

5. RESULTADOS DEL PROCESAMIENTO DE IMÁGENES DEL LAGO DE CHAPALA

De las imágenes crudas obtenidas del United States Geological Survey (USGS), se obtuvo una ventana cuya área incluye el cuerpo de estudio. El área de estudio está definida por las siguientes coordenadas UTM, Datum WGS-84.

Mín. X 652293.75 Máx. X 743815.38

Mín. Y 2221957.1 Máx. Y 2278560.75

5.1 CÁLCULO ESTADÍSTICO UNIVARIADO DE LOS DATOS CRUDOS

En la tabla 5.1 se resume el análisis estadístico realizado a las imágenes satelitales de las diferentes fechas de estudio obtenido del cálculo estadístico de la totalidad de las observaciones.

Tabla 5.1. Análisis estadístico de la información original satelital.

BANDA	MINIMO VB*	MAXIMO VB*	MEDIA	DESVIACION ESTANDAR	VARIANZA
2002mayo					
banda ETM1	68	255	107.559	13.424	180.20
banda ETM2	49	255	93.937	16.885	285.1
banda ETM3	42	255	110.042	25.887	670.14
banda ETM4	20	255	66.733	21.159	447.70
banda ETM5	10	255	123.694	49.304	2430.88
banda ETM7	3	255	93.165	37.149	1380.05
2002noviembre					
banda ETM1	41	255	63.905	10.666	113.76
banda ETM2	24	255	53.314	12.103	146.48
banda ETM3	16	255	52.787	16.521	272.94
banda ETM4	10	159	49.877	16.928	286.56
banda ETM5	3	255	69.038	30.501	930.31
banda ETM7	2	255	44.639	21.041	442.72

*VB valor de brillo

Para la obtención de los píxeles oscuros se analizó la banda ETM7, ya que esta banda espectral es la menos influenciada por efectos atmosféricos y la mayoría de los aerosoles, realizando una reclasificación de valores de brillo con la finalidad de obtener una máscara que permita la extracción de información de píxeles negros en todas las bandas espectrales. El criterio de reclasificación fue el mostrado en la Tabla 5.2

Tabla 5.2 Criterio de selección de píxeles oscuros en la escena en estudio

FECHA	INTERVALO DE VALORES "DN" ASUMIDOS COMO PÍXELES NEGROS
MAYO 2002	0-8
NOVIEMBRE 2002	0-7

La máscara de píxeles negros en la que se basa la regresión lineal para la extracción del efecto atmosférico a través de la cuantificación de la ordenada al origen, se muestra en la figura 5.1.

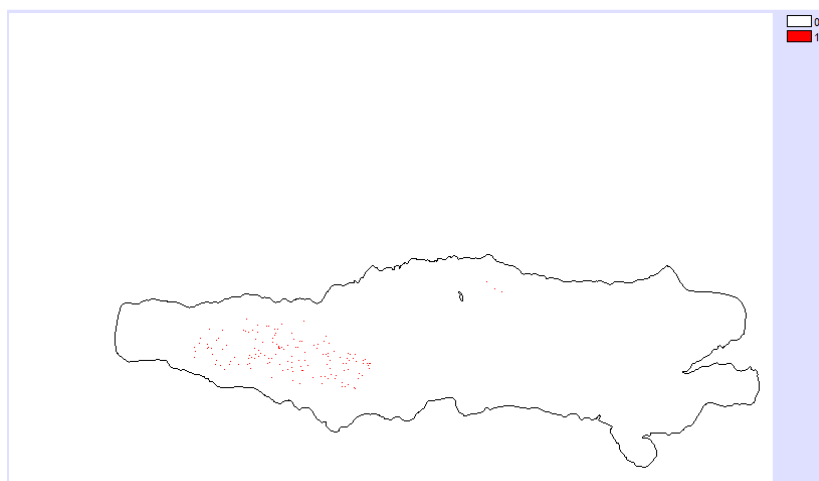


Figura 5.1 Mascara de píxeles negros del mes de mayo 2002

El resultado de aplicar el método de regresión lineal a la máscara obtenida para los meses de mayo y noviembre de 2002 se resume en la Tabla 5.3. Dicho resultado se obtuvo de la extracción de datos de BV y de su análisis con el programa *Statistica* versión 6.0

Tabla 5.3. Valores de la ordenada al origen obtenidos de los modelos matemáticos.

REGRESIÓN LINEAL ENTRE BANDAS.	ORDENADA AL ORIGEN
Mayo 2002	
ETM7/ETM1	111
ETM7/ETM2	96
ETM7/ETM3	91
ETM7/ETM4	24
ETM7/ETM5	15
Noviembre 2002	
ETM7/ETM1	78
ETM7/ETM2	69
ETM7/ETM3	70
ETM7/ETM4	19
ETM7/ETM5	10

5.2 REALCE ESPECTRAL

Realizando un nuevo cálculo estadístico de los datos que conforman la escena se obtiene la Tabla 5.4, mientras que en la Tabla 5.5 se muestra la matriz de correlación de las bandas espectrales no térmicas del sensor ETM+

Tabla 5.4 Análisis estadístico de la información sin efecto atmosférico y reclasificada.

BANDA	MINIMO BV*	MAXIMO BV*	MEDIA	DESVIACION ESTANDAR	VARIANZA
2002mayo					
banda ETM1	0	144	3.654	8.446	71.335
banda ETM2	0	159	5.547	11.139	124.077
banda ETM3	0	164	20.977	23.689	561.1687
banda ETM4	0	231	42.738	21.138	446.815
banda ETM5	0	240	108.710	49.243	2424.873
banda ETM7	0	252	90.165	37.149	1380.048
2002noviembre					
banda ETM1	0	177	0.795	4.336	18.801
banda ETM2	0	186	0.875	4.875	23.766
banda ETM3	0	185	1.628	7.293	53.188
banda ETM4	0	140	31.062	16.570	274.565
banda ETM5	0	245	59.057	30.374	922.58
banda ETM7	0	253	42.639	21.041	442.724

Tabla 5.5 Matriz de correlación de coeficiente de Pearson de las bandas espectrales de mayo y noviembre2002

COR MATRX	20020503_b10	20020503_b20	20020503_b30	20020503_b40	20020503_b50	20020503_b70
20020503_b10	1					
20020503_b20	0.968244	1				
20020503_b30	0.828637	0.902083	1			
20020503_b40	0.343836	0.427977	0.635495	1		
20020503_b50	0.316825	0.422163	0.678967	0.915714	1	
20020503_b70	0.436912	0.519732	0.738637	0.87429	0.976098	1
COR MATRX	20021111_b10	20021111_b20	20021111_b30	20021111_b40	20021111_b50	20021111_b70
20021111_b10	1					
20021111_b20	0.829017	1				
20021111_b30	0.674589	0.841501	1			
20021111_b40	-0.022027	0.004802	0.056331	1		
20021111_b50	-0.038685	-0.025062	0.022737	0.839574	1	
20021111_b70	0.128394	0.12653	0.14487	0.771154	0.962092	1

Tabla 5.6 Resumen del comportamiento estadístico de los datos corregidos atmosféricamente

Mes	MAYOR VARIANZA	MENOR VARIANZA	ALTA CORRELACIÓN	BAJA CORRELACIÓN
Mayo 2002	ETM5	ETM1	ETM2 y ETM1 ETM3 y ETM2 ETM5 y ETM4 ETM5 y ETM4	ETM1 y ETM5
Noviembre 2002	ETM5	ETM1	ETM5 y ETM7	ETM1 Y ETM4

5.2.1 COCIENTES DE BANDAS

MAYO 2002.

Para la vegetación acuática, detectada como pigmentos de clorofila, la banda de absorción se presenta en $0.68 \mu\text{m}$, en la parte roja del espectro visible, en tanto el principal rasgo de reflexión se encuentra en la región del infrarrojo cercano. Con base en lo anterior se propuso el cociente $\text{ETM4}/\text{ETM3}$ donde se presenta el mayor contraste de la respuesta espectral de pigmentos de clorofila. El resultado se muestra en tonos brillantes en la figura 5.2

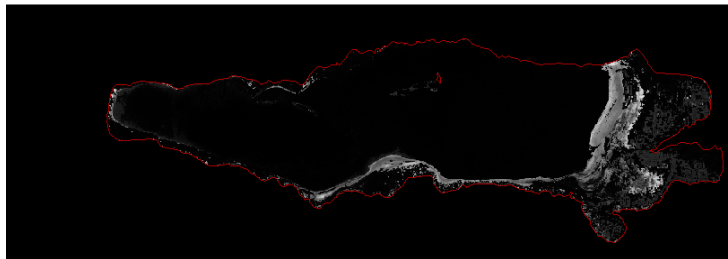


Figura 5.2 Cociente $\text{ETM4}/\text{ETM3}$ donde en tonos brillantes se representa la contribución de pigmentos de clorofila en el área que ocupa el lago de Chapala.

Para los sedimentos en suspensión o material suspendido se propone $\text{ETM3}/\text{ETM1}$ para sedimentos rojos (ver Figura 5.3) al cual se agregará el cociente $\text{ETM3}/\text{ETM7}$ para incluir sedimentos arcillosos cuya característica de absorción se presenta en la banda ETM7 con la finalidad de mapear la mayor parte de los sedimentos en suspensión presentes en el cuerpo de agua

La imagen resultante del cociente $\text{ETM3}/\text{ETM7}$ se muestra en la Figura 5.4 donde se observa que la respuesta espectral dominante del cuerpo de agua corresponde a sedimentos cuyo origen son materiales con una alta absorbancia en la región del IRM ($2.2 \mu\text{m}$). Se observa en la parte occidental (recuadro) del cuerpo de agua una zona con contribuciones de este tipo de material suspendido.

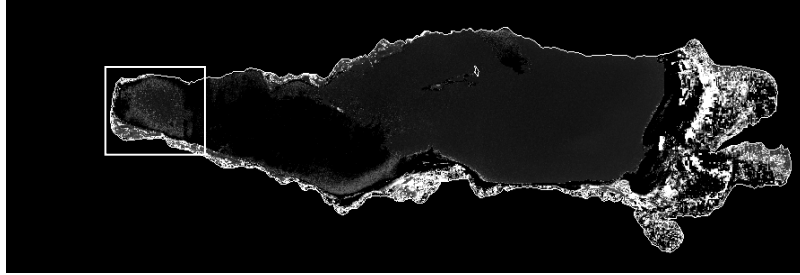


Figura 5.3 Cociente $ETM3/ETM1$ que mapea materiales suspendidos provenientes de materiales en cuya estructura se encuentra el hierro. Dicha contribución se presenta en tonos brillantes.

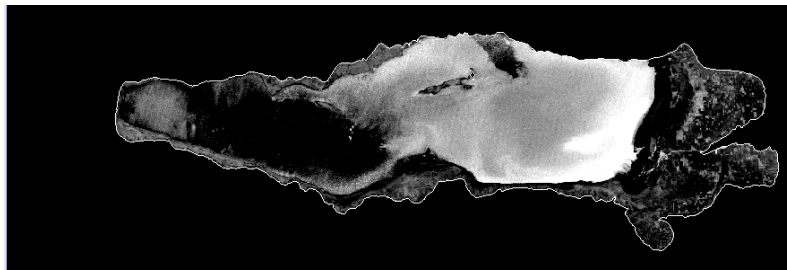


Figura 5.4 Resultado del cociente $ETM3/ETM7$ que abarca sedimentos arcillosos considerando la alta absorción de energía que presenta en la banda $ETM7$. Los tonos brillantes indican la contribución de materiales que corresponden a material en suspensión de origen arcilloso.

La suma de los cocientes propuestos para mapear sedimentos suspendidos de diferentes orígenes ($ETM3/ETM1$, $ETM3/ETM7$), se muestran en la Figura 5.5. Los tonos brillantes indican que la escena está dominada por la respuesta espectral de sedimentos en suspensión.

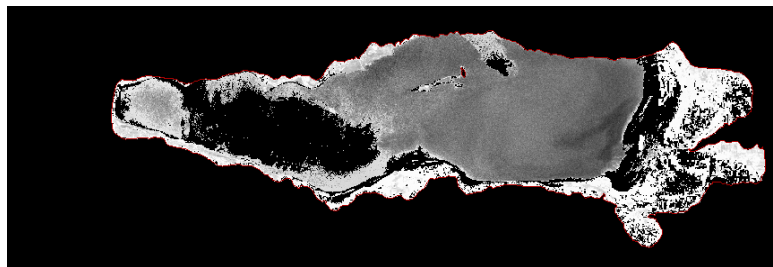


Figura 5.5 En tonos brillantes está representada la contribución de materiales suspendidos en el cuerpo de agua.

NOVIEMBRE 2002

El mapeo de pigmentos de clorofila se realizó con la obtención del cociente de bandas $ETM4/ETM3$ cuyo resultado se muestra en la Figura 5.6

En la Figura 5.7 el cociente $ETM3/ETM1$, donde se presentan las principales características de reflectancia y absorbancia en materiales con contenidos de hierro (óxidos de hierro) muestra una fuerte contribución sobre el cuerpo de agua en su ribera sur y parte de la ciénega. Los sedimentos rojos en este cociente se observan en tonos grises

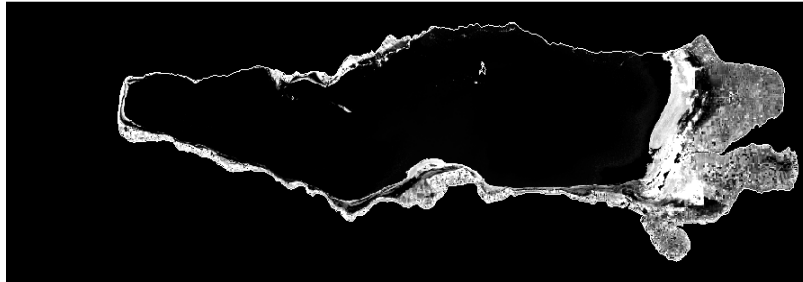


Figura 5.6 Resultado del cociente $ETM4/ETM3$. En tonos brillantes están representadas las zonas con pigmentos de clorofila.

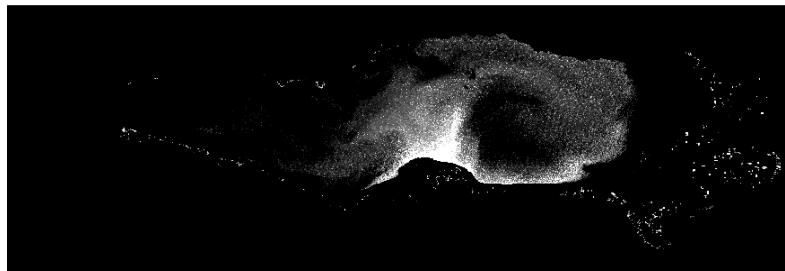


Figura 5.7. Resultado del cociente $ETM3/ETM1$ propuesto para identificar sedimentos suspendidos provenientes de materiales en cuya estructura se encuentra el hierro. La contribución de dichos materiales se observa en tonos brillantes.

El cociente $ETM3/ETM7$ se propone para identificar material suspendido proveniente de materiales de tipo arcilloso cuya característica de absorción se presenta en la banda $ETM7$ con la finalidad de mapear la mayor parte de los sedimentos en suspensión presentes en el cuerpo de agua. El resultado se muestra en la Figura 5.8 donde los tonos brillantes muestran la contribución de este tipo de material.

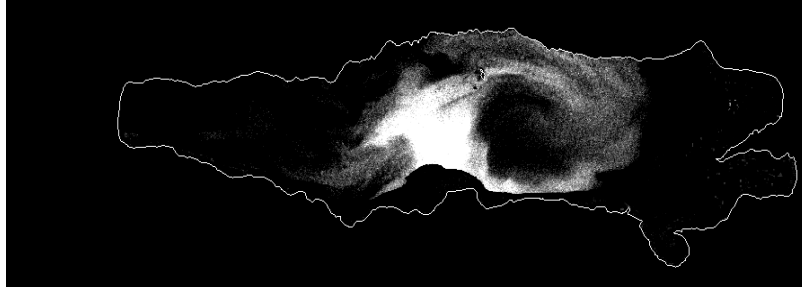


Figura 5.8 El cociente $ETM3/ETM7$ muestra la presencia de material suspendido con características espectrales de absorción correspondientes a materiales arcillosos.

La contribución total de los sedimentos suspendidos en el cuerpo de agua se observa en el resultado de sumar los cocientes propuestos para mapear sedimentos suspendidos de diferentes orígenes ($ETM3/ETM1$, $ETM3/ETM7$), La figura 5.9 muestra en tonos brillantes las áreas cubiertas de material suspendido.

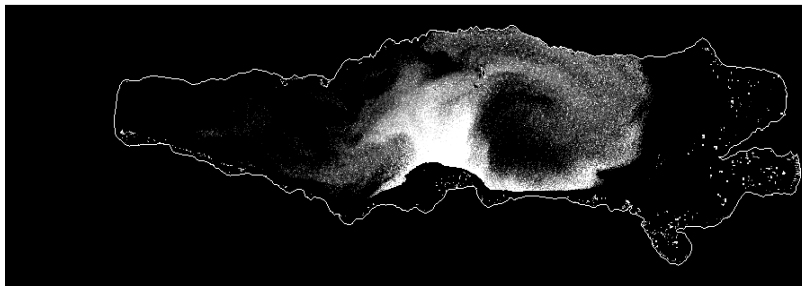


Figura 5.9 En tonos brillantes está representada la contribución de materiales suspendidos en el cuerpo de agua.

5.2.2 INDICE DE VEGETACION DIFERENCIAL NORMALIZADO (NDVI)

MAYO 2002

Para visualizar la presencia de vegetación acuática en el cuerpo de agua se aplicó NDVI a la escena, lo que indicará las zonas dominadas por vegetación acuática como lirio acuático (*Eichhornia crassipes*), tule (*Typha latifolia*), entre otras especies de vegetación. El NDVI está basado en la firma espectral de la clorofila lo que tiene por consecuencia indicar zonas donde existen pigmentos de clorofila dentro del cuerpo de agua.

La Figura 5.10 muestra el NDVI obtenido de las bandas ETM3 y ETM4 de acuerdo a la respuesta espectral de la vegetación. El rango de valores del índice es de -1 a 1 donde -1 indica que no hay presencia de pigmentos de clorofila mientras que 1 indica la presencia de pigmentos de clorofila.



Figura 5.10 Índice de vegetación diferencial normalizado, donde -1 indica nula presencia de vegetación y 1 presencia de vegetación vigorosa. Los valores entre 0 y 1 indican presencia de pigmentos de clorofila. La zona enmarcada muestra la única zona donde existen píxeles donde el NDVI es -1

NOVIEMBRE 2002

El NDVI obtenido para el mes de noviembre de 2002 se despliega en la Figura 5.11 donde se observan grandes áreas con ausencia de pigmentos de clorofila. La zona oriental del cuerpo de agua muestra fuertes contribuciones de pigmentos de clorofila. La zona occidental tiene en su mayor parte valores cercanos a cero lo que indica que la reflectancia en las bandas ETM4 y ETM3 es similar lo que lleva a un valor de cero de NDVI. Las zonas con valores negativos se concentran en la parte central del cuerpo de agua.

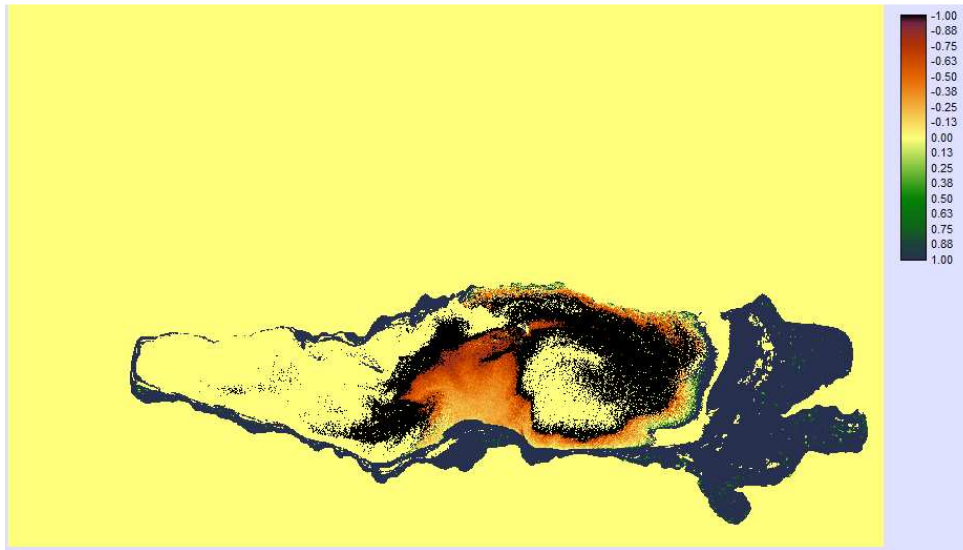


Figura 5.11 NDVI del mes de noviembre.

5.2.3 COMPOSICION A COLOR

MAYO 2002

Las bandas espectrales que contienen los rasgos característicos de alta reflectancia de los materiales de interés son ETM4 (pigmentos de clorofila), y ETM3 (sedimentos suspendidos). Estas bandas se encuentran en la región del IRC por lo que se propone una composición en falso color en el sistema RGB-431 que se muestra en la Figura 5.12

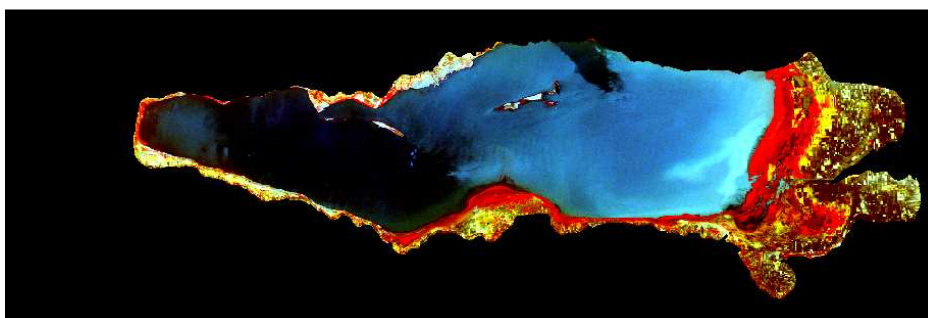


Figura 5.12 Composición en falso color RGB-431. En tonos de rojo se visualiza vegetación.

La composición 431 despliega en tonos de rojo la contribución de vegetación visualizado como pigmentos de clorofila, la parte occidental del lago presenta contribuciones de pigmentos de clorofila, la baja intensidad indica que las concentraciones son menores que en la parte oriente del

cuerpo de agua. Los tonos de amarillo son resultado de la contribución de vegetación más sedimentos y/o suelo con contenidos de hierro. Los tonos marrones son debidos a vegetación estresada por lo que se asume que la zona con estos tonos son zonas desecadas del lago. Los colores azulados presentan una contribución de sedimentos y vegetación siendo la zona más brillante (azul-verdoso) la que supera en contribución de sedimentos a la contribución de pigmentos de clorofila. Las zonas oscuras presentan mínima contribución de pigmentos de clorofila y sedimentos en general.

NOVIEMBRE 2002

En la Figura 5.13 se muestra la composición en falso color RGB-431 que muestra fuertes contribuciones de pigmentos de clorofila en las riberas del cuerpo de agua, así como en la parte oriental del mismo. En la zona marcada por el recuadro se observan tonos verdes que indican fuertes contribuciones de sedimentos suspendidos. Los tonos azules muestran una mínima reflectancia de material suspendido en el cuerpo de agua, en la banda ETM1 los tonos verdes azulados muestran mayores contribuciones de éste material.

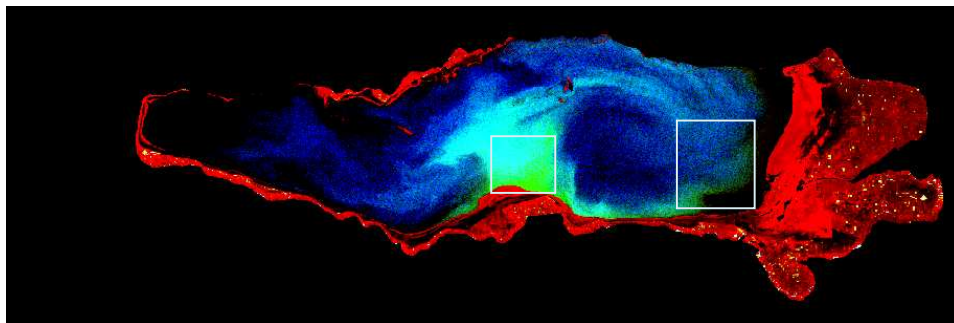


Figura 5.13 Composición en falso color RGB-431 del mes de noviembre 2002. Enmarcados se encuentran las más fuertes contribuciones de sedimentos rojos.

5.2.4 TÉCNICA DE CROSTA O ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES ORIENTADAS (ACPO)

Permite seleccionar las bandas espectrales que contienen la mayor información de los materiales de interés contenidos en el área de estudio.

El PCA se aplicó para las seis bandas del sensor ETM+ no térmicas (la pancromática no es de interés para el presente estudio). El análisis estadístico se muestra en la Tabla 5.7 en donde se ve que la mayor varianza de los datos se encuentra en la primera componente y disminuye hacia las

últimas componentes. En la primera componente se encuentra la información que es común en las 6 bandas ETM, es decir, la topografía y el albedo. Para la información de vegetación obtenida a partir de la banda ETM4 la componente PC3 es la que tiene una mayor información sobre esta banda. Para el caso de sedimentos suspendidos ninguna componente proporcionó información útil para el caso de estudio.

Para el mapeo de pigmentos de clorofila y sedimentos suspendidos se seleccionaron las bandas ETM2, ETM3, ETM4 y ETM5, se eliminó la banda ETM1 porque es la más influenciada por el efecto atmosférico y la 7 debido a que es donde las propiedades ópticas del agua se ven fuertemente influenciadas por la gran absorción que presenta en la región del IRM. El análisis estadístico resumido en la Tabla 5.8 muestra la información obtenida para el mes de mayo. Se observa que el material que puede mapearse con el resultado del análisis estadístico son los pigmentos de clorofila, por lo que ACPO con 4 bandas no proporciona un mejor realce que ACPO con seis bandas como se muestra en la Tabla 5.8

Tabla 5.7 Análisis de componentes principales de 6 bandas ETM del área del lago de Chapala. Eigenvalores y matriz de cargas.

COMPONENT	C 1	C 2	C 3	C 4	C 5	C 6
% var.	92.919616	4.092845	2.278257	0.571798	0.121494	0.015995
eigenval.	1505.86831	66.329222	36.921753	9.266642	1.968951	0.25921
LOADING	C 1	C 2	C 3	C 4	C 5	C 6
20020503_b10	0.399018	0.849827	0.177622	0.174462	0.216224	0.099449
20020503_b20	0.494965	0.824675	0.175302	0.038131	0.18795	-0.085749
20020503_b30	0.730577	0.655654	0.109433	-0.137765	-0.073482	0.004021
20020503_b40	0.926689	-0.112593	0.354451	0.053044	-0.011071	-0.000759
20020503_b50	0.994342	-0.078626	-0.031335	-0.062415	0.014941	0.001118
20020503_b70	0.988344	0.05988	-0.111305	0.083682	-0.014038	-0.001375

Tabla 5.8 Análisis de componentes principales orientadas con cuatro bandas.

COMPONENT	C 1	C 2	C 3	C 4
% var.	92.144944	5.071449	2.640588	0.143013
eigenval.	996.722705	54.85736	28.562978	1.546962
LOADING	C 1	C 2	C 3	C 4
20020503_b20	0.472215	0.837025	0.087395	0.262226
20020503_b30	0.715661	0.695375	-0.01176	-0.064381
20020503_b40	0.946031	-0.054667	0.319416	-0.003489
20020503_b50	0.99491	-0.048724	-0.08814	0.003196

NOVIEMBRE 2002

El análisis de PCA que se muestra en la Tabla 5.9 muestra que la PC1 contiene el 92.23% de la varianza total de los datos, presenta altas cargas de información contenida en la región del IR y contiene toda la información de topografía. En la PC2 con el 5% de la varianza total de los datos, la banda ETM4 es la mayor aportadora de información por lo que en ella se mapea la información de pigmentos de clorofila en el cuerpo de agua. La PC3 contiene la información de la región del visible. La PC4 con el 46% de la varianza total de los datos tiene una fuerte contribución de la banda ETM3 que contiene la información de sedimentos suspendidos provenientes de materiales con contenidos de fierro, ver Figura 5.17. La PC5 y PC6 contienen la mínima varianza de la totalidad de los datos por lo que la información contenida es mínima o nula.

Tabla 5.9 Análisis de componentes principales con seis bandas no térmicas del sensor ETM (noviembre, 2002)

COMPONENT	C 1	C 2	C 3	C 4	C 5	C 6
% var.	92.237895	5.625079	1.57633	0.464973	0.075671	0.020049
eigenval.	416.957141	25.42791	7.125726	2.101887	0.342066	0.090631
LOADING	C 1	C 2	C 3	C 4	C 5	C 6
20021111_b10	0.011886	-0.147695	0.78105	0.193528	0.549137	-0.171707
20021111_b20	0.024126	-0.110462	0.813081	0.399586	0.275506	0.300246
20021111_b30	0.065782	-0.068558	0.781283	0.603267	-0.125038	-0.03122
20021111_b40	0.879175	0.473232	0.052896	-0.017402	-0.000912	0.000004
20021111_b50	0.9936	-0.060611	-0.087817	0.036911	0.003573	-0.000059
20021111_b70	0.970665	-0.190865	0.132854	-0.060734	-0.006137	0.000134

MAYO 2002

En la Figura 5.14 se muestra la componente principal 3 (PC3) obtenida de la aplicación de la técnica de Crosta con cuatro bandas que contiene la mayor información de pigmentos de clorofila.

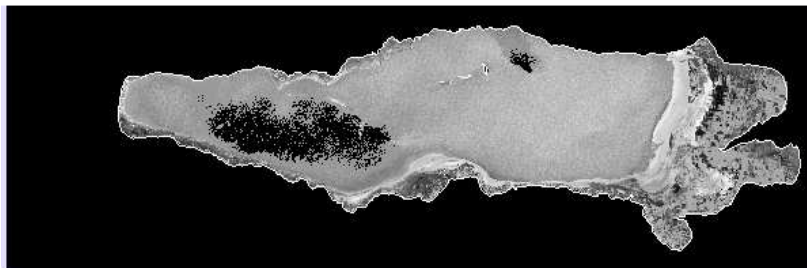


Figura 5.14. Componente principal PC3. En tonos brillantes se observa la contribución de clorofila en el lago de Chapala

NOVIEMBRE 2002

En las figuras 5.15 y 5.16 se muestran los resultados de la técnica de Crosta para seis y cuatro bandas

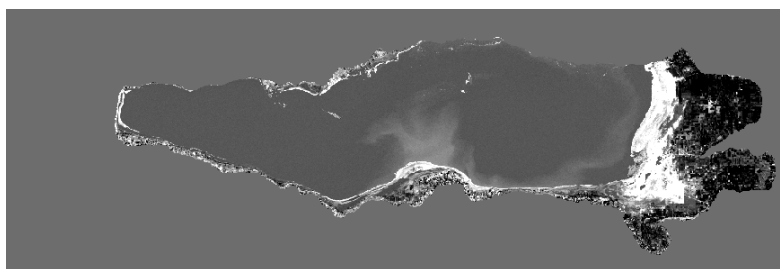


Figura 5.15 Componente principal 2 que muestra los pigmentos de clorofila en tonos brillantes.

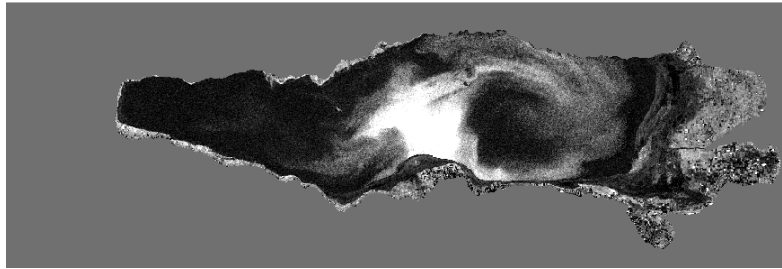


Figura 5.16 Componente principal 4, proporciona información de sedimentos suspendidos

En las dos fechas de estudio los píxeles oscuros se determinaron en la región del IR donde el efecto atmosférico es mínimo.

5.3 REALCE ESPACIAL

5.3.1 DELIMITACIÓN DE CUERPOS DE AGUA

Un realce de gradiente direccional con orientaciones E-W y N-S, se propuso para el realce de bordes del lago de Chapala. Estas máscaras se proponen dada la orientación preferencial que presenta el cuerpo en estudio: Este –Oeste. Se suman gradientes NE y SW para mejorar la obtención de bordes. En virtud de la complejidad de la respuesta espectral que presenta el cuerpo de agua en estudio por las altas cargas de sedimentos en superficie, las áreas cubiertas con pigmentos de clorofila y zonas de cultivo en la parte Este de lago, se requiere de un detallado criterio para la obtención del área que ocupa el cuerpo de agua. En la Figura 5.17 se muestra el resultado de sumar la información que arrojaron las aplicaciones de las diferentes máscaras de gradiente direccional. Para los bordes Oeste y Sur la aplicación de las máscaras de gradiente direccional fue satisfactoria. Para el caso del borde norte del lago, sus límites coinciden con los datos vectoriales de hidrología superficial, lo que resuelve el débil resultado de la aplicación de máscaras.

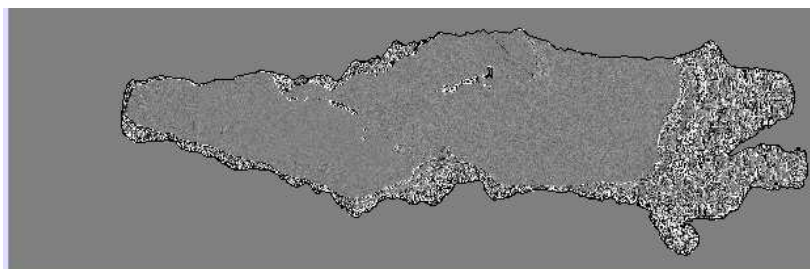


Figura 5.17 Resultado de aplicar realce espacial.

En la parte Este del lago de Chapala se encuentra el área denominada Ciénega de Chapala además de ser la parte por donde el principal afluente del lago, el río Lerma, desemboca. Ambos factores contribuyen a la complejidad (Figura 5.18) que presenta el bordo Este del cuerpo de agua ya que la aplicación de la técnica de gradientes direccionales no permitió la identificación de los límites en esta zona. Por esta razón se propuso aplicar la técnica descrita en Campbell (2002), donde se propone delinear áreas inundadas a través del uso de las regiones espectrales del 0.5- 0.6 μm (ETM2) por las fuertes contribuciones de sedimentos en suspensión y la región del IRC e IRM (ETM5 ó ETM7) por la alta absorbancia que presentan los cuerpos de agua. La técnica compara los BV entre IR y el visible (0.5-0.6 μm) de dos diferentes fechas.

$$\frac{ETM2(\text{sin inundar}) - ETM 5 \text{ ó } ETM7(\text{inundado ó sin inundar})}{ETM2(\text{sin inundar})}$$

Esta relación se basa en considerar que la respuesta espectral del suelo es similar en la región del visible (ETM2) y en la región del IR (ETM5 ó ETM7) por lo que en el caso de que un determinado píxel corresponda a suelo seco, la relación propuesta resulta en cero, mientras que si se trata de una zona inundada el cociente será uno. Por ejemplo, si la tierra seca tiene valores cercanos a 35 en ambas bandas, entonces para áreas inundadas la relación es $(35-0)/35=1$ y para áreas sin inundar $(35-35)/35=0$.

El principal problema que se presenta en esta técnica es cuando la alta concentración de sedimentos no permite que haya un contraste entre ambas regiones espectrales de tal forma que la técnica permita la separación de áreas inundadas de no inundadas. El resultado del análisis de la técnica aplicada se muestra en la Figura 5.19 como una reclasificación de la información. (Se consideraron ambas fechas: mayo y noviembre).

Finalmente se consideró el análisis a detalle de la zona de interés, es decir el bordo Este mostrado en la Figura 5.20

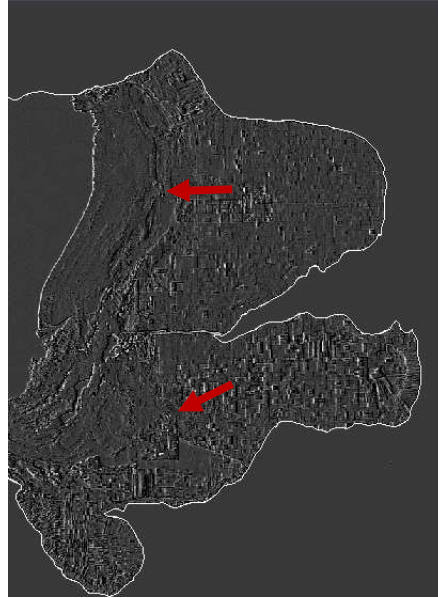


Figura 5.18 Detalle del borde Este del lago de Chapala. Las flechas señalan las áreas con difícil identificación de bordes.

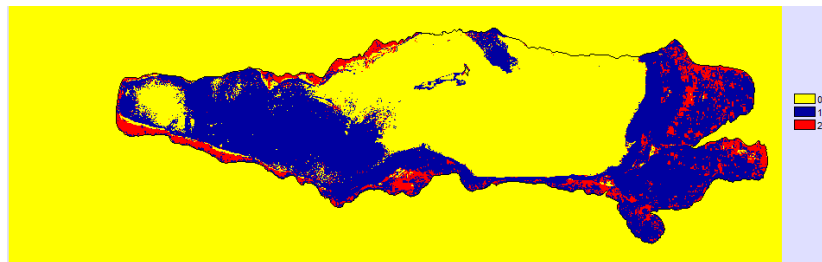


Figura 5.19 Resultado del análisis de la técnica descrita en Campbell (2002).

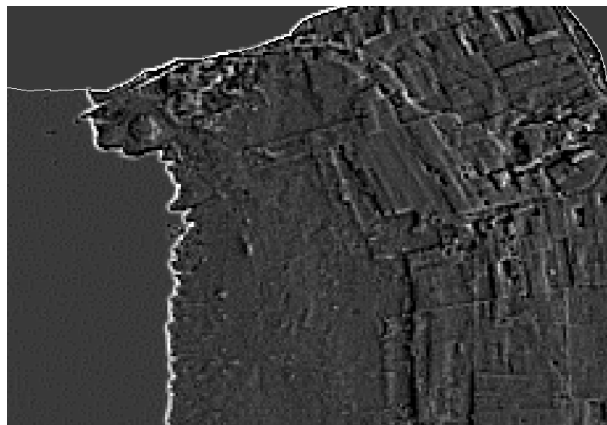


Figura 5.20 Detalle de la zona de Este del lago Chapala. Se observan límites definidos, característicos de zonas de cultivo.

El resultado de aplicar la técnica para delimitar cuerpos de agua con áreas inundadas y no inundadas, descrita en Campbell (2002), agregada a un análisis visual de las formas geométricas en el área ubicada al Este y que corresponde a la ciénega de Chapala, así como la aplicación de filtros de gradiente diferencial se muestra en la figura 5.21, donde los polígonos en color rosa corresponden al cuerpo de agua.

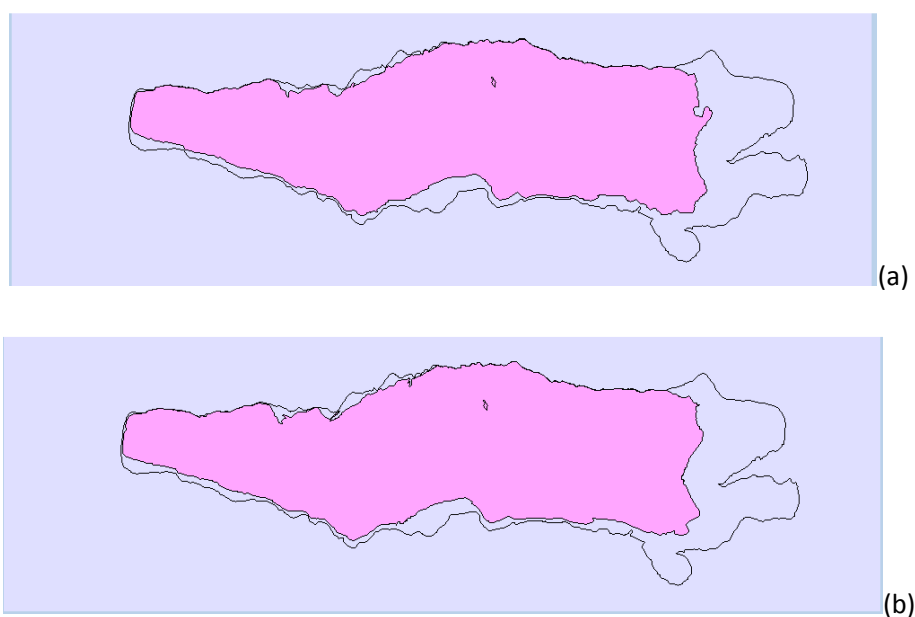


Figura 5.21 Polígonos que delimitan en color rosa el cuerpo de agua, (a) mayo, (b) noviembre.

Las áreas obtenidas a partir de la delimitación del cuerpo de agua son las siguientes:

MAYO 2002

COBERTURA	ÁREA Km ²
No Dato	4332.82
Cuerpo de agua	846.99

NOVIEMBRE 2002

COBERTURA	ÁREA Km ²
No Dato	4331.53
Cuerpo de agua	848.28

5.4 CLASIFICACION SUPERVISADA.

Para la extracción de información temática se realizaron polígonos de entrenamiento para las fechas en estudio, mayo y noviembre, con base en la identificación de los diferentes materiales que dominan la respuesta espectral del lago de Chapala. Las firmas espectrales obtenidas tras la creación de los polígonos de entrenamiento se presentan a continuación. En la Figura 5.23 y 5.22 se muestran las firmas espectrales obtenidas de la identificación de 4 y 3 clases respectivamente:

Agua baja turbidez

- a) Pigmentos de clorofilas
- b) Sedimentos suspendidos
- c) Sedimentos alta absorbanza IR

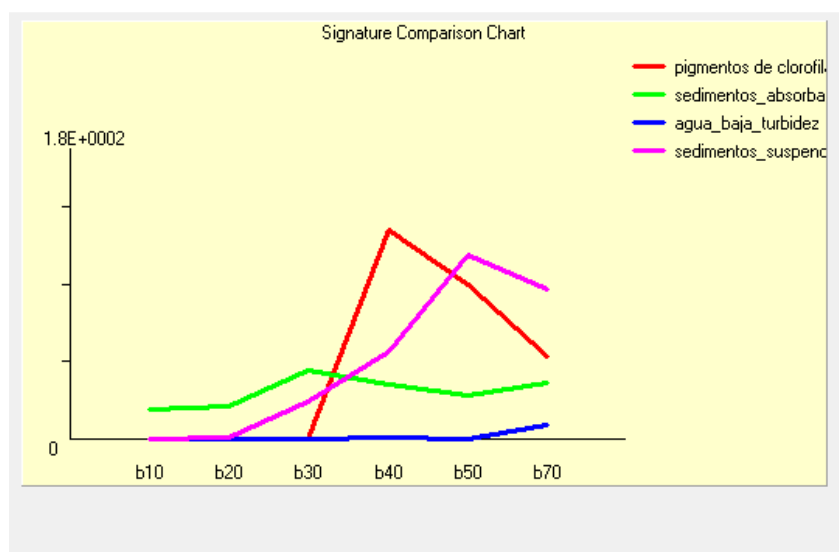


Figura 5.22 Firmas espectrales que caracterizan las tres clases que se identificaron para el mes de mayo.

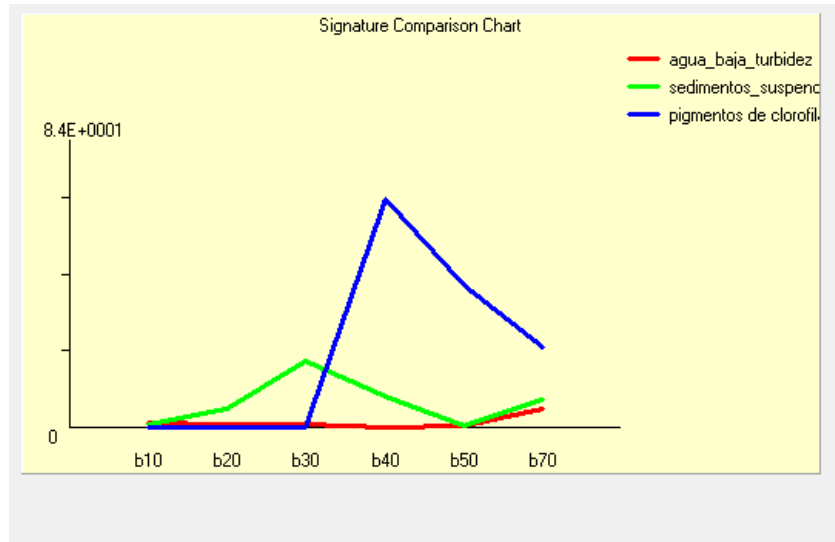


Figura 5.23 Firmas espectrales que caracterizan las tres clases que se identificaron para el mes de noviembre

Se utilizó un clasificador de máxima probabilidad ya que este considera la media, desviación estándar y la probabilidad de que ese píxel pertenezca a cierta clase. Cada píxel en la imagen fue clasificado dentro de una de las clases identificadas.

Los polígonos de entrenamiento obtenidos de la identificación con base en firmas espectrales teóricas contienen características espectrales que a su vez fueron los datos de entrada para el proceso de clasificación de máxima probabilidad y mínima distancia. Las imágenes obtenidas tras el proceso se despliegan en las Figuras 5.24 y 5.25 para los meses de mayo y noviembre de 2002 respectivamente.

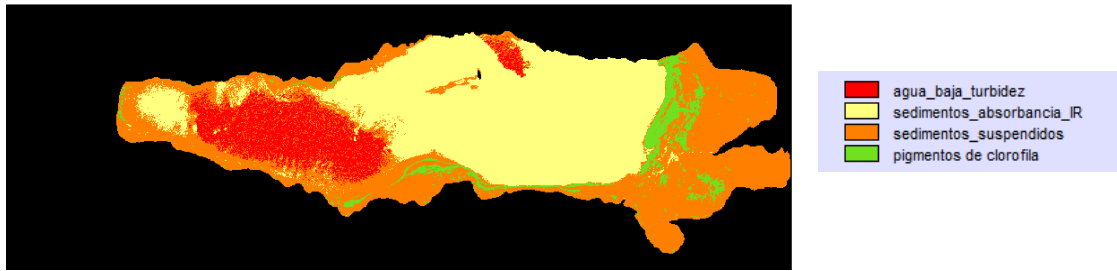


Figura 5.24 Mapa temático de materiales que dominan la respuesta espectral en el lago de Chapala para el mes de mayo de 2002

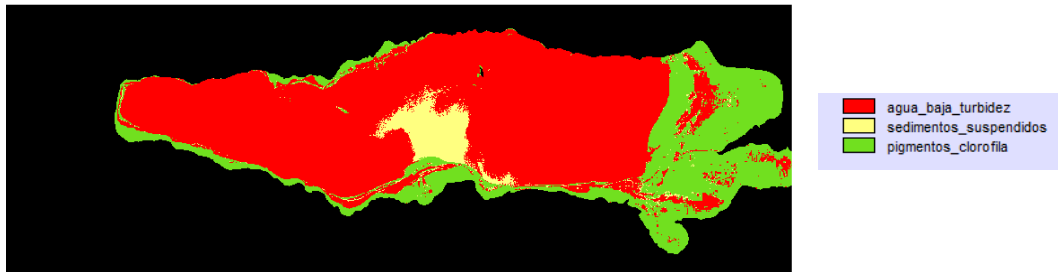


Figura 5.25 Mapa temático de materiales que dominan la respuesta espectral en el lago de Chapala para el mes de noviembre de 2002

Aplicando la máscara que delimita el cuerpo de agua, permitió la obtención de áreas que ocupa cada material identificado en la superficie del Lago de Chapala. En la Figura 2.26 se despliega la información temática aplicando la máscara obtenida para la delimitación del cuerpo de agua.

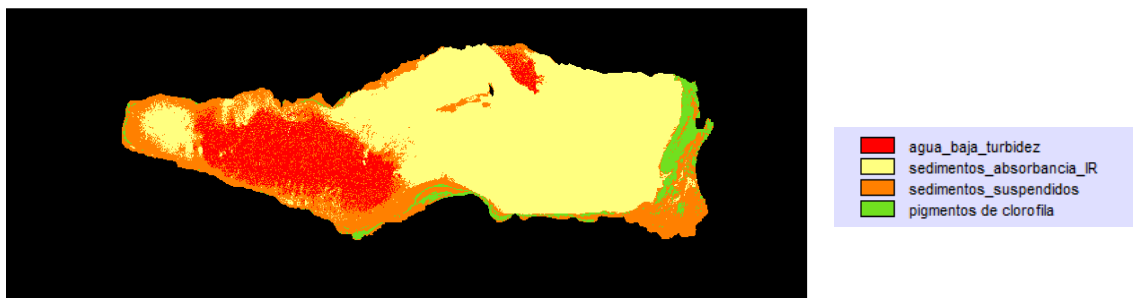


Figura 5.26 Información temática aplicando la máscara obtenida para delimitar el cuerpo de agua en mayo

Áreas obtenidas para las diferentes clases identificadas en el mes de Mayo

CLASE	ÁREA Km ²
agua_baja_turbidez	121.3038
sedimentos_absorbancia_IR	489.4281
sedimentos suspendidos	198.9963
pigmentos de clorofila	36.7155

La Figura 5.27 muestra el mapa temático de la distribución de materiales identificados en el mes de noviembre aplicando la máscara que delimita el cuerpo de agua.

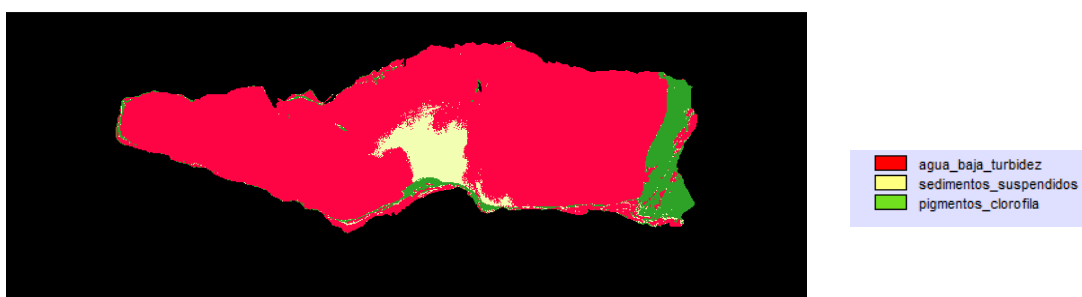


Figura 5.27 Información temática aplicando la máscara obtenida para delimitar el cuerpo de agua en noviembre.

Áreas obtenidas para las diferentes clases identificadas en el mes de Noviembre

CLASE	ÁREA Km ²
agua_baja_turbidez	721.2
sedimentos suspendidos	57.74
pigmentos de clorofila	68.98

5.5 ESTUDIO DE CAMBIO DE LOS MATERIALES IDENTIFICADOS EN EL LAGO DE CHAPALA DE MAYO A NOVIEMBRE 2002.

Una vez obtenidas las clasificaciones para las fechas en estudio se tiene material suficiente para evaluar el cambio de los materiales identificados en la superficie del lago de Chapala del mes de mayo a noviembre del mismo año. La obtención de dichos patrones se realizó mediante un análisis de sustracción. El código de colores utilizado para el análisis de cambio de mayo a noviembre es el siguiente:

- Negro presencia del material en mes de noviembre e inexistencia en mayo
- Amarillo paja presencia del material en ambas fechas.
- Magenta ausencia del material en el mes de noviembre y presencia en el mes de mayo

Por lo tanto el análisis de cambio indicará existencia, inexistencia o permanencia del material sobre el cuerpo de agua.

Para el material identificado como agua con baja turbidez (mínima presencia de material suspendido), el análisis de cambio indicó que las zonas en color negro fueron zonas donde en el mes de mayo no había presencia de agua con baja turbidez y en el mes de noviembre el material es detectable, mientras que , las zonas en color amarillo demuestran que en ambas fechas estas zonas presentaron baja turbidez en el cuerpo de agua, esto es que la zonas en color amarillo son zonas que en ambas fechas se encontró agua con baja turbidez. El resultado obtenido se observa en la Figura 5.28

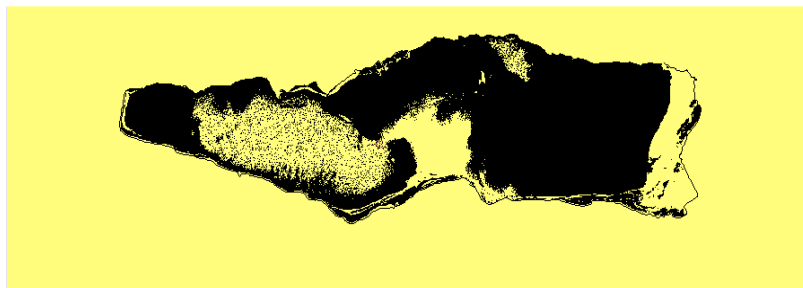


Figura 5.28 En color negro se observan las zonas donde la concentración de sedimentos suspendidos en mayo no existía y en noviembre se detectaron.

En el caso de sedimentos suspendidos la Figura 5.29 muestra el resultado del cambio del mes de mayo a noviembre. La escena está dominada por el color magenta que tras el análisis de sustracción indica que en mayo estas zonas presentaron contenido de sedimentos suspendidos mientras que para el mes de noviembre espectralmente no se encontró presencia de sedimentos suspendidos. Las zonas en color amarillo indican que en ambas fechas estas zonas presentaron contenidos de sedimentos suspendidos, es decir no hubo variación.

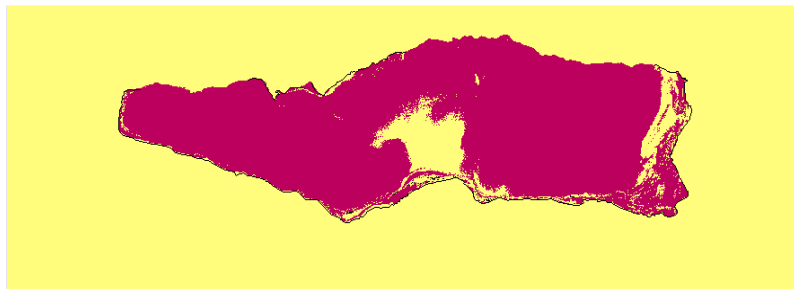


Figura 5.29 El color magenta indica las zonas en donde la concentración de sedimentos suspendidos en el cuerpo de agua en mayo se determinó presencia de este material y en noviembre las zonas muestran inexistencia de sedimentos suspendidos.

El análisis realizado para las zonas que presentan contenidos de clorofila (biomasa) y cuyo resultado se presenta en la Figura 5.30 donde en color amarillo se indica que del mes de mayo a noviembre las zonas con contenidos de biomasa siguieron presentando algún contenido de este material de una fecha a otra. El color negro indica que en estas zonas, en el mes de mayo no se detectó presencia de biomasa mientras que en el mes de noviembre se detectó algún contenido de biomasa. En el caso de las zonas en color magenta, el análisis indica que en mayo estas zonas presentaron contenidos de clorofila y en noviembre estas zonas presentaron ausencia de biomasa.

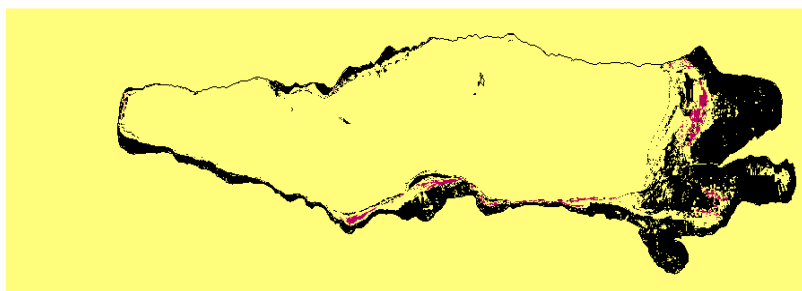


Figura 5.30 Muestra el comportamiento de zonas con contenido de clorofila del mes de mayo a noviembre. Las zonas representadas en amarillo son zonas que no mostraron cambios de contenidos de biomasa, el magenta muestra zonas

donde en mayo no existía presencia de biomasa y en noviembre sí. El color negro indica las zonas que en mayo no presentaron biomasa y en noviembre sí.

5.6 COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE NDVI CON PTOT

Para verificar que la información obtenida aplicando diversas metodologías de percepción remota es confiable, se utilizaron los datos proporcionados por la Red Nacional de Monitoreo en el Organismo Chapala-Santiago-Pacífico recabados de muestreos *in situ* en el año 2002. La verificación se realizó de manera cualitativa con base en las curvas de crecimiento de biomasa en relación a la disposición de nutrientes.

En la Figura 5.31 y 5.32 se muestran los mapas de NDVI y fósforo total (*in situ*) obtenidos para el análisis de resultados con percepción remota.

ÍNDICE DE VEGETACIÓN DE DIFERENCIA NORMALIZADA

LAGO CHAPALA

☆ MANANTIALES_HIDROTERMALES

mayo_2002*

P_TOT_mg_l

- 0.49
- 0.491 - 0.64
- 0.641 - 0.79
- 0.791 - 0.94
- 0.941 - 1.09
- 1.091 - 1.24
- 1.241 - 1.39
- 1.391 - 1.54
- 1.541 - 1.69
- 1.691 - 1.74

NDVI

Value
 High : 1
 Low : -1

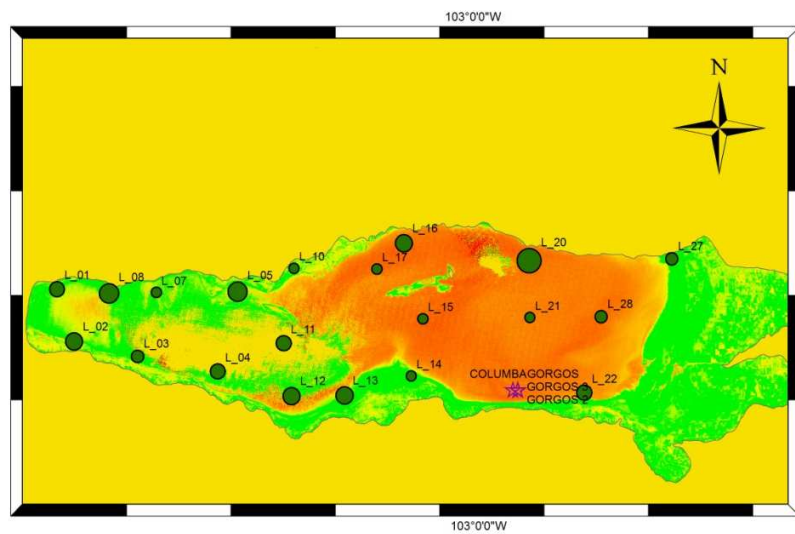
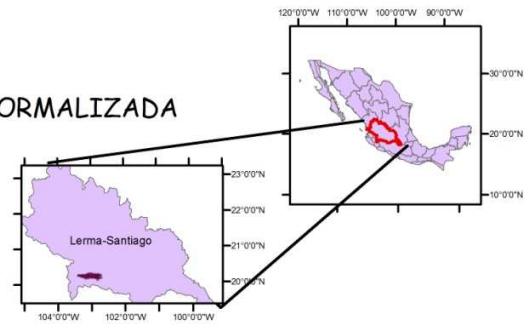


Figura 5.31 Mapa NDVI - P_{TOT} obtenido para el mes de mayo en el lago de Chapala

INDICE DE VEGETACIÓN DE DIFERENCIA NORMALIZADA

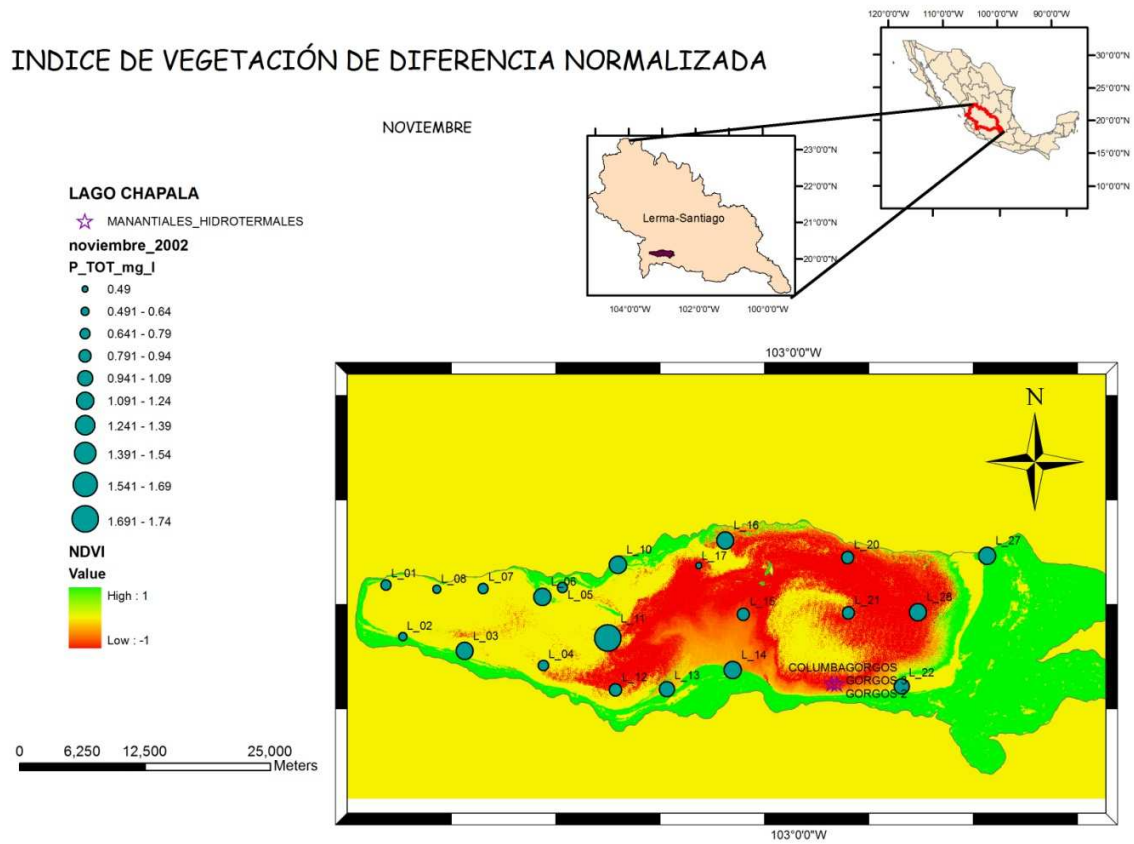


Figura 5.32 Mapa NDVI - P_{TOT} obtenido para el mes de noviembre en el lago de Chapala