

SITIOS DE OCURRENCIA Y ESTIMACIÓN DE RENDIMIENTOS DE MAÍZ A TRAVÉS DE FIRMAS ESPECTRALES DE IMÁGENES DE SATÉLITE LANDSAT-TM*

SITES OF OCCURRENCE AND ESTIMATION YIELDS OF CORN THROUGH SPECTRAL SIGNATURES FROM SATELLITE IMAGES

Jesús Soria Ruiz¹, Carlos A. Ortiz Solorio², Fabián Islas Gutiérrez¹, Victor Volke Haller² y Rodrigo Aveldaño Salazar¹

¹ Drs. Campo Experimental Valle de Toluca- INIFAP. Km. 4.5 Carr. Toluca-Zitácuaro, Zinacantepec, Edo. de México. E-mail : sorj6101@colpos.colpos.mx

² Drs. Instituto de Recursos Naturales, Colegio de Postgraduados. Montecillo 56230, México.

RESUMEN

El estudio se realizó en el estado de Guanajuato, México, en una superficie de 15,840 hectáreas durante el ciclo agrícola primavera-verano de 1997. El objetivo fue determinar la reflectancia espectral del maíz bajo riego en dos etapas fenológicas a través de firmas espectrales obtenidas de imágenes de satélite Landsat-TM y con ello, identificar y cuantificar los sitios de ocurrencia para efectuar estimaciones de rendimiento anticipadas a la cosecha. En seis parcelas piloto de maíz previamente caracterizadas y con el apoyo de un Sistema de Información Geográfica (SIG), se obtuvieron las reflectancias espectrales de las bandas del verde y rojo visible y el infrarrojo cercano, mediante el procesamiento de dos escenas que correspondían con las etapas de floración y madurez fisiológica del cultivo. Para la determinación de los sitios de ocurrencia de maíz, se utilizaron las reflectancias de las bandas analizadas de cada parcela constituidas por varios píxeles. Las firmas espectrales presentan variaciones que dependen de las características fisiológicas y morfológicas de las plantas, así como del manejo de las parcelas según la etapa fenológica. Los resultados de las imágenes clasificadas al compararlas con la verificación de campo indicaron que, a nivel de tipo de cobertura (maíz) se reportó una efectividad de 100%; a nivel de genotipo la predicción fue efectiva en 54%; en la densidad de población el pronóstico registró una

subestimación de 2% y en cuanto al rendimiento de grano el valor predicho presentó una sobrestimación de 7%. Finalmente, el análisis discriminante determinó que es posible anticipar sitios de ocurrencia de maíz a nivel de genotipo, con una probabilidad de 63%.

Palabras clave: Sensores remotos, Landsat-TM, firma espectral, pixel, maíz (*Zea mays L.*), rendimiento.

ABSTRACT

This study was realized in Guanajuato State, Mexico, in 15,840 hectare during the season spring-summer of 1997. The objective was determine the spectral signature of corn (*Zea mays L.*) in two phenological stages obtained from Landsat-TM satellite images and with it, identify and realize estimate yields with previous anticipation to harvest. In six fields pilot of corn previously characterized with Geographical Information System (GIS) selves obtained the reflectance of green and red visible and nearby infrared bands, by means of the processing of two secenes corresponding with the flowering and maturity stage of cultivation. For determine the occurrence sites, was used the reflectance limit of the band analyzed from each crop. The spectral signatures report variations whom depend of physiology

* Fecha de recepción : 3 de Abril de 1999

Fecha de aceptación: 21 de Junio de 1999

and morphology characteristic and management of cultivation according to phenological stage. The results from classified images to the make comparison with the field verify, indicated that the prediction realized to type of cover level (corn) was effective in 100%; with concerning to the seed used, the prediction was effective in 54.1%; in the population density the prediction subestimated in 1.6%; with concerning to yield grain, the prediction showed a overestimation from 6.9%. At last, the discriminant analysis determined that is possible anticipate the type of seed used in the occurrence sites of corn, with a probability from 63.1%.

Index words: Remote sensing, Landsat-TM, spectral signature, pixel, corn (*Zea mays L.*), yield.

INTRODUCCION

La observación remota desde satélites cuenta con numerosas aplicaciones, gracias a las ventajas que ofrece frente a otros medios más convencionales como la fotografía aérea o los trabajos de campo, aunque más que sustituirlos los complementa adecuadamente, destacan las siguientes: cobertura global y periódica de la superficie terrestre, proporciona una visión amplia de los fenómenos geográficos que se producen en la tierra, y facilita imágenes sobre áreas no accesibles, así como información sobre regiones no visibles del espectro por el ojo humano.

Un sensor remoto depende de las diferencias espectrales observadas en la energía reflejada o emitida de alguna cobertura de interés. El conocimiento detallado de un modelo de respuesta espectral, permite la identificación de rasgos de interés y la separación de tipos de cultivos, bosques y otras coberturas. El concepto de firma espectral se define como "todo objeto en la naturaleza posee una distribución única de radiación reflejada, emitida y absorbida. Estas características espectrales pueden ser usadas para distinguir un objeto de otro, o para obtener información acerca de su forma, tamaño y otras propiedades físicas y químicas" (Campbell, 1996). Mediante la firma espectral es posible lograr la expresión de un objeto sobre una imagen, y a través de ella permite conocer el objeto. Las firmas espectrales están afectadas por las características del objeto que originan su interacción con la energía electromagnética, y son distintas según las longitudes de onda (Soria *et*

al., 1998). El conocimiento detallado de un patrón de respuesta espectral, puede permitir la identificación de clases o coberturas de interés y la separación de éstas. Las firmas espectrales tienen diversas aplicaciones entre las que destacan: la realización de inventarios y censos de recursos, así como el monitoreo y determinación del estado de dichos recursos (Meritano *et al.*, 1980); la planeación para el desarrollo integral, regional o nacional, mediante el procesamiento gráfico y numérico de las firmas espectrales (Melesio-Nolasco, 1991); estudios sobre la contaminación del agua (Rodríguez *et al.*, 1992) y el monitoreo del desarrollo de cultivos a través de las medidas espectrales (Watts y Saiz, 1996).

La predicción de rendimientos por medio de imágenes de satélite, está relacionada con la capacidad para identificar las especies de cultivos, así como ciertas variables agronómicas: madurez, densidad de población, vigor y enfermedades, las cuales son útiles como indicadores de rendimiento. En los países en desarrollo las parcelas son pequeñas y de forma irregular, por lo que numerosos cultivos tienen una respuesta espectral similar. En tal circunstancia, una sola imagen de satélite (una toma) no provee datos útiles para propósitos de identificación de cultivos y menos para la predicción de rendimiento (National Academic of Sciences, 1977). Por ello es importante usar más de una imagen para estos fines.

La identificación de cultivos y la medición de la superficie son solamente una etapa en el proceso, la otra es la predicción y estimación del rendimiento. Al respecto, Mass (1988) menciona que la información proveniente de los sensores remotos, como los satélites, complementa el trabajo de los modelos de crecimiento de cultivos. Por su parte, Cipra *et al.* (1980) estimaron la producción de forraje en praderas irrigadas mediante el análisis de datos digitales del satélite Landsat, concluyen que esta práctica es factible; no obstante, los resultados serán más confiables si los datos de campo se colectan cada año.

La literatura especializada en el tema reseña escasos trabajos enfocados a la determinación de áreas de cultivos y la estimación de los rendimientos; sin embargo, los que se reportan fueron desarrollados en condiciones distintas a las del país. Por ello, en México existe la necesidad y el interés de organismos privados

y dependencias de gobierno relacionadas con el sector agrícola, de contar con metodologías confiables y económicamente factibles que permitan determinar el uso actual del suelo, así como los rendimientos que se espera de los cultivos de importancia económica. El objetivo de la presente investigación fue, determinar la reflectancia espectral del maíz en dos etapas fenológicas a través de firmas espectrales obtenidas de imágenes de satélite Landsat-TM y con ello, identificar y cuantificar sitios de ocurrencia y realizar estimaciones de rendimiento.

MATERIALES Y METODOS

Area de estudio. El trabajo de investigación se efectuó en el área de influencia del Distrito de Desarrollo Rural (DDR) 05 de Cortázar, Guanajuato, México, ubicado entre los paralelos 20° 23' y 20° 30' de latitud norte y los meridianos 100° 58' y 101° 06'. Abarca parcialmente los municipios de Jaral del Progreso, Valle de Santiago, Salamanca y Cortázar, Guanajuato, en una superficie de 15,840 hectáreas. Se seleccionó el cultivo del maíz debido a su importancia económica y social. Los trabajos de campo se desarrollaron durante el ciclo agrícola primavera-verano de 1997.

Imágenes de satélite utilizadas. Se adquirieron dos escenas del satélite Landsat-TM en presentación CD-ROM y formato digital BSQ orientada a mapa, con corrección de sistema y proyección UTM correspondiente a la zona 14, con tamaño de pixel de 25 m. Esta adquisición se efectuó a través del proveedor mundial *EOSAT*, cuyas escenas fueron del 3 de agosto

y 27 de septiembre de 1997, las cuales coinciden con las etapas de floración y madurez del maíz, respectivamente.

Elaboración de máscara digital. Una vez georreferenciada el área de estudio se procedió a la elaboración de una máscara digital en formato vectorial, con el objeto de delimitar la zona de estudio y georreferenciar algunos rasgos sobresalientes. Este procedimiento se realizó con apoyo de un Sistema de Información Geográfica (SIG).

Recopilación y análisis de información. Se llevó a cabo un análisis de la información recopilada, la cual cubrió los aspectos siguientes: a) sistemas de producción de maíz de riego que incluyó: genotipo (asgrow o ceres), densidad de siembra, arreglo topológico, insumos utilizados y rendimientos obtenidos de una serie histórica de seis años. Esta información la proporcionaron los agricultores cooperantes involucrados en el área de estudio; b) caracterización climática diaria de una serie histórica de 40 años, y c) modelo de elevación digital para cada 90 m de longitud.

Selección de parcelas piloto. Una vez delimitada y caracterizada el área de estudio, se procedió a la selección de parcelas piloto representativas de los sistemas de producción de maíz bajo riego (Cuadro 1), las cuales se utilizaron como campos de entrenamiento.

Geocorrección de imágenes. Con el apoyo de un SIG y como paso previo para el análisis, las imágenes originales del Landsat-TM se corrigieron geoméricamente basadas en puntos de control, como

Cuadro 1. Características de las parcelas piloto representativas de los sistemas de producción de maíz de riego en el área de estudio.

Parcela	Genotipo (compañía)	Fecha de siembra	Densidad de población (plantas.ha ⁻¹)	Ciclo vegetativo	Superficie (ha)	Rendimiento (ton.ha ⁻¹)
1	Ceres	28/04/97	95,000	Intermedio	1.5	14.8
2	Asgrow	17/04/97	51,000	Tardío	2.0	14.3
3	Ceres	06/06/97	70,000	Intermedio	2.0	7.6
4	Asgrow	23/04/97	62,000	Intermedio	2.4	12.9
5	Asgrow	20/04/97	71,700	Tardío	3.7	15.4
6	Asgrow	18/04/97	114,000	Tardío	3.0	18.1

un procedimiento habitual para imágenes espaciales de alta resolución y áreas con relieve plano (Chuvieco, 1996). De las imágenes completas de las dos fechas citadas, se realizaron recortes de las bandas TM2, TM3 y TM4 para obtener sólo la ventana del área de estudio.

Determinación de las firmas espectrales. Las bandas espectrales del sensor Landsat-TM más relacionadas con la vegetación son las siguientes: TM2 (verde, 0.52-0.60 μm), ya que evalúa el vigor de la planta; TM3 (rojo, 0.63-0.69 μm), la cual permite la detección de clorofila y la discriminación de tipos de plantas, y TM4 (infrarrojo cercano, 0.76-0.90 μm), funciona como un indicador de la estructura celular de las plantas y de la biomasa. Los argumentos anteriores justificaron el uso de estas bandas, razón por la que en ambas escenas se obtuvo el porcentaje de reflectancia de cada uno de los píxeles que conformaron las parcelas piloto de maíz en las bandas TM2, TM3 y TM4. Tales porcentajes corresponden al valor medio de reflectancia con desviación estándar ($\bar{x} \pm s$), así como los límites superior e inferior de reflectancia (LC) del conjunto de observaciones (píxeles) involucrados en cada parcela piloto.

Sitios de ocurrencia y estimación de rendimientos. Mediante la caracterización espectral previa de las parcelas piloto (campos de entrenamiento) y utilizando el método supervisado para cada banda y escena, con apoyo de un SIG se procedió a determinar los sitios de ocurrencia de maíz similares a las parcelas piloto y en consecuencia, del rendimiento probable de dichos sitios de acuerdo con la reflectancia espectral de cada parcela piloto (promedio con desviación estándar y límites de clase). Posteriormente se procedió a cuantificar la superficie ocupada por cada clase en ambas etapas fenológicas. Por último se efectuó una sobreposición de las imágenes generadas en las fases de floración y madurez fisiológica, cuyas áreas de coincidencia (intersección) se consideraron como las definitivas.

Comprobación de resultados. La predicción de sitios de ocurrencia de maíz realizada en gabinete por firma espectral, se contrastó con la obtenida en campo a través de entrevistas a los agricultores propietarios de las parcelas ubicadas en los píxeles muestreados (cuatro repeticiones o píxeles por clase) para conseguir información sobre la especie cultivada, genotipo

utilizado, densidad de población y rendimientos de maíz. Finalmente se definió el porcentaje de subestimación y/o sobrestimación de la predicción *versus* lo obtenido en la verificación de campo.

Anticipación de las predicciones. Mediante un análisis discriminante se determinó el nivel de precisión de la primera fecha anticipada (escena del 3 de agosto) para la predicción de maíz a nivel de genotipo (asgrow o cereales).

RESULTADOS Y DISCUSION

Caracterización espectral de parcelas piloto. En el Cuadro 2 se describe las firmas espectrales promedio, producto de los valores de los píxeles de las parcelas piloto de maíz. Como se aprecia, los valores de reflectancia en cada banda son distintos entre coberturas y entre fechas de toma de las escenas (3 de agosto y 27 de septiembre). Esta variabilidad con bajos valores de reflectancia en el espectro visible y más elevados en el infrarrojo cercano se debe a que cada elemento de la firma espectral (energía absorbida, reflejada, transmitida, etc.) es el resultado de la estructura y geometría de las hojas, contenido de líquidos, densidad de población y en general de las características genotípicas y fenotípicas de cada parcela. Cada elemento de la firma espectral corresponde a la absorbancia o reflectancia de algún pigmento o proceso fisiológico de la planta. En este caso, se presenta un incremento de reflectancia en la banda TM3 y una disminución en la TM4 al pasar de un período a otro.

El comportamiento espectral de los cultivos y particularmente del maíz, se relaciona con la acción de los pigmentos fotosintéticos y del agua que las hojas almacenan. La baja reflectancia en la porción visible del espectro se debe al efecto absorbente de los pigmentos de las hojas, principalmente la clorofila, la xantofila y los carotenos. Melesio-Nolasco (1991) menciona que algunas curvas de reflectancia o firma espectral tienden a presentar una respuesta uniforme en distintas longitudes de onda, mientras otras como el caso de los cultivos agrícolas, ofrecen un comportamiento más selectivo.

Los rangos de reflectancia a nivel de límite superior e inferior (LC, límites de clase), así como del valor medio

Cuadro 2. Firmas espectrales promedio de maíces híbridos de riego obtenidas a partir de imágenes del satélite Landsat-TM.

Parcela	Compañía (Genotipo)	Densidad de población (plantas.ha ⁻¹)	Reflectancia (%)					
			Escena del 97/08/03			Escena del 97/09/27		
			TM2	TM3	TM4	TM2	TM3	TM4
1	Ceres	95,000	24	19	128	28	26	94
2	Asgrow	51,000	27	21	110	32	30	94
3	Ceres	70,000	29	21	139	31	30	97
4	Asgrow	62,000	29	26	99	30	29	92
5	Asgrow	71,700	26	20	134	25	23	98
6	Asgrow	114,000	28	24	114	28	27	86
	Promedio híbridos		27	22	121	29	28	94

Donde: TM2 = banda 2, TM3 = banda 3 y TM4 = banda 4.

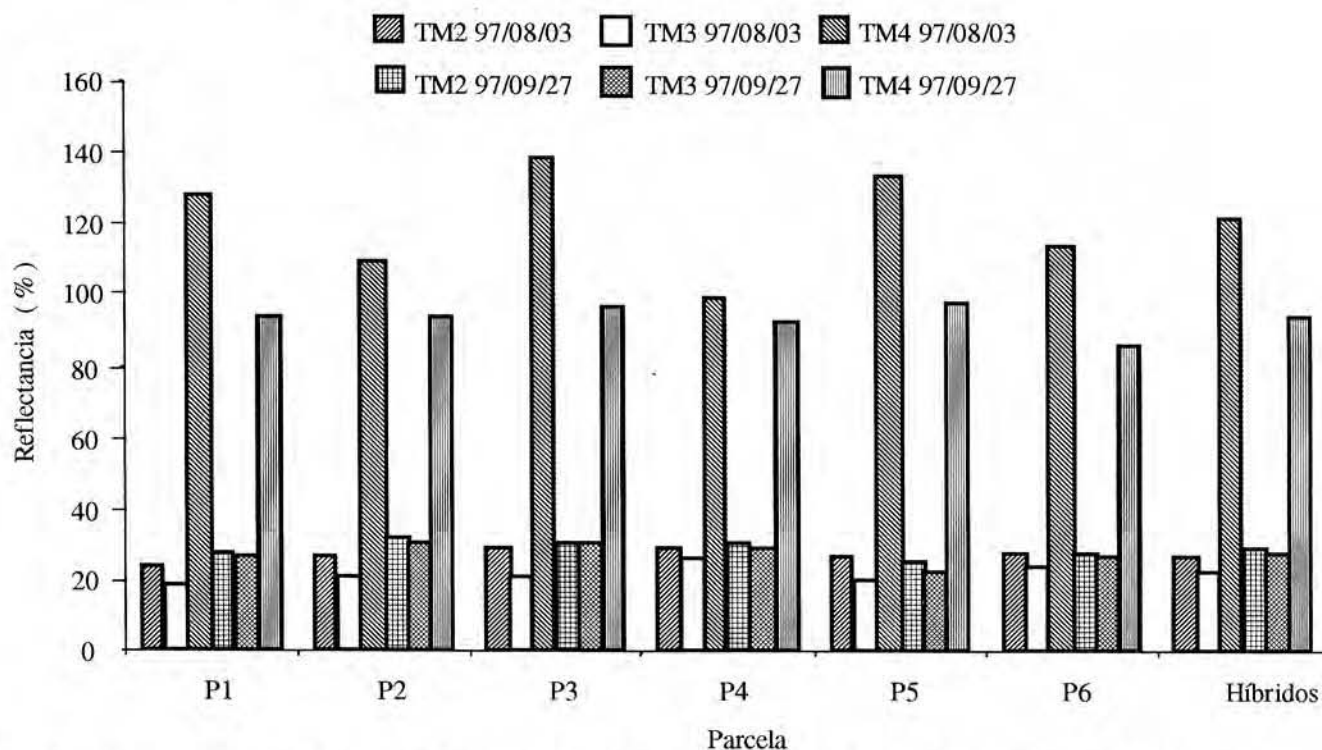


Figura 1. Comportamiento espectral promedio del maíz de riego en floración y madurez fisiológica.

con desviación estándar ($x \pm s$) se indican en el Cuadro 3. Los rangos de valores por LC se utilizaron para generar los sitios de ocurrencia de maíz en el área de estudio en las dos fechas de las escenas analizadas (3 de agosto y 27 de septiembre).

Determinación de sitios de ocurrencia. A partir de los rangos de valores de reflectancia por LC descritos en el Cuadro 3, se obtuvieron los sitios de ocurrencia

similares a cada parcela piloto de maíz en ambas escenas. Como se observa en el Cuadro 4, al realizar la sobreposición y traslape de las imágenes clasificadas de cada parcela para la determinación de áreas de ocurrencia de maíz en general, la escena del 3 de agosto muestra valores superiores ($LC = 7,193.6$ ha) al comparar con los resultados de la correspondiente al 27 de septiembre ($LC = 3,603.2$ ha). Como se señaló en párrafos anteriores, esta variación se debe a la acción

Cuadro 3. Rangos de reflectancia de las bandas visible e infrarroja para maíz de riego en dos escenas del satélite Landsat-TM.

Parc.	n	Reflectancia (%)											
		Escena del 97/08/03						Escena del 97/09/27					
		Banda TM2		Banda TM3		Banda TM4		Banda TM2		Banda TM3		Banda TM4	
LC	x±s	LC	x±s	LC	x±s	LC	x±s	LC	x±s	LC	x±s		
1	11	23-27	23-25	17-22	17-20	115-133	123-133	26-29	27-28	24-27	25-26	87- 99	90- 97
2	15	25-31	26-28	20-23	20-23	101-114	106-113	30-33	31-32	28-32	29-32	92- 97	92- 95
3	14	28-31	28-30	20-26	19-23	108-150	128-149	30-32	30-31	28-31	29-31	89- 99	94-100
4	10	28-30	28-30	22-30	23-29	87-112	92-106	28-31	29-31	28-31	28-30	86- 96	90- 95
5	36	24-29	25-27	19-24	19-22	121-141	129-139	24-26	24-26	23-24	23-24	95-102	96- 99
6	28	28-32	27-29	22-29	22-27	99-129	106-121	27-29	27-28	26-29	27-28	81- 90	84- 88

Donde: n = pixeles observados, LC=límites de reflectancia de la clase, x±s = valor medio de reflectancia con desviación estándar

de los pigmentos fotosintéticos y del agua que las hojas almacenan, y como consecuencia dá variaciones de reflectancia de la etapa fenológica de floración a la de madurez fisiológica.

Para amortiguar la variación de las áreas de ocurrencia en las dos fechas analizadas en el Cuadro 4, las imágenes clasificadas de ambas fueron sobrepuestas y las superficies de traslape se asumieron como los sitios definitivos de ocurrencia de maíz. Los resultados se indican en el Cuadro 5, donde se advierte que por límites de reflectancia de las clases (LC), las parcelas 1 y 6 dominan la superficie de siembra con 151.5 y 102.8 hectáreas, respectivamente, por su parte la 2 y 5 reportan los valores más bajos, siendo éstos de 7.3

Cuadro 4. Superficie de los sitios de ocurrencia de maíz de riego obtenidas por firma espectral.

Parcela	Superficie (ha)	
	Escena del 97/08/03 LC	Escena del 97/09/27 LC
1	1,114.8	1,674.6
2	365.9	288.2
3	2,389.6	318.3
4	783.2	1,136.4
5	3,466.3	27.9
6	2,239.6	666.9
Traslape	7,193.6	3,603.2

Area de estudio: 15,840 ha; Donde: LC = límites de reflectancia superior e inferior de la clase

hectáreas cada una. Finalmente, la superficie de ocurrencia de maíz en general para el total del área de estudio fue de 1,856 hectáreas, producto del traslape de 7,193.6 de la escena 3 de agosto y de 3,603.2 de la del 27 de septiembre (Cuadro 4).

Conviene destacar que para la determinación de sitios de ocurrencia, en el análisis temporal de imágenes se debe utilizar como mínimo dos escenas que coincidan con cualquiera de las etapas fenológicas del cultivo, cuyos resultados ofrecerán mayor grado de confiabilidad. Lo anterior para amortiguar variaciones de reflectancias que emite el mismo cultivo en etapas fenológicas diferentes. La Figura 2 corresponde a una imagen clasificada que muestra las zonas de ocurrencia

Cuadro 5. Superficie de los sitios de ocurrencia de maíces híbridos de riego, traslape de dos fechas, obtenida por límites de reflectancias de las clases (LC).

Parcela	Superficie (ha)
	Traslape de las escenas: 97/08/03 y 97/09/27
1	151.5
2	7.3
3	67.9
4	53.5
5	7.3
6	102.8
Traslape	1,856.0

Area de estudio: 15,840 ha

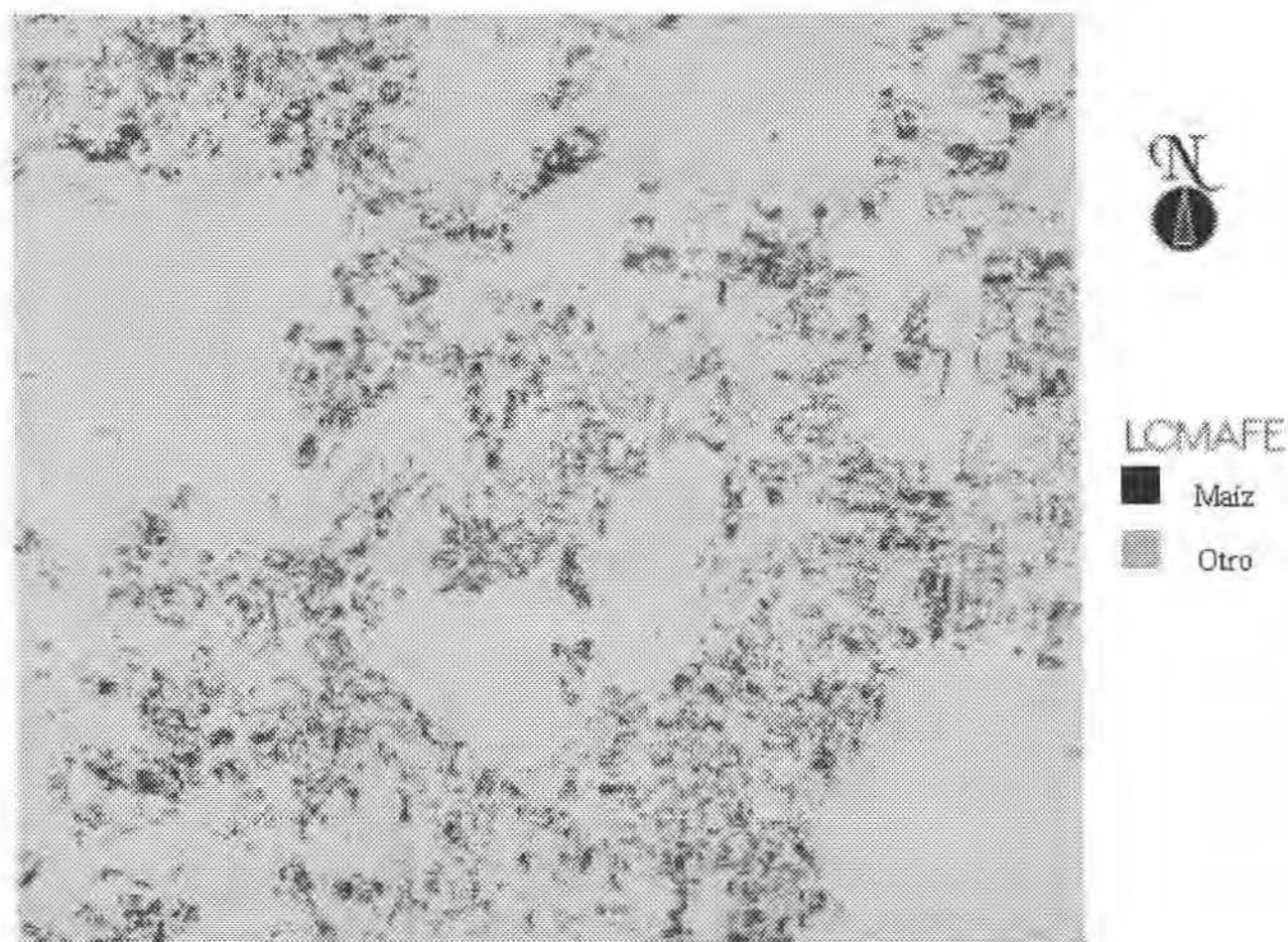


Figura 2. Zonas de ocurrencia de maíz por límites de reflectancia (LC), producto del análisis de dos escenas y seis parcelas piloto de maíz.

de maíz, producto de la sobreposición y traslape de las seis parcelas y dos escenas analizadas a partir de los límites de reflectancias de las bandas TM2, TM3 y TM4 de las clases (LC), cuya superficie en el área de estudio fue de 1,856 hectáreas.

Comprobación de resultados. Para verificar los resultados, en cada imagen clasificada se tomaron al azar cuatro píxeles (repeticiones) con su referencia geográfica respectiva, y se comprobó mediante verificación de campo. El Cuadro 6 muestra la efectividad de la predicción del maíz a partir de firma espectral.

El promedio general producto de los valores medios de cada clase del Cuadro 6 indican lo siguiente: a) las predicciones a nivel de tipo de cobertura (maíz), se

cumplieron en 100 %; b) a nivel de nombre de genotipo (asgrowo ceres), en 54.1 %; c) con lo referente a la densidad de población, al comparar el valor de 77,283 plantas.ha⁻¹ promedio de las seis parcelas contra el general de 78,500 plantas.ha⁻¹, la predicción mostró una subestimación de 1.6 % con respecto al valor obtenido en campo; d) en cuanto al rendimiento de grano, al confrontar el valor medio pronosticado de 13.8 ton.ha⁻¹ de las seis parcelas de maíz contra 12.9 ton.ha⁻¹ obtenidas en el campo, el rendimiento anticipado reportó una sobrestimación de 6.9 % en relación con el registrado en la verificación de campo.

Por otra parte, el rendimiento estimado de 13.8 ton.ha⁻¹ al multiplicarlo con las 1,856 ha determinadas por LC del Cuadro 5, se esperaría una producción de 25,613 ton de grano en el área de estudio. Sin embargo, al

Cuadro 6. Predicción de maíz a partir de firma espectral mediante el análisis de dos escenas Landsat-TM.

Predicción a partir de Firma espectral				<i>Versus</i>	Información de campo (descripción del productor)			
Nombre de la imagen clasificada	Repetición	Pixel C/R	LC		Cultivo	Compañía	DP (ptas.ha ⁻¹)	Rendimiento (ton.ha ⁻¹)
LC1FE	1	442/304	P1	Maíz	Asgrow	85,000	12.0	
	2	349/444	P1	Maíz	Ceres	90,000	12.0	
	3	357/496	P1	Maíz	Asgrow	90,000	12.0	
	4	60/373	P1	Maíz	Ceres	95,000	14.0	
LC2FE	1	172/18	P2	Maíz	Asgrow	70,000	10.0	
	2	264/370	P2	Maíz	Correa	65,000	10.0	
	3	155/236	P2	Maíz	Correa	70,000	12.0	
	4	39/93	P2	Maíz	Asgrow	65,000	12.0	
LC3FE	1	439/14	P3	Maíz	Ceres	80,000	12.0	
	2	396/353	P3	Maíz	Asgrow	85,000	14.0	
	3	186/393	P3	Maíz	Correa	70,000	12.0	
	4	9/487	P3	Maíz	Ceres	65,000	10.0	
LC4FE	1	390/139	P4	Maíz	Asgrow	65,000	12.0	
	2	380/138	P4	Maíz	Asgrow	75,000	14.0	
	3	104/277	P4	Maíz	Ceres	70,000	13.0	
	4	73/284	P4	Maíz	Asgrow	70,000	12.0	
LC5FE	1	503/178	P5	Maíz	Correa	85,000	14.0	
	2	508/211	P5	Maíz	Asgrow	70,000	14.0	
	3	294/460	P5	Maíz	Asgrow	75,000	15.0	
	4	145/280	P5	Maíz	Ceres	70,000	13.0	
LC6FE	1	475/80	P6	Maíz	Asgrow	90,000	15.0	
	2	307/535	P6	Maíz	Asgrow	105,000	17.0	
	3	168/288	P6	Maíz	Ceres	95,000	15.0	
	4	147/34	P6	Maíz	Correa	85,000	14.0	
				100 %	54.1 %	78,500	12.9	

Parcelas piloto:

P1 = Maíz Ceres	95,000	plantas.ha ⁻¹	(14.8 ton.ha ⁻¹)
P2 = Maíz Asgrow	51,000	plantas.ha ⁻¹	(14.3 ton.ha ⁻¹)
P3 = Maíz Ceres	70,000	plantas.ha ⁻¹	(7.6 ton.ha ⁻¹)
P4 = Maíz Asgrow	62,000	plantas.ha ⁻¹	(12.9 ton.ha ⁻¹)
P5 = Maíz Asgrow	71,700	plantas.ha ⁻¹	(15.4 ton.ha ⁻¹)
P6 = Maíz Asgrow	114,000	plantas.ha ⁻¹	(18.1 ton.ha ⁻¹)
promedio:	77,283	plantas.ha ⁻¹	13.8 ton.ha ⁻¹

comparar con las 33,540 ton reales (producto de las 12.9 ton.ha⁻¹ y 2,600 ha), la producción estimada con respecto al valor real sólo representa el 76.3%

Anticipación de las predicciones. Se definió el nivel de precisión de la primera fecha de anticipación (escena del 3 de agosto) para la predicción de maíz a nivel de genotipo (asgrow-ceres u otro). A partir de la información del Cuadro 6 obtenida mediante verificación de campo se realizó un análisis discriminante, el cual se fundamenta en imitar una

clasificación preestablecida. Por ello, a las repeticiones con genotipos asgrow o ceres se le asignó el número 1 y las que no corresponden a estas semillas el 2. Los valores de reflectancia de las bandas TM2, TM3 y TM4 de los píxeles muestreados del Cuadro 6 se utilizaron para efectuar el análisis discriminante. Los resultados indicaron que de 24 píxeles que conforman el tamaño de la muestra, 19 píxeles corresponden a genotipos asgrow o ceres, y 5 a otros. Con la clasificación preestablecida, de estos 19, el análisis discriminante determinó para la primera fecha de anticipación que 12

coinciden con asgrow o ceres, es decir, cumplen con el pronóstico en 63.1%. En tanto los otros 5, tres satisfacen la predicción en 60%. La clasificación de resultados para la primera fecha de anticipación (3 de agosto) y el modelo que explica la función discriminante no estandarizada (FD), se muestra en el Cuadro 7.

CONCLUSIONES

1. Como consecuencia de los valores de reflectancia de las bandas visibles e infrarroja, las firmas espectrales presentan variaciones que dependen de las características fisiológicas y morfológicas de las plantas, así como de manejo de las parcelas según la etapa fenológica del cultivo.
2. En la predicción promedio general de las seis parcelas piloto se obtuvo lo siguiente: a) a nivel de tipo de cobertura (maíz), fue efectiva en 100%; b) a nivel de nombre de la compañía productora de la semilla (asgrow o ceres), en 54.1%; c) con lo referente a la densidad de población, al comparar en valor de 77,283 plantas.ha⁻¹ promedio de las seis parcelas contra el promedio general de las muestreadas de 78,500 plantas.ha⁻¹, se reportó una subestimación de 1.6% con respecto al valor medio obtenido en campo, y d) en relación con el rendimiento de grano, el valor predicho reportó una sobrestimación de 6.9% de acuerdo con el alcanzado en el campo.
3. El análisis discriminante indicó que desde la primera fecha de análisis (escena del 3 de agosto) es posible anticipar sitios de ocurrencia de maíz a nivel de genotipo, con una probabilidad de 63.1%.

4. La producción evaluada de maíz, producto de la estimación de superficies de siembra y rendimiento de grano, mostró que por firma espectral se obtiene un valor de 76% con respecto a la producción real.
5. En México los sistemas de producción de cultivos son variados y en su mayoría caracterizados por ser de minifundio. Este método se presenta como una alternativa en la determinación de áreas de siembra y la predicción de rendimiento de cultivos.

LITERATURA CITADA

- Campbell, J.B. 1996. Introduction to Remote Sensing. Second ed. Virginia Polytechnic Institute and State University. The Guilford Press, New York, USA. 622 p.
- Cipra, J., N.E. Noguera, M.C. Bryson and M.A. Lueking. 1980. Forage production estimates for irrigated meadows from Landsat data. *Agronomy Journal* 72:5. Pp: 793-796.
- Mass S. J. 1988. Using satellite data to improve model estimates of crops yields. *Agron. J.* 80: 655-662.
- Melesio-Nolasco, S. 1991. Bases teóricas de la percepción remota. Apuntes del curso "Satélites y agricultura: el ejemplo Spot". In: Sorani, V., L. Cajuste y E. Ojeda (ed). P. 2-19. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México.
- Meritano, J., J. Altamirano, M. Rebollar, S. Melesio-Nolasco, J. Navarro y F. Rodriguez. 1980. Estudio prospectivo sobre abastecimiento y uso de agua en el Altiplano de México. PIMADI/IPN-Conacyt. México, D.F. México. 97 p.

Cuadro 7. Clasificación de resultados para la primera fecha de anticipación.

Grupo actual	Grupo predicho				Total	
	Grupo 1		Grupo 2			
1 (asgrow o ceres)	12	63.1%	7	36.8%	19	100%
2 (otras semillas)	2	40.0%	3	60.0%	5	100%

$$FD = - 0.23 (TM2 \text{ del } 3 \text{ de agosto}) + 0.12 (TM3 \text{ del } 3 \text{ de agosto}) + 0.07 (TM4 \text{ del } 3 \text{ de agosto}) - 5.18$$

Correlación canónica = 32.0%

Regla de decisión: Si $FD > 0.23$ es 1 (Asgrow o Ceres)

Si $FD < 0.23$ es 2 (otros genotipos)

Donde: TM2 = % de reflectancia de la banda 2, TM3 = % de reflectancia de la banda 3 y TM4 = % de reflectancia de la banda 4.

- National Academic of Sciences. 1977. Resource Sensing from Space: prospects for developing countries. Washington, D.C. USA. 202 p.
- Rodríguez, B.D., B. Bennett y R. Neville. 1992. Contaminación ambiental y el uso de tecnología de observación terrestre. *In*: Resúmenes de la III Reunión Nacional Selper. Guaymas, Sonora, México.
- Soria, R.J., C.A. Ortiz S., F. Islas G. y V. Volke H. 1998. Sensores Remotos: principios y aplicaciones en la evaluación de los recursos naturales. Experiencias en México. Publicación Especial 7. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Chapingo, México. 93 p.
- Watts, C. y J.A. Saiz. 1996. Monitoreo del desarrollo del trigo en el Valle del Yaqui, Sonora, usando

imágenes NOAA-AVHRR. *Investigaciones Geográficas* 33:51-61.

AGRADECIMIENTOS

A los campesinos y a los productores de maíz que desde el alba hasta la puesta del sol, a través de generaciones siguen leales en la siembra de este grano, legado de México para el mundo. De igual manera se hace patente el agradecimiento al CONACyT por financiar el proyecto de investigación K277-A9702, del cual este artículo forma parte.