376	0.07	0.9486	25.59663086
REFL2	0.84307718	1.94	0.0687	0.43381547
NDVI	42.52331263	1.13	0.2741	37.62794526
REFL5	-0.47222697	-2.21	0.0408	0.21328076

The SAS System 08:07 Saturday, October 25, 1997 28

OBS	REFL2	NDVI	REFL5	NITRA	P	R	I	S
1	95	0.05164	124	34.22	25.4072	8.8128	-6.7933	57.6076
2	67	0.06771	120	4.40	4.3731	0.0269	-25.4608	34.2069
3	64	0.08537	102	23.03	11.0948	11.9352	-17.4886	39.6782
4	62	0.09677	80	15.92	20.2828	-4.3628	-8.9012	49.4667
5	76	0.09845	106	17.61	19.8790	-2.2690	-8.0994	47.8574
6	70	0.10270	105	25.74	15.4738	10.2662	-12.1611	43.1087
7	86	0.11111	144	4.74	10.9037	-6.1637	-19.2541	41.0615
8	74	0.12299	105	10.50	19.7090	-9.2090	-7.8902	47.3082
9	72	0.13846	134	9.14	4.9859	4.1541	-24.7250	34.6969
10	51	0.14876	73	10.16	16.5251	-6.3651	-13.3415	46.3917
11	67	0.17021	96	6.77	20.0654	-13.2954	-7.1784	47.3091
12	67	0.18947	100	23.71	18.9955	4.7145	-8.1576	46.1486
13	71	0.19403	105	21.33	20.2004	1.1296	-7.1545	47.5553
14	65	0.21693	112	15.92	12.8102	3.1098	-15.0970	40.7173
15	61	0.22340	74	49.45	27.6578	21.7922	-1.0823	56.3978
16	58	0.23858	77	7.45	24.3571	-16.9071	-3.8696	52.5838
17	61	0.23958	97	8.46	17.4845	-9.0245	-10.0694	45.0384
18	53	0.25773	75	25.40	21.9006	3.4994	-6.6562	50.4575
19	74	0.28947	97	13.21	30.5660	-17.3560	0.2283	60.9037
20	58	0.32057	113	0.33	10.8437	-10.5137	-19.8259	41.5133
21	60	0.36889	95	49.11	23.0844	26.0256	-7.1609	53.3297

MODELO 2

The SAS System 08:07 Saturday, October 25, 1997 23

General Linear Models Procedure

Number of observations in data set = 28

NOTE: Due to missing values, only 27 observations can be used in this analysis.

The SAS System 08:07 Saturday, October 25, 1997 24

General Linear Models Procedure

Dependent Variable: NITRA

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	3	7494.21530690	2498.07176897	4.12	0.0178
Error	23	13945.01829310	606.30514318		
Corrected Total	26	21439.23360000			
R-Square		C.V.	Root MSE	NITRA Mean	
0.349556		68.48039	24.62326427	35.95666667	

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
REFL1	1	3.94534176	3.94534176	0.01	0.9364
REFL5	1	169.11020726	169.11020726	0.28	0.6025
REFL6	1	7321.15975788	7321.15975788	12.08	0.0020
Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
REFL1	1	2062.36816181	2062.36816181	3.40	0.0781
REFL5	1	1915.72565887	1915.72565887	3.16	0.0887
REFL6	1	7321.15975788	7321.15975788	12.08	0.0020

Parameter	T for H0: Estimate	Pr > T Parameter=0	Std Error of Estimate	Estimate
INTERCEPT	59.87215318	2.06	0.0507	29.04153030
REFL1	-0.77198631	-1.84	0.0781	0.41857388
REFL5	-0.73226434	-1.78	0.0887	0.41195223
REFL6	1.49718842	3.47	0.0020	0.43085600

The SAS System 08:07 Saturday, October 25, 1997 25

OBS	REFL1	REFL5	REFL6	NITRA	P	R	I	S
1	78	113	88	26.42	48.6639	-22.2439	-4.2306	101.559
2	114	144	105	10.33	23.6244	-13.2944	-34.4560	81.705
3	92	135	95	35.90	32.2266	3.6734	-21.2276	85.681
4	78	99	63	75.19	21.4859	53.7041	-32.7154	75.687
5	82	115	82	26.08	35.1283	-9.0483	-17.4193	87.676
6	89	143	107	47.42	46.6507	0.7693	-7.4178	100.719
7	70	108	109	115.50	89.9421	25.5579	28.5394	151.345
8	86	128	89	70.11	33.0013	37.1087	-19.6731	85.676
9	73	106	61	22.69	17.2256	5.4644	-36.0351	70.486
10	71	108	69	15.92	29.2826	-13.3626	-22.8557	81.421
11	87	137	92	17.95	30.1305	-12.1805	-23.1983	83.459
12	79	123	79	8.46	27.0946	-18.6346	-25.3085	79.498
13	93	119	97	44.71	46.1652	-1.4552	-8.4909	100.821
14	64	110	76	107.37	43.7023	63.6677	-8.5084	95.913
15	62	110	65	21.67	28.7772	-7.1072	-23.5910	81.145
16	60	103	58	29.80	24.9667	4.8333	-27.6975	77.631
17	48	84	66	32.51	60.1210	-27.6110	3.9103	116.332
18	76	129	102	21.33	59.4523	-38.1223	5.4129	113.492
19	63	104	78	32.51	51.8622	-19.3522	-1.1652	104.890
20	79	161	99	24.04	29.2123	-5.1723	-29.9238	88.348
21	58	94	50	13.21	21.1235	-7.9135	-32.2764	74.523
22	56	69	34	1.69	17.0191	-15.3291	-40.5393	74.577
23	64	119	66	33.19	22.1400	11.0500	-31.1651	75.445
24	46	124	83	73.84	57.8266	16.0134	-0.3058	115.959
25	47	108	52	12.19	22.3580	-10.1680	-32.8599	77.576
26	53	82	44	20.32	24.7875	-4.4675	-29.6344	79.209
27	41	100	48	30.48	26.8593	3.6207	-28.6120	82.331
28	.	.	.	13.54	.	.	.	.

MODELO 3

The SAS System 08:07 Saturday, October 25, 1997 20

General Linear Models Procedure
Number of observations in data set = 21

The SAS System 08:07 Saturday, October 25, 1997 21

General Linear Models Procedure
Dependent Variable: NITRA

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	1	36.05539817	36.05539817	1.87	0.1877
Error	19	366.80631612	19.30559559		
Corrected Total	20	402.86171429			

R-Square	C.V.	Root MSE	NITRA Mean
0.089498	56.37224	4.39381333	7.79428571

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
REFL5	1	36.05539817	36.05539817	1.87	0.1877

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
REFL5	1	36.05539817	36.05539817	1.87	0.1877

Parameter	T for H0: Estimate	Pr > T Parameter=0	Std Error of Estimate	Estimate
INTERCEPT	15.19553136	2.76	0.0124	5.50000200
REFL5	-0.07103572	-1.37	0.1877	0.05197964

The SAS System 08:07 Saturday, October 25, 1997 22

OBS	REFL5	NITRA	P	R	I	S
1	124	2.37	6.38710	-4.01710	-3.26924	16.0434
2	120	7.70	6.67124	1.02876	-2.89738	16.2399
3	106	5.41	7.66574	-2.25574	-1.74909	17.0806
4	102	14.22	7.94989	6.27011	-1.46590	17.3657
5	80	1.69	9.51267	-7.82267	-0.26110	19.2864
6	105	14.90	7.73678	7.16322	-1.67640	17.1500
7	144	3.04	4.96639	-1.92639	-5.39500	15.3278
8	105	8.46	7.73678	0.72322	-1.67640	17.1500
9	134	7.11	5.67674	1.43326	-4.27906	15.6326
10	127	4.74	6.17399	-1.43399	-3.56040	15.9084
11	96	2.03	8.37610	-6.34610	-1.07875	17.8310
12	100	11.51	8.09196	3.41804	-1.33185	17.5158
13	105	11.17	7.73678	3.43322	-1.67640	17.1500
14	112	11.17	7.23953	3.93047	-2.21151	16.6906
15	74	8.80	9.93889	-1.13889	-0.03050	19.9083
16	77	8.12	9.72578	-1.60578	-0.14088	19.5924
17	97	4.01	8.30507	-4.29507	-1.14016	17.7503
18	75	13.88	9.86785	4.01215	-0.06622	19.8019
19	97	11.85	8.30507	3.54493	-1.14016	17.7503
20	113	0.33	7.16849	-6.83849	-2.29295	16.6299
21	95	11.17	8.44714	2.72286	-1.01859	17.9129

MODELO 4

The SAS System 08:07 Saturday, October 25, 1997 32

General Linear Models Procedure

Number of observations in data set = 25

NOTE: Due to missing values, only 24 observations can be used in this analysis.

The SAS System 08:07 Saturday, October 25, 1997 33

General Linear Models Procedure

Dependent Variable: NITRA

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	3	1129.26255286	376.42085095	0.52	0.6747
Error	20	14533.85814297	726.69290715		
Corrected Total	23	15663.12069583			

R-Square	C.V.	Root MSE	NITRA Mean
0.072097	155.3694	26.95724220	17.35041667

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
REFL2	1	42.71585902	42.71585902	0.06	0.8109
REFL4	1	798.45744158	798.45744158	1.10	0.3070
NDVI	1	288.08925227	288.08925227	0.40	0.5361

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
REFL2	1	241.18364429	241.18364429	0.33	0.5710
REFL4	1	591.59743643	591.59743643	0.81	0.3777
NDVI	1	288.08925227	288.08925227	0.40	0.5361

Parameter	T for H0: Estimate	Pr > T Parameter=0	Std Error of Estimate	Estimate
INTERCEPT	59.2868066	1.05	0.3074	56.6011175
REFL2	0.6589434	0.58	0.5710	1.1437988
REFL4	-1.0042307	-0.90	0.3777	1.1130017
NDVI	157.2417224	0.63	0.5361	249.7351797

The SAS System 08:07 Saturday, October 25, 1997 34

OBS S	REFL2	REFL4	NDVI	NITRA	P	R	I
1	74	88	0.00571	20.32	20.5748	-0.2548	-39.1196
80.2693							
2	103	112	0.00893	6.33	16.0881	-9.7581	-53.1441
85.3202							
3	75	90	0.01695	18.96	20.9919	-2.0319	-38.0177
80.0015							
4	75	93	0.02762	15.24	19.6578	-4.4178	-39.1920
78.5076							
5	69	88	0.03529	14.56	21.9313	-7.3713	-37.0811
80.9437							
6	78	98	0.04255	1.69	18.9609	-17.2709	-39.6039
77.5258							
7	55	77	0.06207	14.23	27.9628	-13.7328	-35.8318
91.7573							
8	71	98	0.06522	2.37	17.9121	-15.5421	-40.3348
76.1589							
9	80	104	0.07772	7.11	19.7831	-12.6731	-38.9640
78.5303							
10	73	99	0.10000	123.00	23.6950	99.3050	-35.2605
82.6505							
11	80	112	0.10345	12.87	15.7948	-2.9248	-43.0826
74.6722							
12	69	100	0.11111	65.77	21.8021	43.9679	-36.2218
79.8261							
13	67	104	0.11230	21.67	16.6542	5.0158	-41.0834
74.3918							
14	58	109	0.11795	24.38	6.5908	17.7892	-60.4932
73.6749							
15	64	98	0.12000	15.32	21.9136	-6.5936	-36.4731
80.3003							
16	56	92	0.14286	7.66	26.2615	-18.6015	-35.9291
88.4521							
17	75	111	0.15026	13.21	20.8649	-7.6549	-39.1114
80.8413							
18	69	108	0.17391	4.74	23.6434	-18.9034	-37.8632
85.1499							

19	69	125	0.17925	4.83	7.4099	-2.5799	-52.6239
67.4437							
20	66	118	0.18000	7.11	12.5814	-5.4714	-45.4027
70.5654							
21	61	109	0.18478	0.33	19.0767	-18.7467	-39.6829
77.8364							
22	62	135	0.30435	4.22	12.4263	-8.2063	-49.8832
74.7359							
23	54	145	0.33641	10.16	2.1533	8.0067	-61.9935
66.3000							
24	59	152	0.35714	0.33	1.6792	-1.3492	-63.0704
66.4287							
25	.	.	1.35	.	.	.	.

MODELO 5

The SAS System 08:07 Saturday, October 25, 1997 38

General Linear Models Procedure
Number of observations in data set = 10

The SAS System 08:07 Saturday, October 25, 1997 39

General Linear Models Procedure
Dependent Variable: NITRA

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	3	57.52894357	19.17631452	2.68	0.0448
Error	6	68.77121643	8.12853607		
Corrected Total	9	126.30016000			

R-Square	C.V.	Root MSE	NITRA Mean
0.254215	54.83493	5.30363423	9.67200000

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
REFL2	1	0.59065419	0.59065419	0.02	0.0889
REFL3	1	9.53112338	9.53112338	0.34	0.0581
REFL6	1	47.40716600	47.40716600	1.69	0.0241

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
REFL2	1	34.82478999	34.82478999	1.24	0.0308
REFL3	1	6.70436795	6.70436795	0.24	0.0642
REFL6	1	47.40716600	47.40716600	1.69	0.0241

Parameter	T for H0: Estimate	Pr > T	Std Error of Parameter=0	Estimate
INTERCEPT	10.27137196	0.74	0.4870	13.87314016
REFL2	-0.34543181	-1.11	0.0308	0.31044998
REFL3	0.13613734	0.49	0.0642	0.27885081
REFL6	0.16598882	1.30	0.0241	0.12785874

The SAS System 08:07 Saturday, October 25, 1997 40

OBS	REFL2	REFL3	REFL6	NITRA	P	R	I	S
1	74	87	88	16.25	11.1604	5.08962	-2.7876	25.1084
2	103	110	105	6.33	7.0958	-0.76583	-10.5257	24.7173
3	75	88	82	15.24	9.9552	5.28484	-3.6910	23.6013
4	69	101	78	10.16	13.1336	-2.97358	-4.8820	31.1491
5	78	90	89	9.82	10.3531	-0.53306	-3.4326	24.1387
6	80	91	97	14.22	11.1262	3.09376	-3.0023	25.2548
7	75	82	102	4.40	12.4581	-8.05811	-3.5563	28.4725
8	61	75	34	0.33	5.0540	-4.72395	-11.0123	
					21.1202			
9	54	72	44	11.51	8.7235	2.78655	-6.1555	23.6024
10	59	72	48	8.46	7.6602	0.79975	-7.0488	22.3693

MODELO 6

The SAS System 08:07 Saturday, October 25, 1997 35

General Linear Models Procedure
Number of observations in data set = 12

The SAS System 08:07 Saturday, October 25, 1997 36

General Linear Models Procedure
Dependent Variable: NITRA

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	1	336.85039874	336.85039874	12.58	0.0053
Error	10	267.71696793	26.77169679		
Corrected Total	11	604.56736667			

R-Square	C.V.	Root MSE	NITRA Mean
0.557176	74.68084	5.17413730	6.92833333

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
NDVI	1	336.85039874	336.85039874	12.58	0.0053

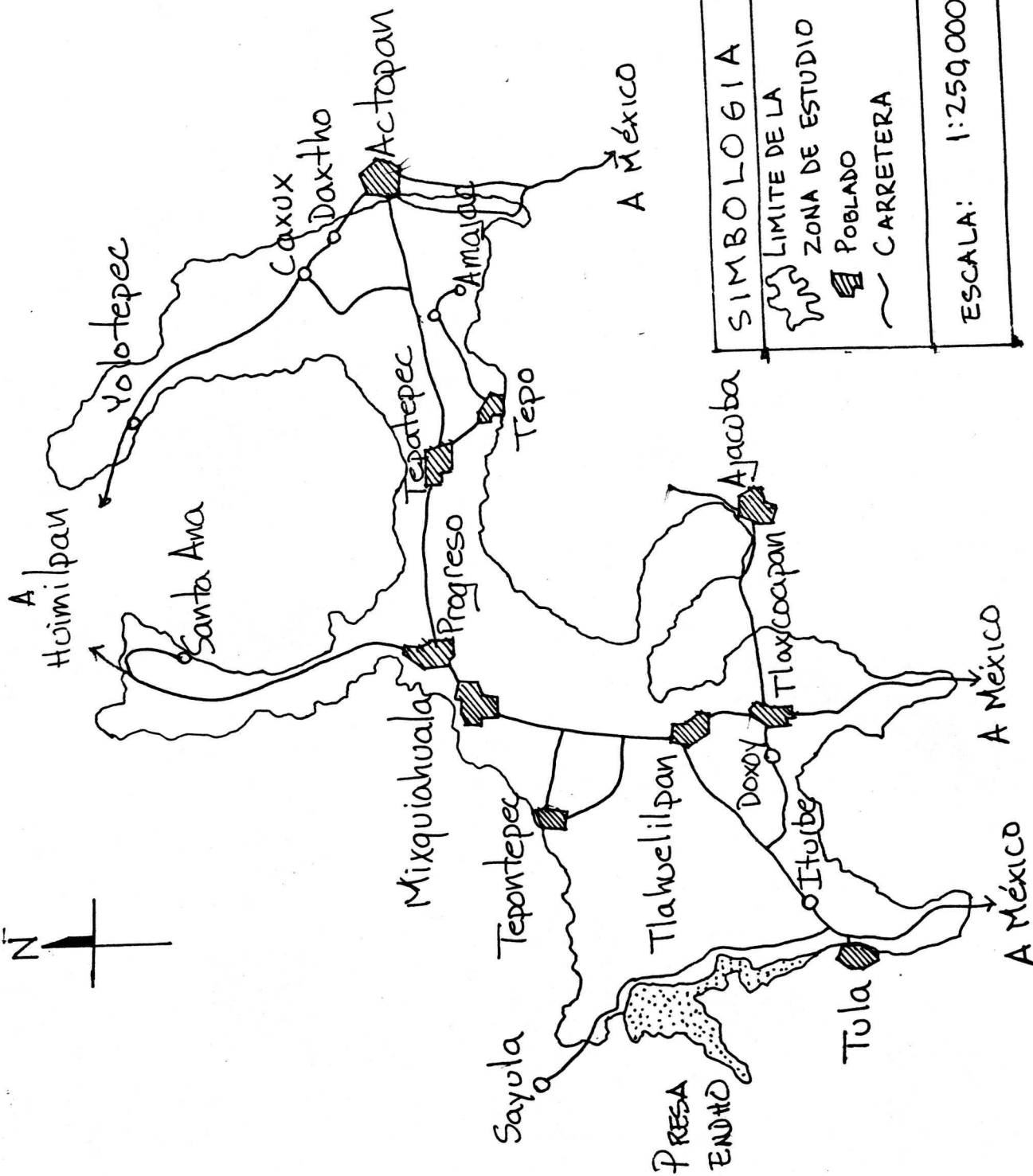
Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
NDVI	1	336.85039874	336.85039874	12.58	0.0053

Parameter	T for H0: Estimate	Pr > T Parameter=0	Std Error of Estimate	Estimate
INTERCEPT	-5.47019335	-1.44	0.1807	3.80110252
NDVI	62.80053941	3.55	0.0053	17.70446428

The SAS System 08:07 Saturday, October 25, 1997 37

	OBS	NDVI	NITRA	P	R	I	S
1		0.05164	1.69	-2.2270	3.91697	-15.5333	11.0794
2		0.09677	1.69	0.6073	1.08272	-12.0320	13.2466
3		0.12299	1.69	2.2539	-0.56394	-10.0995	14.6074
4		0.13846	1.69	3.2253	-1.53527	-8.9976	15.4481
5		0.17021	7.45	5.2193	2.23074	-6.8281	17.2666
6		0.19403	10.33	6.7150	3.61501	-5.2852	18.7152
7		0.21693	9.22	8.1532	1.06680	-3.8709	20.1773
8		0.22340	0.67	8.5597	-7.88971	-3.4834	20.6028
9		0.23858	3.22	9.5127	-6.29268	-2.5961	21.6214
10		0.25773	12.53	10.7155	1.81449	-1.5175	22.9485
11		0.28947	6.21	12.7089	-6.49891	0.1721	25.2457
12		0.36889	26.75	17.6962	9.05377	3.9218	31.4707

ANEXO 4



ANEXO 5

METODOLOGÍA PROPUESTA

Primera Etapa

Es la Preparación de la Imagen de Satélite que tiene como puntos básicos el recorte de la imagen, la generación de estadísticas, el despliegue de la imagen en cada una de sus bandas, la georeferencia (puntos de control transformación y transferencia) y, los realces y mejoras a la imagen.

Segunda Etapa

Es la Recolección de datos de campo que tiene como puntos básicos la toma de muestras de los sitios seleccionados y su análisis en laboratorio u otro medio de análisis.

Para elegir los sitios de muestreo hay que considerar las siguientes recomendaciones: anotar fecha de levantamiento, clave del sitio, coordenadas del sitio, condiciones de la vegetación o cultivo que incluya etapa fenológica, por ciento de cobertura, color de la vegetación o cultivo y si esta afectado por algún agente (helada, sequía, plaga, enfermedad, deficiencia nutrimental u otra), apariencia general y hectáreas estimadas, y humeado del terreno.

Tercera Etapa

Es la ubicación geográfica de los sitios en terreno e imagen, para la obtención de los valores digitales de la imagen en cada una de las bandas.

Cuarta Etapa

Es el Análisis Estadístico que va a variar dependiendo del fin de la investigación, pero que contendrá como puntos a seguir un análisis de correlación y de varianza, y los modelos que se obtengan del estudio.

Quinta Etapa

Es la clasificación de la imagen y la verificación de la misma para comprobar que tan buena resultó la imagen de satélite para el estudio.

METODOLOGÍA PROPUESTA

