

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

Análisis de la Descarga Térmica de la Central  
Nucleoeléctrica Laguna Verde, Veracruz,  
México

**TESIS**

PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
**INGENIERA CIVIL**

PRESENTA:

DANIELA PATRICIA AGUIRRE SÁNCHEZ

Director de tesis:

M.I. RODRIGO TAKASHI SEPÚLVEDA HIROSE



2015



## Agradecimientos

A quienes cuando me caí, me enseñaron a levantarme; a ellos que cuando me herí, sustituyeron el dolor por calidez; los mismos que cuando falle tuvieron el bien de enseñarme que era parte del camino para el éxito, ellos, quienes me abrazaron, me procuraron y amaron; mis padres que en tanto tiempo ni una vez me han fallado, que a pesar de sus luchas internas y su cansancio inmenso me enseñaron sin fin de lecciones, a ellos les debo todo lo que soy y seré, a ustedes Patricia y Jaime les dedico el primer y todos mis logros.

A mis Abuelos que son ejemplo de vida, a quienes ya partieron de este mundo y su recuerdo es el más fuerte de los motores y sus enseñanzas tiernas me acompañan en mis decisiones.

A Rene le agradezco su cariño y apoyo, gracias por ser mi refugio y compañero.

Al apoyo de mis tíos que me han procurado en todo este proceso.

A mis profesores por el privilegio de haber sido su alumna, agradeciendo el haber compartido su experiencia y conocimiento.

Al Ing. Rodrigo Sepúlveda por su gran apoyo, paciencia y orientación para la realización del presente trabajo. Gracias por brindarme tu amistad.

**“Hay que apuntar a lo imposible para lograr lo posible”**

|   |    |
|---|----|
| INTRODUCCIÓN.....   | 5  |
| OBJETIVO.....   | 7  |
| Objetivos Específicos.....  | 7  |
| CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES HISTÓRICOS .....   | 8  |
| CAPÍTULO 2. PERCEPCIÓN REMOTA.....  | 12 |
| 2.1 Elementos del Proceso de Percepción Remota (PR) .....                                   | 12 |
| 2.2 Sensores y Plataformas .....  | 14 |
| • Por su trayectoria (sincronizada con el Sol u órbita estacionaria Figura 8) .....         | 15 |
| ○ Satélites de órbita polar .....   | 15 |
| ○ Satélites geoestacionarios.....   | 15 |
| 2.3 Procesamientos de Datos.....  | 17 |
| 2.4 Realce y Filtrado de la Imagen .....  | 20 |
| Ajuste de Contraste.....  | 20 |
| Filtrado de Imágenes Mediante Convolución .....   | 21 |
| Filtros de Paso Bajo .....  | 22 |
| Filtros de Paso Alto.....   | 24 |
| 2.5 Ventajas y Limitaciones de la Percepción Remota.....                                    | 26 |
| CAPÍTULO 3. MARCO TEÓRICO .....   | 27 |
| 3.1 Espectro Electromagnético .....   | 28 |
| 3.2 Firma Espectral.....  | 33 |
| 3.3 Interacción y Corrección Atmosférica .....  | 34 |
| 3.4 Sistemas de Información Geográfica.....   | 37 |
| CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA .....   | 41 |
| 4.1 Sitio de Estudio.....   | 41 |
| Sistema de disipación del calor de la CNLV .....  | 45 |
| Golfo de México .....   | 46 |
| 4.2 Plataforma Seleccionada .....   | 49 |
| 4.3 Adquisición de las imágenes .....   | 51 |
| 4.4 Pre-procesamiento y procesamiento de las imágenes mediante software especializado ..... | 52 |
| CAPÍTULO 5. ANÁLISIS DE DATOS.....  | 75 |
| CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES .....  | 81 |
| BIBLIOGRAFÍA.....   | 82 |

## INTRODUCCIÓN

El agua es un elemento de suma importancia en nuestro planeta, rige la forma y los ciclos de vida y es un recurso imprescindible para el ser humano, ha tomado un papel de importancia para el desarrollo y progreso de los nuestros asentamientos.

Aproximadamente un setenta y cinco por ciento de nuestro planeta está cubierto por agua. Los océanos ejercen una gran influencia en casi todos los aspectos de la vida en la Tierra, por lo que es indispensable la comprensión de su papel en el medio ambiente y las alteraciones que provocamos por nuestras actividades en sus ecosistemas. Los estudios oceanográficos actuales se enfocan al estudio de los mares como una componente integral de un sistema global gobernado por las interacciones entre aire, agua y tierra.

Nombrando a nuestro objeto de estudio que es la Central Nucleoeléctrica de Laguna Verde (CNLV) en julio de 1990 dio inicio la operación comercial de la unidad 1 de la planta y en abril de 1995 entró en operación la unidad 2, ambas con características y capacidades similares. Las emisiones de radionúclidos artificiales liberados al ambiente por la CNLV en forma gaseosa o líquida, se encuentran reglamentadas, a nivel nacional por la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardas (CNSNS) y a nivel internacional por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), el cual vigila el cumplimiento de los acuerdo y convenios de seguridad nuclear, así también se ve reglamentada por la World Association of Nuclear Operators (WANO), que agrupa a todos los operadores de seguridad nuclear en el mundo y busca mantener en un nivel inmejorable la seguridad.

El proceso de muestreo y pruebas de laboratorio requieren recursos económicos y un tiempo determinado, así como el traslado de recursos humanos al sitio. La búsqueda de métodos más económicos y rápidos para determinar estos parámetros es un campo donde la Percepción Remota (PR) tiene una importante aplicación. Hasta el advenimiento de la tecnología satelital no era posible el hacer un estudio de los océanos a escala global, estos cuerpos de agua son de una magnitud tal que es imposible para los investigadores que puedan realizar esta tarea con técnicas tradicionales de muestreo.

El uso de satélites ambientales ha mejorado ampliamente la capacidad de estudiar las características de los océanos. Desde una plataforma satelital se pueden observar áreas grandes de los océanos, incluyendo regiones remotas, en forma simultánea, gracias a esto tenemos un recurso que nos permite monitorear y estudiar los océanos en una escala de tiempo útil y con un bajo costo.

Los datos obtenidos por los sensores incluyen el color y la temperatura superficial del mar, oleaje y viento superficial, rugosidad de la superficie oceánica, corrientes y mareas así como la topografía del suelo oceánico. En este trabajo de tesis se hará un estudio de la descarga térmica de la CNLV sobre el Golfo de México por lo que de los datos anteriormente nombrados, el de nuestro interés será la temperatura superficial del mar.

## Análisis de la Descarga Térmica de la Central Nucleoeléctrica Laguna Verde, Veracruz, México

En el Capítulo 1 se hace un recuento histórico desde los primeros estudios sobre el comportamiento de la luz y la aparición de la cámara fotográfica hasta las últimas plataformas satelitales que orbitan en nuestro planeta. En el Capítulo 2, se desarrollan fundamentos de la percepción remota, abarcando los distintos elementos que intervienen en el proceso, desde la captura hasta el procesamiento de la información. En el Capítulo 3 se desarrollan bases teóricas que sustentan el trabajo. En el Capítulo 4 se realiza una breve descripción del sitio de estudio, para finalmente desarrollar la metodología para esta investigación y presentar sus resultados.

## **OBJETIVO**

Evaluar el impacto de la descarga térmica de la CNLV sobre el Golfo de México mediante el uso de técnicas de Percepción Remota.

### **Objetivos Específicos**

- Explicar los fundamentos de la PR.
- Analizar los métodos utilizados en el pre-procesamiento, procesamiento, análisis visual y digital de imágenes.
- Probar a través del estudio de caso de la CNLV la utilidad de la PR para evaluar el impacto al ambiente de descargas térmicas.

## CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES HISTÓRICOS

Desde su origen el ser humano se ha valido de obtener la información a distancia: el sensor remoto perfecto con el que contamos es el ojo humano, el cual nos permite identificar el tamaño, volumen, posición, luminosidad, distancia, trayectoria, color y forma de los objetos en nuestro entorno, entre otras cosas.

Gracias a que nuestros antecesores comenzaron a explorar y estudiar objetos terrestres y celestes fue que los científicos comenzaron a entender las propiedades de la luz. Newton planteó (basándose en su famoso experimento en el que descompuso un haz de luz al hacerlo incidir en un prisma de cristal, Figura 1.1) antecedentes importantes para comprender algunos fenómenos del espectro electromagnético. Michael Faraday fue el primero en probar de forma experimental la relación de la luz con los fenómenos electromagnéticos en el año de 1845 (Cetto 1996). Por su parte, James Maxwell desarrolló la



Figura 1.1: Representación del experimento de Newton con el haz de luz

teoría electromagnética de la luz de manera formal.

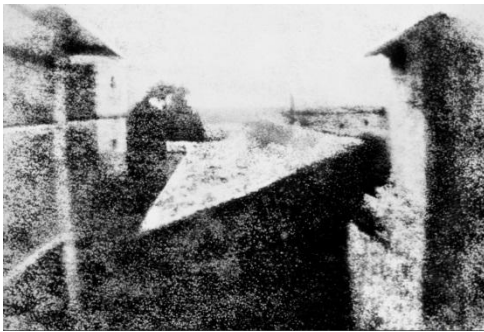


Figura 1.2: Primera fotografía de la historia tomada por Joseph Nicéphore Niépce en 1826, desde su habitación de trabajo

La cámara fotográfica, imitadora mecánica del ojo humano (Figura 1.2), apareció a finales del siglo XIX (Olguín Ortiz 2008) y permitió registrar imágenes de objetos distantes. Las primera imágenes aéreas se obtuvieron colocando cámaras en globos aerostáticos, en palomas o en papalotes (Elachi y van Zyl 2006) (Figura 1.3 y Figura 1.4).

diseños de cohetes con sistemas de adquisición de imágenes bajo el título de “Dispositivos nuevos o mejorados para obtener fotografías aéreas de la Tierra”. El sistema consistía en una cámara propulsada por un cohete con un paracaídas para su recuperación (de Jong 2005).

A mediados de la década de los años 30 apareció la fotografía a color. Simultáneamente, se desarrollaron películas sensibles a la radiación del infrarrojo cercano. La aplicación principal en esa época era poder tomar fotografías que penetraran la neblina. Para el principio de la década de los 50 los sistemas de percepción remota se desarrollaron y perfeccionaron con bastante velocidad.

Para 1890 aparece la primera publicación de fotografía aérea, escrita por Batut (Rees 2001). En 1891, se otorgaron las primeras patentes alemanas de



Figura 1.3: Primera Fotografía aérea de la ciudad de Boston, de 1866. Tomada desde un globo aerostático



La fotografía infrarroja se utilizó en estudios de cubierta vegetal, principalmente para reconocimiento de especies, identificación de individuos enfermos, dañados o sujetos a estrés (Elachi y van Zyl 2006, de Jong 2005). Así mismo, se lograron avances importantes en la tecnología de los radares.



Figura 1.4: Paloma con cámara fotográfica montada por Julius Neubronner.

Con el lanzamiento del primer satélite meteorológico con una cámara de baja resolución espacial en el año de 1960 se comienza con la observación sistemática de la Tierra desde el espacio. Este satélite recibió el nombre de TIROS-I (Televisión InfraRed Observation Satellite), y permitiría a los meteorólogos discriminar entre nubes, agua, hielo y nieve. A pesar de que su lapso de operación fue corto (78 días), probó que los satélites son herramientas muy útiles en el estudio de los fenómenos ambientales terrestres. Éste fue el primero de una serie de satélites que cambiaron de denominación en 1970 a NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) y que continúan vigentes hasta nuestros días, siendo el NOAA-19 el último en ponerse en órbita en febrero del 2009.

El primer experimento controlado de fotografía multispectral para estudiar los recursos de la Tierra se llevó a cabo en el Apolo 9 cuando estaba en órbita, en marzo de 1969 ([www.nasa.gov](http://www.nasa.gov)) las fotografías fueron tomadas utilizando una película pancromática con filtros rojos y verdes, otra película en blanco y negro del infrarrojo próximo y una última en color.

El gobierno estadounidense desarrolló el Programa de Observación ERTS (Earth Resources Technology Satellites), debido al éxito obtenido con las imágenes de los primeros satélites meteorológicos y misiones espaciales tripuladas. El programa fue renombrado como Landsat (Land Satellite) a partir de 1975. El primer satélite de esta serie fue lanzado anteriormente, el 23 de julio de 1972, operando hasta el 6 de enero de 1978. Tenía instalados dos sensores: el RBV (Return Beam Vidicon) y el sensor MSS (Multi Spectral Scanner) que medía reflectancia de la superficie terrestre en cuatro intervalos espectrales, situados entre 0.5 y 1.1  $\mu\text{m}$ . Las primeras tres plataformas de la serie incluyeron ambos sensores, pero el MSS entregó información mucho más valiosa, este sensor se instaló hasta la quinta plataforma en marzo de 1984. En Landsat 4 y 5 se incorporó otro sensor, el TM (Thematic Mapper) el cual mejoró la resolución espacial y espectral. El proyecto Landsat ha resultado ser hasta el momento el más fructífero para aplicaciones no militares. El último satélite Landsat puesto en órbita es el Landsat 8 (11 de febrero 2013), este satélite empezó a trabajar bajo condiciones nominales el 30 de mayo del 2013 y reemplazó a Landsat 5 TM y Landsat 7 ETM+ (Figura 1.5), cuenta con dos instrumentos de toma de datos el OLI (Operational Land Imager) y el TIRS (Thermal Infrared Sensor), el sensor tendrá un total de 11 bandas espectrales, 9 tomadas por el OLI y 2 por el TIRS. ([www.sib.gov.ar](http://www.sib.gov.ar))

Se han colocado en órbita cientos de satélites, los más sobresalientes son el SPOT francés, el ERS de la Agencia Europea del Espacio, el MOS japonés, el RADARSAT canadiense y el IRS indio.

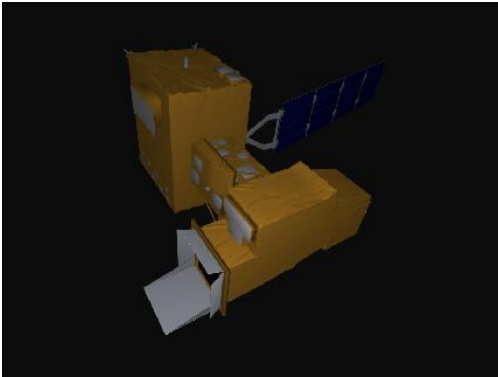


Figura 1.5: Satélite Landsat 7 penúltimo satélite enviado del programa Landsat. Puesto en órbita en 1999.

El programa SPOT (Satellite Pour l'Observation de la Terre) fue aprobado en 1978 por el gobierno francés, con la idea de desarrollar su propio programa de observación de la Tierra. Su misión principal es obtener imágenes terrestres para uso en agricultura, geología, cartografía, planeación territorial, recursos hídricos, estudios ambientales y otras aplicaciones SIG.

El primer satélite de este programa fue lanzado en febrero de 1986 (Pacholczyk 1993). El último satélite puesto en órbita fue el SPOT-6 el 9 de septiembre del 2012, aun así tienen planeado poner en órbita un satélite con el nombre SPOT-7 en el curso del año 2014. Cuenta con un sensor NAOMI (New AstroSat Optical Modular Instrument).

La serie de satélites IRS (Indian Remote Sensing Satellite) empezaron a operar en 1996. Tienen 3 sensores: una cámara pancromática de alta resolución espacial (5.8 m), un sensor LISS (Linear Imaging Self-Scanning Sensor) de cuatro canales y resolución media (23.5-70.5 m), y un sensor WiFS (Wide Field Sensor) con dos canales y baja resolución (188.3 m). La última plataforma del programa puesta en órbita fue el Resourcesat-2 el 20 de abril del 2011 (Indian Space Research 2011).

Las capacidades de los sensores se han incrementado notablemente en los últimos años. El número de canales espectrales ha crecido de unos pocos hasta más de 200 para el caso del sensor Hyperion a bordo del satélite EO-1. La resolución espacial también se ha afinado hasta llegar a resoluciones del orden de fracciones de metro, como las registradas por IKONOS o Quickbird. Así como los datos obtenidos a través de la PR se han vuelto muy accesibles, el número de aplicaciones se ha incrementado.

Todos los sensores empleados en los satélites de observación oceanográfica usan la radiación electromagnética para ver el objeto de estudio: el mar. Estos sensores están colocados en las ventanas atmosféricas para detectar la radiación reflejada por la superficie terrestre.

Las primeras observaciones remotas del mar fueron fotografías aéreas en las que se utilizó la banda visible EEM. Similarmente, las primeras observaciones del océano efectuadas desde el espacio fueron fotografías tomadas desde los satélites tripulados en la década de los años sesenta. Actualmente se utilizan radiómetros y barredores multispectrales para realizar observaciones de la temperatura superficial y del color del mar.

Desde que el humano ha navegado los océanos se ha percatado que el mar tiene diversos colores, muchos que se encuentran en la variedad de tonalidades azules, con ligeras mezclas de tonos verdes y cafés.

Los diferentes colores que presenta el mar indica la presencia de un frente marcando fronteras entre masas de agua con diferentes propiedades. Es de tal importancia el color del mar y sus propiedades que varios mares del mundo reciben su nombre gracias a su coloración. Entre los ejemplos más notables está el Mar Rojo. En otras ocasiones, las corrientes oceánicas llegan a juntar masas de agua con diferencias de color más sutiles como se puede observar, a simple vista, los cambios de color en los bordes de la corriente del Golfo de México a lo largo del Atlántico occidental.

Los primeros estudios serios sobre el color del mar se remontan a mediados del siglo XIX. En 1847, Bunsen propuso la idea de que el color del mar depende de la absorción y que solo se observan las longitudes de onda de la luz visible que se transmiten selectivamente. Sin embargo, los primeros estudios sistemáticos del efecto de la luz solar en el agua del mar, recibieron su impulso inicial a finales del siglo XIX con las investigaciones realizadas, independientemente por Kotsebu, oficial de la marina rusa, y por el astrónomo italiano P.A. Secchi quienes hicieron observaciones de la transparencia del agua sumergiendo un disco plano en el océano y anotando la profundidad a la que dejaba de ser visible.

El siguiente paso importante dentro de la óptica marina fue dado por F.A. Forel en 1895 y W. Ule en 1892 quienes inventaron la escala de color. Inicialmente la escala fue hecha para evaluar el color de los lagos suizos. La escala consiste en una serie de ampolletas selladas conteniendo mezclas de dos soluciones acuosas: una azul de sulfato de cobre y amoníaco y una solución amarilla de cromato de potasio. Ule añadió un color café, el cual fue preparado con una solución de sulfato de cobalto y amoníaco.

En 1922, Raman señalaba que la dispersión molecular es un elemento de suma importancia en las observaciones del color del mar.

Las ventajas más grandes en las mediciones del color del océano aparecen cuando las propiedades de éste pueden ser medidas sin tener contacto físico con el mar. De otra manera, sería muy fácil hacer mediciones directas de alguna propiedad deseada, deduciéndola a partir de mediciones ópticas.

Por esta razón, y con el advenimiento de los sensores remotos montados en aviones o satélites, el color del océano empezó a adquirir gran significado en diversas disciplinas oceanográficas. En este caso es el color del mar visto desde arriba, y no desde dentro, el que debe ser analizado para descubrir que información puede proporcionar sobre los parámetros de calidad del agua.

## CAPÍTULO 2. PERCEPCIÓN REMOTA

Muchos autores han definido de muchas maneras diferentes lo que es la percepción remota. Una de las definiciones más sencillas enuncia a la percepción remota como la adquisición de datos físicos de un objeto sin tener que tocarlo (Lintz and Simonett, 1976). Gracias a la percepción remota podemos hacer estudios más económicos de áreas terrestres muy extensas o difíciles de alcanzar por el hombre, también nos permite hacer estudios de otros cuerpos celestes donde el hombre no ha podido llegar por lo que en este texto utilizaremos la definición dada por Campbell quien enuncia: La percepción remota es la práctica de obtener información sobre un área terrestre o superficie acuática analizando imágenes adquiridas por medio de un dispositivo que no está en contacto con el objeto utilizando radiación electromagnética en una o más regiones del espectro electromagnético que se refleja, o es emitida desde la superficie de la Tierra.

El proceso queda descrito a grandes rasgos por la recolección de datos, el análisis y la aplicación y presentación del conocimiento (Figura 2.1).

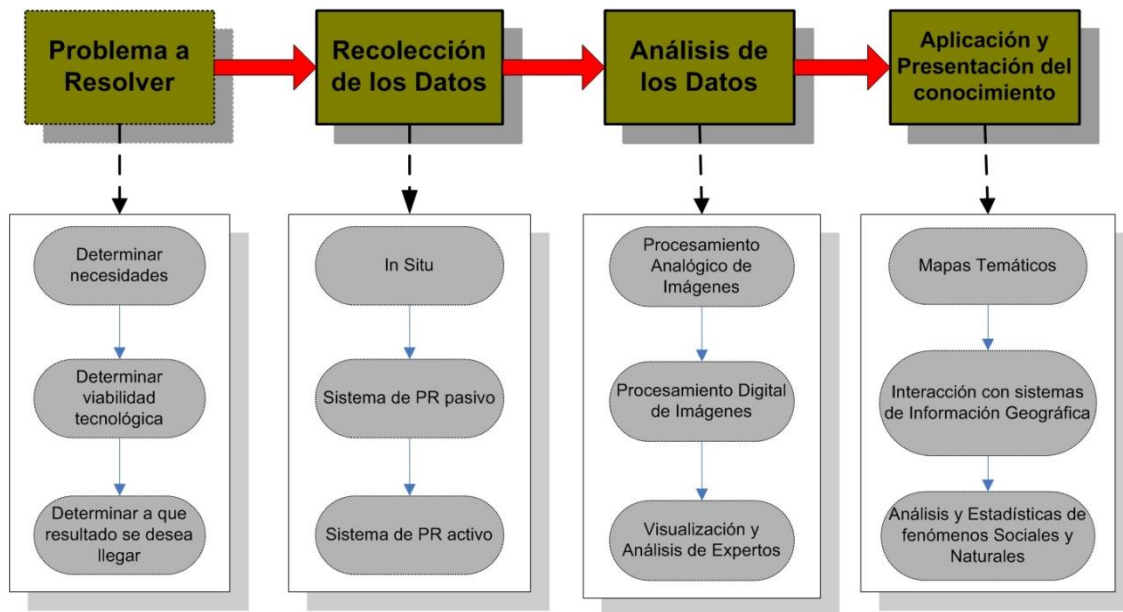


Figura 2.1: Descripción del proceso para la resolución de problemas a través de percepción remota.

### 2.1 Elementos del Proceso de Percepción Remota (PR)

El proceso involucra una interacción entre la radiación incidente y los objetos de interés (Arbelo 2004) como se presenta en la Figura 2.2.

Fuente de radiación electromagnética (**A**): Para comenzar con el proceso de la percepción remota es requisito disponer de una fuente que proporcione energía luminosa o electromagnética al objeto de interés. Todos los materiales con temperatura mayor al 0 K tienen la capacidad de emitir energía electromagnética. Los objetos que están cerca o en la superficie de la Tierra son capaces

de reflejar o dispersar la radiación electromagnética incidente emitida por una fuente sea de tipo natural o artificial.

Radiación y medio de transmisión **(B)**: Mientras la energía hace su viaje de la fuente al objetivo ésta entrará en contacto e interactuará con la atmósfera, la cual influirá sobre ella. Adicionalmente, la radiación reflejada o emitida por el objetivo se verá influida por la acción de su interacción con la atmósfera hasta llegar al sensor.

Interacción con el objeto **(C)**: Depende tanto de las propiedades del objeto como de la radiación incidente. Cuando esta última alcanza el objeto, puede ser transmitida, absorbida, dispersada o reflejada. La magnitud de cada uno de estos procesos depende de las propiedades del objeto en cuestión.

Registro de la energía en el sensor **(D)**: Una vez que la energía haya interactuado con el objeto, se requiere de un sensor el cual es el encargado de captar y almacenar la radiación electromagnética.

Transmisión, recepción y procesamiento **(E)**: La información dada por la energía captada por el sensor se transmite, frecuentemente de manera electrónica, a una estación de recepción y procesamiento donde los datos son convertidos en imágenes digitales.

Interpretación y análisis **(F)**: Con la imagen obtenida se hace un proceso de interpretación visual, digital y/o electrónica, para obtener información de interés del objeto de estudio.

Aplicación **(G)**: Como paso final del proceso de PR se logra cuando se aplica la información extraída de las imágenes sobre el objeto con el fin de poder revelar alguna información de utilidad para la solución de problemas específicos o alguna información nueva que dé pie a más estudios.

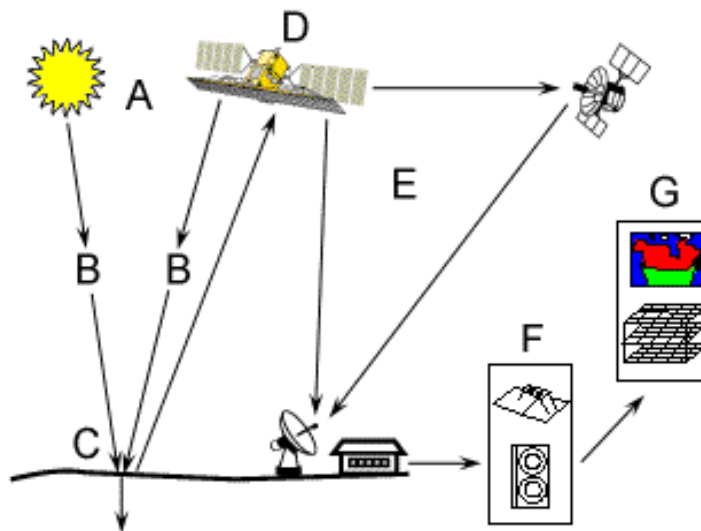


Figura 2.2: Elementos del proceso de Percepción Remota. Basado en (Arbelo 2004)

## 2.2 Sensores y Plataformas

Es importante empezar con la definición de sensor y plataforma, para diferenciar los términos.

Plataforma: Dispositivo donde se sustentan físicamente los sistemas necesarios para el funcionamiento correcto de los sensores.

Sensor: Dispositivo diseñado para recibir información de una magnitud del exterior y transformarla en otra magnitud, normalmente eléctrica, que seamos capaces de cuantificar y manipular. Normalmente estos dispositivos se fabrican mediante la utilización de componentes pasivos (resistencias variables, PTC, NTC, LDR, etc. todos aquellos componentes que varían su magnitud en función de alguna variable), y la utilización de componentes activos.

Para ejemplificar lo anterior tenemos la plataforma LANDSAT 8 la cual cuenta con los sensores OLI y TIRS; la SPOT 6, con el sensor NAOMI.

Las plataformas pueden clasificarse principalmente por:

- Por el tipo o la altura respecto a la superficie terrestre. (Figura 2.3)

Tener un criterio de selección resulta de gran ayuda, ya que al escoger la altura de la plataforma, ésta impactará en la escala de las imágenes obtenidas, también considerar en el criterio de selección la aplicación para la que se hará el estudio (meteorológicos, recursos de la tierra, etc.), cuan grande será el área de estudio deseada, el detalle de las imágenes que se quiere obtener, si se quieren datos de una hora específica y las desventajas del tipo de plataforma en la que se está operando; por ejemplo, si se quiere estudiar a detalle un área pequeña usar un avión como plataforma sería una buena elección.

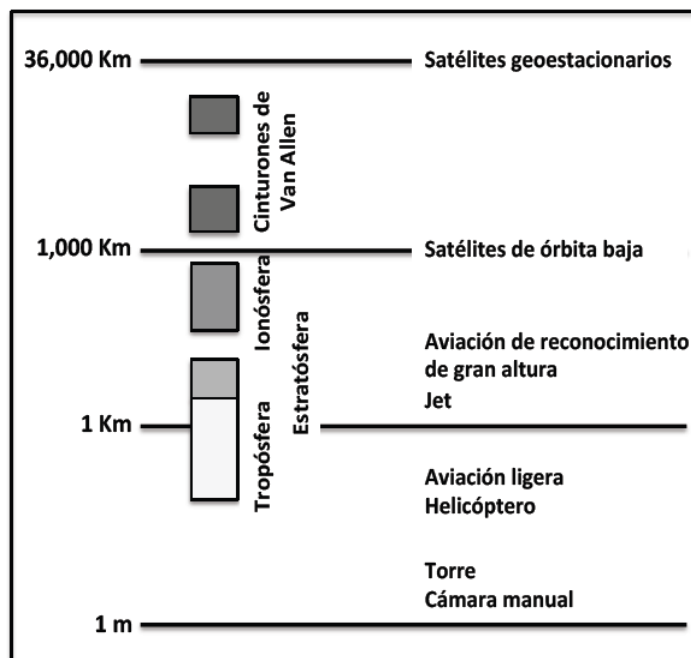


Figura 2.3: Plataformas clasificadas en función de su altura respecto a la Tierra. Basado en (G. Rees 2001)

- Por su trayectoria (sincronizada con el Sol u órbita estacionaria Figura 2.4)

Existen dos tipos de satélites que son destinados a la investigación oceanográfica. Con base en las características de su trayectoria, estos son:

- Satélites de órbita polar

Las órbitas de los satélites polares están cercanas al eje polar terrestre y forman un ángulo de  $98^\circ$  con respecto a él. Éstos satélites circulan la Tierra por una órbita conocida como heliosincrónica. Esto significa que el satélite permanece fijo con relación al Sol y la Tierra gira debajo de él conforme el satélite realiza su órbita. Cada órbita tiene un periodo cercano a 102 minutos. Por tanto, en un día un satélite polar realiza entre 13 y 14 órbitas.

- Satélites geoestacionarios

Los satélites geoestacionarios poseen órbitas con altitudes hasta 36000 km. Se mueven en la misma dirección que la rotación terrestre y sus velocidades están ajustadas para mantener su posición sobre un punto fijo determinado de la superficie terrestre.

Producen imágenes cada 15 minutos pero con una resolución espacial menor, éstos satélites son de mayor utilidad para las áreas cercanas al ecuador donde la resolución es la mejor. Entre los principales satélites meteorológicos se pueden considerar los cinco que conforman la Red Meteorológica Global

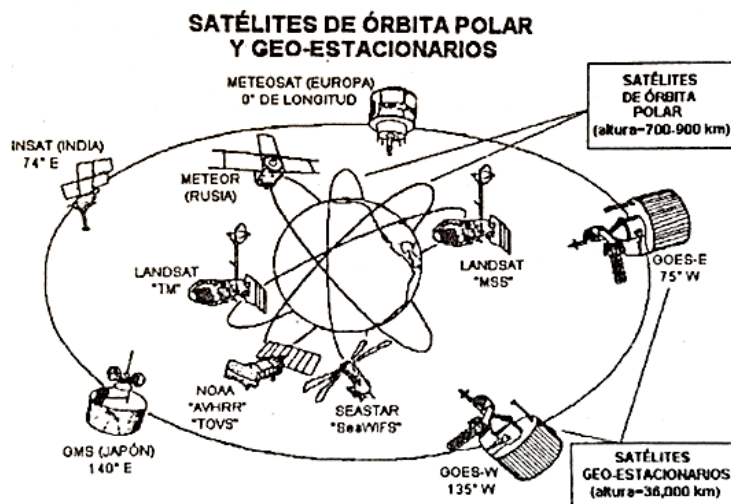


Figura 2.4: Sistemas polares y geoestacionarios. Basado en (Aguirre 2002)

Existe una gran diversidad de clasificación de sensores remotos. Los criterios que se emplean no son excluyentes entre sí. Una de las clasificaciones que resulta útil nombrar para el fin de esta tesis es:

Clasificación de los sensores en función de su fuente emisora de energía, este sistema de clasificación se basa en establecer si la fuente emisora de energía es natural como el sol (como los sistemas multiespectrales a bordo de satélites como el Landsat, SPOT, Quickbird, IKONOS, IRS y Terra) o si la fuente emisora pertenece al mismo sensor remoto (como los SIR, Seasat, ERS, ALOS y Envisat) teniendo dos grupos de sensores:

**Sensores pasivos:** Es aquel sensor que registra la energía reflejada o emitida por los objetos de la superficie terrestre. La fuente generadora de radiación electromagnética es natural (generalmente el sol). Los sensores diseñados con éstas características, son:

- Sensores fotográficos
- Sensores electro-ópticos de barrido mecánico (MSS, TM)
- Sensores electro-ópticos de barrido electrónico (HRV)
- Sensores de microondas (radiómetro)

**Sensores activos:** Es aquel sensor que posee la fuente de energía, de manera que el mismo emite la energía electromagnética en dirección al objeto y luego detecta y registra la energía reflejada por tal objeto.

#### RESOLUCIÓN DE UN SENSOR

La resolución de un sensor se encuentra determinada por la capacidad del mismo de diferenciar los elementos existentes en el área observada, basándose en las diferencias de radiación obtenidas y teniendo en cuenta el detalle de captura, la cantidad de bandas en las que trabaja y las variaciones existentes para diferentes períodos de tiempo. De acuerdo con esto, se definen cuatro tipos de resoluciones para los datos de sensores remotos.

- **Resolución espacial:** Hace referencia a los elementos más pequeños que pueden ser capturados por un sensor. Con una menor área capturada en un pixel (unidad mínima en la resolución espacial) se tendrá una mayor resolución y mayor será el detalle de los elementos. La resolución espacial de un sensor puede ser baja, mediana o alta, claro está que con una resolución espacial alta se tendrá una imagen más detallada en los elementos que la conforman.
- **Resolución espectral:** Se define como el rango dentro del espectro electromagnético en el que el sensor captura información. La resolución espectral hace referencia a la cantidad de bandas dentro del espectro electromagnético que están incluidas en el sensor. De acuerdo



a esto se encuentran sensores que trabajan en la banda pancromática, multiespectral e hiperespectral.

- Resolución radiométrica: Esta resolución hace referencia al número de niveles digitales que usa el sensor para representar la información capturada. Entre más niveles mejor el detalle de la imagen. El rango de niveles digitales está representado visualmente por la escala de grises, donde los niveles más bajos son gris oscuro y los más altos gris claro.
- Resolución temporal: Está determinada por el tipo de órbita del satélite y puede ser modificada en satélites que permitan cambiar la dirección del sensor hacia una zona de interés.

## 2.3 Procesamientos de Datos

Un pixel es el elemento más pequeño, bidimensional, no divisible de una imagen digital (Jensen 1996). El sensor detecta la radiancia media procedente de una parcela del terreno equivalente al tamaño del pixel, se traduce a un valor numérico en cada banda del espectro llamado Nivel Digital (ND) (Figura 2.5). Éste es un número entero que varía en función de la resolución radiométrica con la que trabaje el sensor. Por ejemplo, para 8 bits, el ND debe los 256 valores posibles ( $2^8$ ), así que el ND en cada pixel puede variar de 0 a 255. Es por eso que puede traducirse a una intensidad visual, a través de su nivel gris.

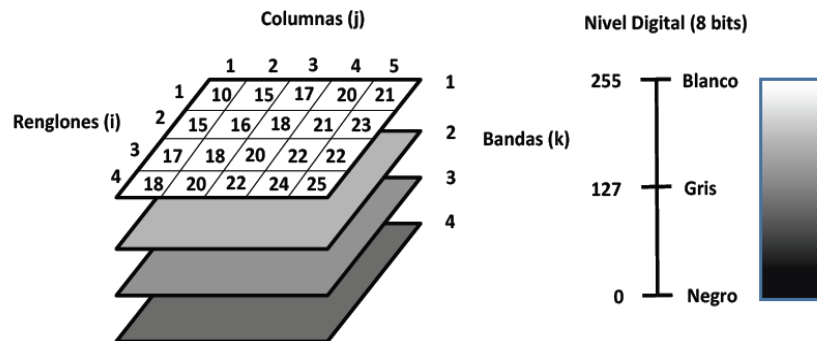


Figura 2.5: Organización de una imagen satelital. Basado en (Sepúlveda 2011)

Para poder hacer un uso correcto de los datos capturados por los sensores remotos es necesario procesarlos para corregir errores y poder incorporarlos a un SIG o software de PR para su análisis y modelación. Este proceso requiere principalmente de 4 etapas:

1. Procesamiento de la imagen: Se refiere a la corrección de errores radiométricos y geométricos que se requieren hacer antes del análisis de datos y la extracción de la información.

Correcciones geométricas: Se aplican a errores propios del sensor o las variaciones del terreno. Estas operaciones tienen el objetivo de eliminar errores generados por la curvatura terrestre y la rotación en relación a la plataforma del sensor. (Figura 2.6)

Correcciones radiométricas: Se realizan para solventar errores causados por fallas en el funcionamiento de los detectores y efectos atmosféricos en imágenes en el espectro visible infrarrojo.

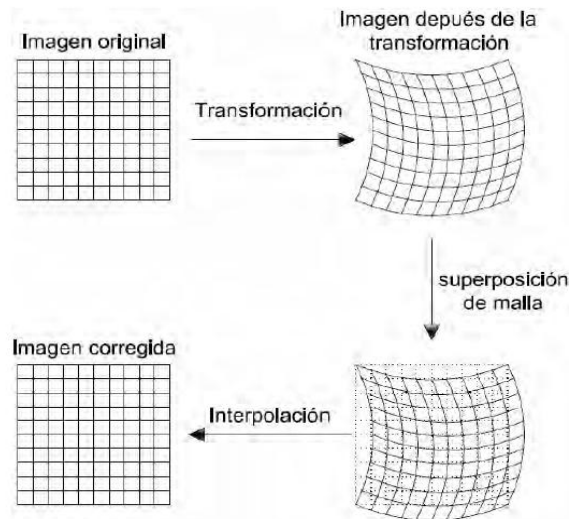


Figura 2.6: Proceso de corrección geométrica. Basado en (Vazquez 2000)

2. Mejora de imagen: Las mejoras se aplican con el fin de optimizar el análisis digital, además de proporcionar herramientas visuales para resaltar aspectos importantes observables a simple vista. Se pueden aplicar realces y filtros de imagen.
3. Transformación de la imagen: Son operaciones similares en concepto al mejoramiento de la imagen. Sin embargo, a diferencia de las operaciones de mejoramiento de imagen que normalmente son aplicadas solo para un canal de datos a la vez, las transformaciones de imagen generalmente involucran el procesamiento combinado de datos de múltiples bandas espectrales.
4. Clasificación de imagen y análisis: La clasificación implica el uso de reglas para decidir si los diferentes píxeles de una imagen tienen características similares. Todos los píxeles que se encuentran dentro de un volumen rodeado por fronteras de decisión son entonces etiquetados en clases. Éste es normalmente un procedimiento semiautomático en donde un píxel o un grupo de píxeles se asignan a clases espectrales (**clasificación no supervisada**) o clases informacionales (**clasificación supervisada**).

**Clasificación no supervisada:** Es un método donde el software de interpretación de imagen separa los píxeles con base en sus valores de reflectancia en clases. Una vez completado este proceso, el analista determina el tipo de cubierta para cada clase basada en la interpretación de imágenes, mapas, informes de campo, etc. y asigna a cada clase una categoría específica. Las clases espectrales son agrupadas primero, basadas únicamente en la información numérica de los datos, y luego son igualadas por el analista a clases de información. Para determinar las agrupaciones se utiliza algoritmos de agrupamiento, siendo el analista quien especifica cuántos grupos o familias son buscados en los datos, finalmente al tener el proceso iterativo de agrupación listo el analista puede combinar o separa las agrupaciones obtenidas. Ambas situaciones requerirán un algoritmo con mayor profundidad. Así, la clasificación no supervisada no se lleva a cabo completamente sin intervención humana.

**Clasificación supervisada:** en esta clasificación el analista identifica en las imágenes muestra representativas homogéneas de los diferentes tipos de cubierta (clases de información) de interés. Estas muestras se denominan zonas de entrenamiento. Las zonas de entrenamiento sirven para establecer las relaciones entre las clases de interés y los datos espectrales de la imagen. Primero, el número de zonas de entrenamiento debe ser al menos tres veces el número de clases de interés. La zona de entrenamiento debe ser seleccionada para representar la distribución espectral de cada clase de interés tan detalladamente como sea posible, y debe ser distribuida aleatoriamente o sistemáticamente en toda el área de la imagen. Finalmente, cada zona de entrenamiento debe ser tan homogénea como sea posible, lo que significa que el grupo de píxeles en una zona de entrenamiento debe tener valores espectrales similares (Figura 2.7) (Khorram, Koch, Van Der Wiele and Nelson 2012).

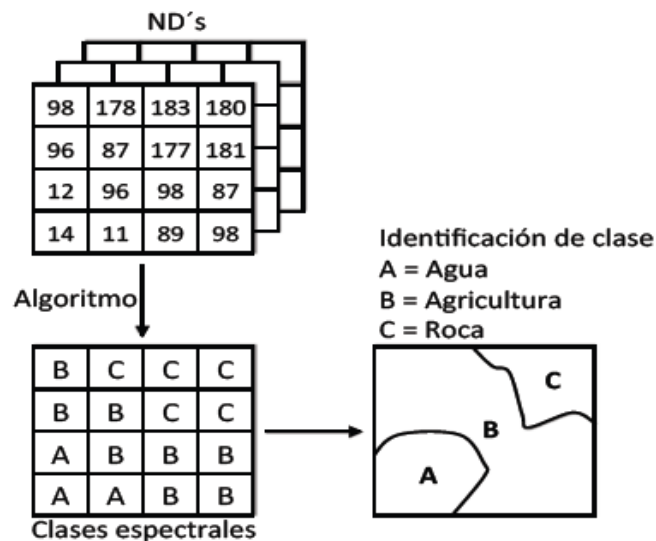


Figura 2.7: Proceso de clasificación supervisada. Basado en (Khorram, Koch, Van Der Wiele and Nelson 2012)

## 2.4 Realce y Filtrado de la Imagen

Para mejorar el análisis visual de una imagen existen distintas técnicas que aprovechan la facilidad con la que se pueden realzar y retocar imágenes digitales.

Existen técnicas no destructivas de la imagen, técnicas de las que hablaremos posteriormente, cuyo propósito es mejorar la apariencia global de la imagen, así también existen técnicas destructivas, como los distintos tipos de filtrado, las cuales pretenden mejorar aspectos localizados mediante realces espaciales. Se les llama así porque las no destructivas no alteran la imagen original por el contrario las destructivas generan un nuevo conjunto de datos con los valores resultantes de la operación.

### Ajuste de Contraste

La calibración de los sensores utilizados en PR permite que puedan recibir valores de radiación bastante amplios sin llegar a saturarse, por lo que los ND presentes en una imagen satelital sean relativamente bajos dentro la escala de grises que despliega la computadora a través del monitor. Por lo anterior generalmente las imágenes desplegadas se ven oscuras por lo que es necesario ajustar el contraste alterando el Nivel de Gris (NG) para facilitar la visualización, debido a que el ojo humano no es capaz de distinguir con facilidad los cambios sutiles en la escala de grises.

De manera general, el software de PR cuenta con tres tipos principales de formas de ajustar el contraste de una imagen:

1. Expansión lineal automática: este ajuste está en función de los niveles digitales máximo y mínimo que presenta la imagen. Lo que se busca es desplegar todos los valores de la imagen a lo largo de toda la paleta de grises. Está en función de :

$$NG = 255 \frac{NDi - ND_{\min}}{ND_{\max} - ND_{\min}} \quad (1)$$

Es importante señalar que para el nivel más bajo de la imagen original se le asignará como nuevo valor el negro (0), y para el nivel más alto se le asignará como nuevo valor el blanco (255), los demás ND tomarán valores intermedios dentro de la escala de grises.

Muchas veces esta técnica no da una claridad óptima a la imagen, ya que la mayoría de los pixeles se encuentran dentro del grupo de los grises con una distribución aproximadamente normal, tendiendo a los valores bajos sobre todo en las primeras bandas.

2. Expansión lineal manual: En principio es lo mismo que la expansión lineal automática, solo que en este caso los valores máximo y mínimo los decide el usuario, por lo que el programa tendrá tres criterios:

$$Si \quad ND_{\max} > ND > ND_{\min} \quad NG = 255 \frac{NDi - ND_{\min}}{ND_{\max} - ND_{\min}}$$

Si  $ND_{m\acute{a}x} < ND$   $NG = 255$

Si  $ND_{m\acute{i}n} > ND$   $NG = 0$

3. Ecuación del histograma: Esta técnica considera la frecuencia de los ND que se presentan en la imagen, pretendiendo desplegar la imagen con el mismo número de píxeles asignados a cada nivel digital presente en la misma, generalmente con la restricción que los píxeles que se encuentren en la misma categoría no serán divididos en más de una categoría en la imagen resultante. Por lo anterior la expansión del histograma no es lineal, los ND con mayor número de píxeles serán los que proporcionalmente ocupen la mayor área en la imagen desplegada. El histograma resultante se “suaviza”, presentando picos menos pronunciados y el contraste aumenta en la imagen (Figura 2.8).

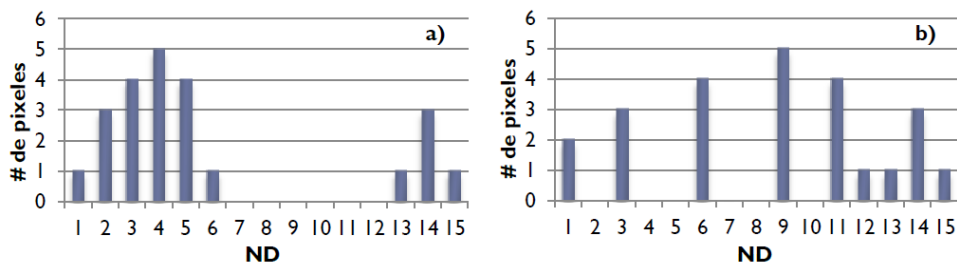


Figura 2.8: Ejemplo de histograma: a) Original

b) Ecuación. Basado en (Richards and Jia 2006)

### Filtrado de Imágenes Mediante Convulación

Son técnicas que pretenden resaltar o suprimir cierta información espacial, se les conoce también como técnicas de realce espacial. Estas modifican el valor original de un píxel basándose en la información que proporcionen los píxeles vecinos o circundantes. Las principales razones por las que se aplica un filtro son: corregir algún error durante la adquisición de la imagen o falla del sistema; y realzar características importantes de la imagen para extraer información a partir de ellas.

Consiste en la aplicación a cada píxel de una matriz de filtrado (conocida también como Kernel) de  $N \times N$  (números enteros, comúnmente de  $3 \times 3$ ,  $5 \times 5$ , etc), por lo que se genera un nuevo valor del píxel con información de los píxeles vecinos (Figura 2.8). Esta matriz se aplica secuencialmente a toda la imagen. Es una operación de **convolución**. El resultado final se divide entre un escalar, usualmente la suma de los Coeficientes de Filtrado (CF). La ecuación que se aplica se puede expresar de forma general para un Kernel de  $3 \times 3$  de la siguiente manera:

$$ND'_{i,j} = \frac{\sum_{m=-1}^1 \sum_{n=-1}^1 ND_{i+m,j+n} CF_{r+m,c+n}}{\sum_{m=-1}^1 \sum_{n=-1}^1 CF_{r+m,c+n}} \quad (2)$$

En donde

$ND_{ij}$  es el ND original del pixel  $i, j$ ;

$ND'_{ij}$  es el ND nuevo del pixel  $i, j$ ;

CF es el Coeficiente de Filtraje;

$r, c$  es el renglón y columna centrales de la matriz de filtrado.

Hay que tomar en cuenta que los bordes de la imagen no pueden procesarse, ya que la matriz de filtrado saldría fuera de la imagen. De este modo se pierden 2 filas y 2 columnas por imagen procesada.

Una imagen está formada por componentes de la frecuencia que varían de bajas frecuencias a altas frecuencias. Donde prevalecen transiciones rápidas de brillo, hay altas frecuencias espaciales, mientras que transiciones rápidas de brillo que cambian lentamente representan bajas frecuencias. Las altas frecuencias en una imagen aparecen toda vez que están presentes bordes abruptos o puntos, como una transición del blanco al negro dentro de uno o dos pixeles de distancia (Aldalur and Santamaría 2002).

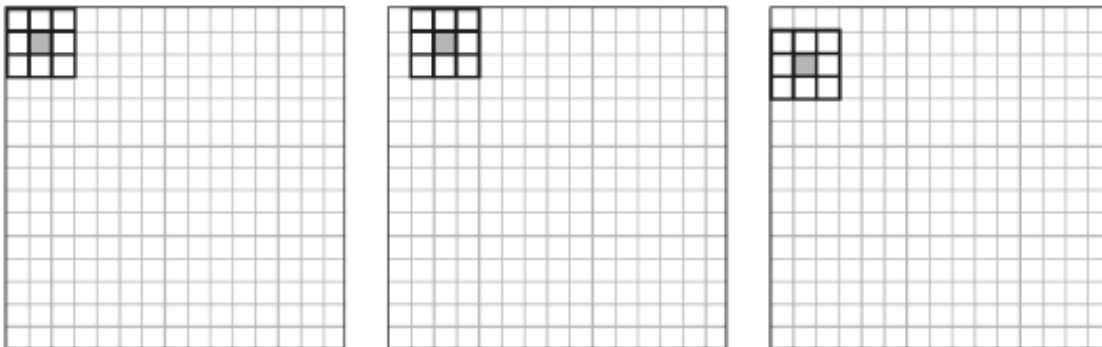


Figura 2.9: Matriz de filtrado móvil. El primer pixel resultante se calcula (izq). El siguiente resultante se calcula para la misma fila (centro), y cuando la fila se completa el proceso se repite para la siguiente fila (der). Basado en (Schowengerdt 2007).

### Filtros de Paso Bajo

Las imágenes pueden contener ruido aleatorio que afecta los niveles de brillantez de los pixeles, originando por la digitalización de la imagen en el sensor y la transmisión de los datos a tierra principalmente. Se observa en la imagen como una especie de punteado. Para eliminarlo, se suaviza la imagen homogeneizándola, es decir, se elimina la variabilidad asociada a los distintos tipos de cubiertas en la imagen uniformizando su respuesta.

Se utiliza principalmente para suavizar los errores aleatorios de una imagen o para reducir la variabilidad espacial de algunas categorías como paso previo a la clasificación (Vázquez 2000). Las frecuencias altas en la información (como los bordes) se perderán.

Existen varios tipos:

**Filtro de la media:** El valor del pixel central estará representado por la media de todos los pixeles de la matriz de filtrado. Ésta está formada por unos y el divisor es el número total de elementos de la misma, como se ve en la Figura 2.10.

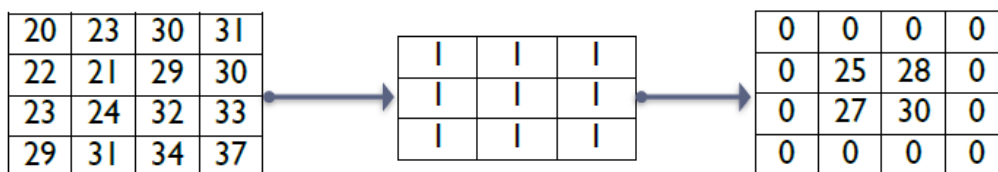


Figura 2.10: Filtro de media

**Filtro de la media ponderada:** el valor del pixel central estará representado por la media de todos los pixeles de la matriz de filtrado, pero dando más peso a un valor, generalmente al pixel central original. Con esto se evita suavizar demasiado la imagen, como se ve en la Figura 2.11.

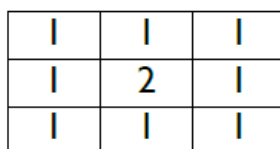


Figura 2.11: Filtro de media ponderada

**Filtro de la mediana:** El valor del pixel central estará representado por la mediana de todos los pixeles de la matriz de filtrado (Figura 2.12), teniendo como ventaja que los bordes no se suavizan tanto. Además es menos sensible a valores extremos (Richards and Jai 2006), debido a que los picos de ruido son valores atípicos en su vecindario por lo que se excluyen al momento de ordenar los datos y se minimizan su efecto. Consume un poco más de recursos el calcularlo porque el ordenador tiene que acomodar los diferentes valores incluidos en la ventana para determinar el valor central.

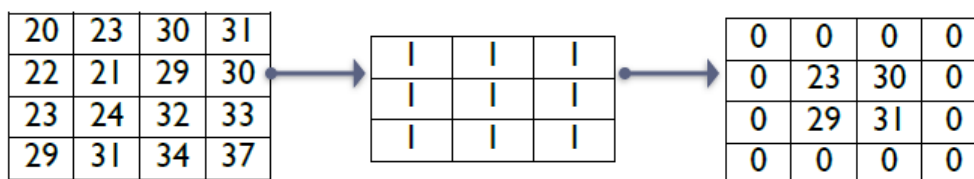


Figura 2.12: Filtro de mediana

### Filtros de Paso Alto

El realce de bordes es un medio particularmente simple y efectivo para incrementar los detalles geométricos de una imagen. Los bordes no son más que límites lineales en donde se presentan cambios bruscos en los ND. Los filtros de paso alto precisamente enfatizan los bordes al acentuar frecuencias altas y suprimir frecuencias bajas. Se distinguen principalmente:

**Filtros direccionales:** También son conocidos como filtros gradiente, se utilizan para detectar estructuras que siguen una determinada dirección en el espacio resaltando el contraste entre los pixeles situados a ambos lados de la estructura. Algunos ejemplos de matices de filtrado de este tipo se pueden observar en la Figura 2.13.

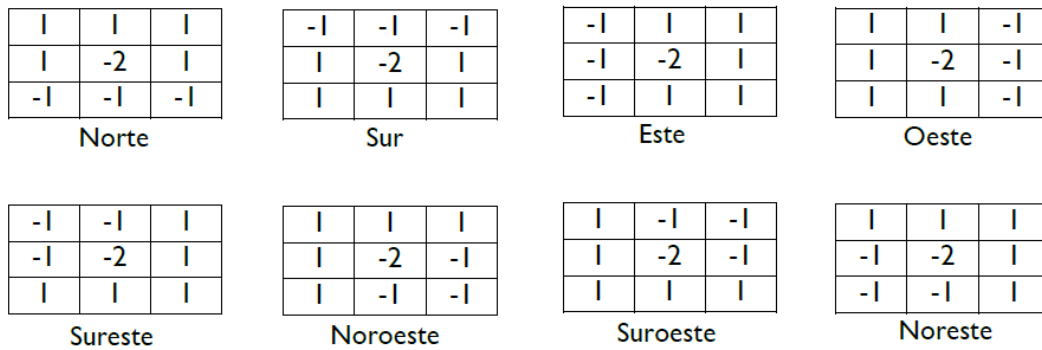


Figura 2.13: Distintos filtros direccionales.

**Filtros laplacianos:** Son omnidireccionales porque realzan características sin ninguna dirección en partículas de la imagen. Esta operación está basada en la tasa de cambio de la pendiente del brillo en un núcleo de pixeles de dimensión 3 x 3. Un ejemplo de un Kernel laplaciano se puede observar en la Figura 2.14.

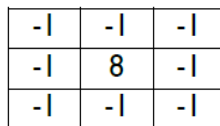


Figura 2.14: Ejemplo filtro laplaciano

Nótese que de esta manera en las zonas donde no haya mucha variabilidad en los valores de los ND, el valor de la operación será cercano a cero, y cuando hay frecuencias altas se maximiza la diferencia entre los pixeles vecinos.



**Filtro de gradiente:** Obtener el gradiente direccional o primera derivada es otra forma bastante común de detectar de forma relativamente eficaz los cambios significativos en los ND asociados a fronteras físicas en la escena como pueden ser una línea de costa o una carretera. Para datos de imágenes satelitales, no es posible obtener la derivada continua. En su lugar puede calcularse, en el caso unidireccional, el valor de la diferencia entre los píxeles adyacentes como derivada finita, y los mismos principios pueden extenderse para localizar fronteras con orientaciones arbitrarias en imágenes bidimensionales. En la Tabla 2.1 se muestran ejemplos de filtros de gradiente.

Tabla 2.1: Ejemplos de filtros de gradiente. Basado en (Schowengerdt 2007)

| Filtro         | Componente Horizontal   | Componente vertical   |
|----------------|---|---|
| <b>Roberts</b> | $\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$                         | $\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}$                         |
| <b>Sobel</b>   | $\begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$  | $\begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix}$  |
| <b>Prewitt</b> | $\begin{bmatrix} -1 & 1 & 1 \\ -1 & -2 & 1 \\ -1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$ | $\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$ |

**Operador Roberts:** Este operador utiliza las direcciones diagonales para calcular el vector gradiente, haciendo uso de las máscaras mostradas en la Tabla 2.1.

**Operador Sobel:** Este operador es el más empleado para detección de bordes. Una vez aplicados los dos Kernel (Tabla 1), se obtiene la magnitud haciendo uso de la ecuación (3).

$$|R| = \sqrt{Sx^2 + Sy^2} \quad (4)$$

**Operador Prewitt:** Este operador, al igual que el Sobel hace uso de dos matrices de 3 x 3, con la única diferencia que este operador no otorga una importancia especial a píxeles cercanos al centro de la máscara (Tabla 2.1).

## 2.5 Ventajas y Limitaciones de la Percepción Remota

El uso de la PR ha adquirido una gran importancia, como cualquier otra técnica la PR posee ciertas ventajas y desventajas frente a otras técnicas que son importantes considerar en función del estudio en el que se quiere aplicar.

Tabla 2.2: Ventajas y desventajas de la PR

| <b>VENTAJAS PR</b>  | <b>DESVENTAJAS PR</b>  |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"><li>• Visión sinóptica del medio, facilita análisis e interpretación.</li></ul>           | <ul style="list-style-type: none"><li>• Resolución espacial más pobre que técnicas directas.</li></ul>                 |
| <ul style="list-style-type: none"><li>• Disponibilidad de información, actualizada constantemente.</li></ul>                | <ul style="list-style-type: none"><li>• Interferencias entre el objeto y el sensor.</li></ul>                          |
| <ul style="list-style-type: none"><li>• Versatilidad en su aplicación en distintos campos.</li></ul>                        | <ul style="list-style-type: none"><li>• Alta dependencia de condiciones climatológicas.</li></ul>                      |
| <ul style="list-style-type: none"><li>• La topografía del lugar no limita a las plataformas aéreas o satelitales.</li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>• Sólo permite obtener información de la superficie del cuerpo.</li></ul>        |
| <ul style="list-style-type: none"><li>• Identificación de puntos críticos de manera rápida.</li></ul>                       | <ul style="list-style-type: none"><li>• Se requiere de personal capacitado para una interpretación correcta.</li></ul> |

## CAPÍTULO 3. MARCO TEÓRICO

La radiación electromagnética es el transmisor de la información de la PR, por lo que estudiar sus fundamentos teóricos tiene mucha importancia. Con la excepción de los objetos que poseen el cero absoluto, todos los objetos emiten radiación electromagnética, así mismo los objetos reflejan la radiación que es emitida por otros objetos. Gracias al registro de la radiación emitida o reflejada y aplicando el conocimiento de su comportamiento a medida que pasa esta radiación a través de la atmósfera terrestre e interactúa con los objetos, los analistas de PR han desarrollado conocimientos acerca de las características de la vegetación, suelo, agua y los cuerpos presentes en la superficie de la Tierra. La interpretación de las imágenes obtenidas por los sensores depende de un buen entendimiento de los principios de la radiación electromagnética y su interacción con los objetos y la atmósfera.

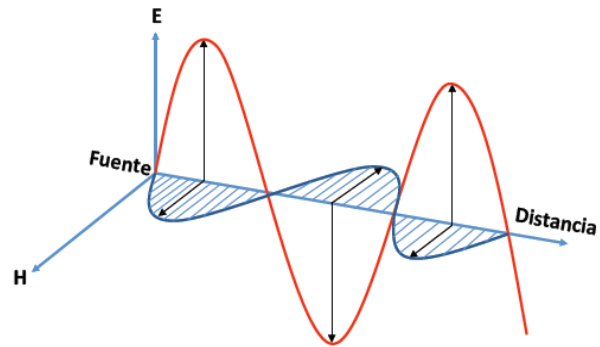


Figura 3.1: Componentes de la radiación electromagnética.

La presentación más común de la radiación electromagnética es la luz, que forma una pequeña pero importante parte del espectro electromagnético. Los grandes sectores de este espectro que se encuentran fuera del alcance del rango de la visión humana requieren nuestra especial atención.

La energía electromagnética es una entidad física que se manifiesta bajo dos aspectos complementarios entre sí: el ondulatorio y el corpuscular. La concepción ondulatoria permite explicar ciertos fenómenos como la reflexión y difracción, concibe a la radiación como un campo eléctrico y uno magnético oscilando en forma armónica en planos perpendiculares (Figura 3.1).

La energía electromagnética puede ser caracterizada mediante las siguientes propiedades:

1. **Longitud de onda:** Es la distancia que hay entre crestas de ondas sucesivas (Figura 3.2). La longitud de onda usualmente se representa con la letra griega lambda ( $\lambda$ ) y se mide en metros (m) o algún factor de metros.
2. **Frecuencia:** Esta es en función del número de ciclos de una onda que pasa por un punto fijo por unidad de tiempo (Figura 3.2). La frecuencia se mide en hertz (Hz), equivale a un ciclo por segundo, y varios múltiplos de hertz.
3. **Amplitud:** Es equivalente a la altura de cada pico (Figura 3.2). La amplitud normalmente se mide como nivel de energía (irradiancia espectral), expresada como watts por metro cuadrado por micrómetro.
4. **Fase:** La fase de una onda específica es la extensión con la cual el pico de una onda se alinea con el pico de otra. La fase se mide en unidades angulares, como grados o radianes. Si dos ondas están alineadas, oscilan juntas y se dice que están en fase. De lo contrario, si la

cresta de una onda esta alineada con la depresión de otras, se dice que están fuera de fase (Figura 3.2).

La velocidad de la energía electromagnética ( $c$ ) es constante e igual a  $3 \times 10^8$  km/s. La frecuencia ( $\nu$ ) y la longitud de onda ( $\lambda$ ) se relacionan con la siguiente expresión:

$$c = \lambda \nu \quad (5)$$

Con lo anterior, podemos decir que las características de la energía electromagnética pueden simplificarse usando la frecuencia o la longitud de onda.

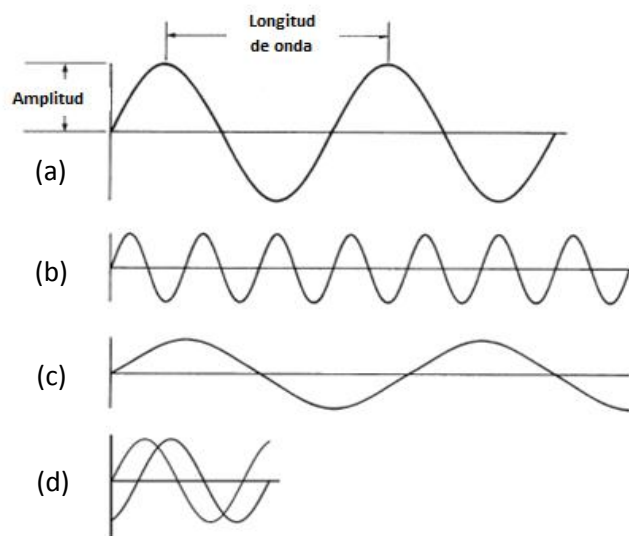


Figura 3.2: Amplitud, frecuencia, longitud de onda, (b) representa una alta frecuencia y una longitud de onda corta; (c) representa frecuencia corta y longitud de onda larga y (d) representa dos ondas que están fuera de fase. Basado en (Campbell)

### 3.1 Espectro Electromagnético

La interacción de las ondas electromagnética con las superficies y la atmósfera depende de la frecuencia de estas ondas (Elachi and van Zyl 2006). Lo más usual es caracterizar a las ondas electromagnéticas por su longitud de onda, por lo que ocupan una posición dentro del espectro electromagnético como se ve en la Figura 3.3.

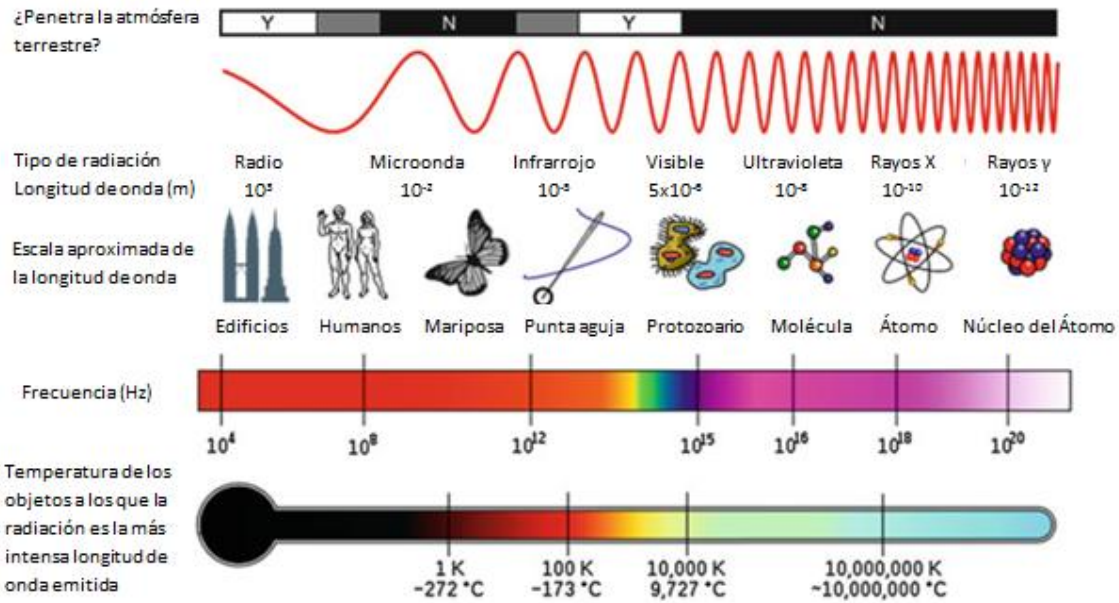


Figura 3.3: Espectro electromagnético. (NASA)

### División general del espectro electromagnético

Es una división definida un tanto arbitraria, el espectro completo de la energía solar no tiene divisiones tajantes como se indica en la Figura 3.3. Las divisiones se establecen por conveniencia y costumbre de las diferentes disciplinas (Campbell).

Tabla 3.1: División general del espectro electromagnético.

| DIVISIÓN           | LÍMITES          |
|--------------------|------------------|
| • Rayos gamma      | <0.03 nm         |
| • Rayos X          | 0.03 nm – 300 nm |
| • Ultravioleta     | 0.3 – 0.38 μm    |
| • Visible          | 0.38 – 0.72 μm   |
| • Infrarrojo       |                  |
| Infrarrojo próximo | 0.72 – 1.30 μm   |
| Infrarrojo medio   | 1.30 – 3.00 μm   |
| Infrarrojo lejano  | 7.00 – 1000 μm   |
| • Microondas       | 1 mm – 30 cm     |
| • Radio            | > 30 cm          |

La franja o porción visible es una pequeña región que abarca de 0.38 μm a 0.72 μm; el color azul se encuentra dentro del ámbito de 0.38 a 0.5 μm, el verde de 0.5 a 0.6 μm y el rojo de 0.6 a 0.72 μm. La porción de la energía UV se encuentra inmediatamente por debajo del color azul. Por encima del rojo se encuentra la región infrarroja (IR), dividida en tres categorías: IR próximo (0.72 a 1.30 μm), IR medio (1.30 a 3.00 μm) e IR lejano (7.00 a 1000 μm). La porción de microondas se encuentra ubicada en longitudes más grandes que van desde 1 mm a 30 cm.

Por otro lado, el modelo de partícula asume que la energía viaja como un flujo de partículas (fotones), es decir, que la radiación es la suma de muchos elementos discretos. La energía que transporta cada fotón depende del objeto que emite la radiación.

### Leyes de la radiación

La propagación de la energía electromagnética sigue ciertas leyes físicas. Isaac Newton fue el primero en reconocer a la luz como un objeto de estudio. Newton estableció que la luz era un arroyo de partículas minúsculas (“corpúsculos”) que viajaban en líneas rectas. Esta noción acerca de la luz es consistente con las teorías más modernas de **Max Planck** (1858-1947) y Albert Einstein (1879-1955). Planck descubrió que la energía electromagnética es absorbida y emitida en forma de fotón. El tamaño de cada fotón es directamente proporcional a la frecuencia de la radiación de energía. Así Planck definió una constante ( $h$ ) que relaciona la frecuencia ( $\nu$ ) y la energía ( $E$ ).

$$E = h \nu \quad (6)$$

Donde  $h = 6.626 \times 10^{-34}$  J s

Ambos modelos pueden ser relacionados haciendo simultáneas las ecuaciones (5) y (6), despejando  $\nu$  e igualando se tiene que:

$$E = \frac{h c}{\lambda} \quad (7)$$

Esto nos indica que a mayores longitudes de onda, habrá menor cantidad de energía. Esta razón explica porque es más fácil detectar ondas como las IR que las microondas.

La expresión que representa la emitancia de los cuerpos con una temperatura mayor al cero absoluto es conocida como **ecuación de radiación de Planck** y es una forma de obtener la máxima cantidad de energía que puede ser emitida por un objeto:

$$M_{\lambda} = \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{C_2/\lambda T} - 1)} \quad (8)$$

Donde:

$M_{\lambda}$  es emitancia radiante espectral ( $\text{Wm}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$ )

$C_1 = 3.74 \times 10^8 \text{ Wm}^{-2} \mu\text{m}^{-4}$  y

$C_2 = 1.44 \times 10^4 \mu\text{mK}$

Si se presenta en forma gráfica la ecuación (8), se observa que para cada temperatura existe una longitud de onda única en donde la emitancia es máxima (Véase cada una de las curvas de la Figura 23).

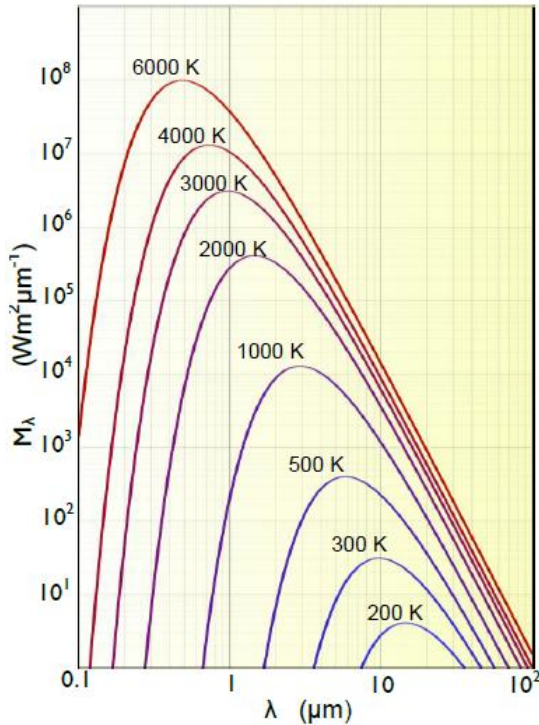


Figura 3.4: Emitancia radiante espectral de cuerpo negro a diferentes temperaturas. Basada en (Sepúlveda 2011)

Es importante hacer notar que la curva de 6000 K representa la temperatura aproximada del Sol y la curva de 300 K es la temperatura terrestre.

En el ámbito del espectro electromagnético que bordea la cresta de la curva correspondiente a la temperatura del Sol es precisamente el correspondiente a la región visible. Por otro lado, se observa en la misma gráfica que mientras más cortas sean las longitudes de onda estarán asociadas a la máxima emitancia de cuerpos de mayor temperatura.

El área bajo las curvas de la Figura 3.4 es la cantidad de energía que irradia un cuerpo por unidad de superficie integrada en todo el espectro electromagnético se expresa con la ley de **Stefan-Boltzmann** y depende principalmente de la temperatura del cuerpo en estudio. Esta ley define la relación entre el total de radiación emitida (M) y la temperatura (T).

$$W = \sigma T^4 \quad (9)$$

Donde se puede observar por la fórmula que la emitancia radiante (M) se incrementa de forma importante con el incremento de la temperatura.

Donde:

M es la emitancia radiante del objeto medida en  $Wm^{-2}$

$\Sigma = 5.6697 \times 10^8 Wm^{-2}k^{-4}$  (constante de Stefan-Boltzmann)

T es la temperatura absoluta en K

Por último en la **Ley de desplazamiento de Wien** especifica la relación entre la longitud de onda ( $\lambda$ ) de la radiación emitida y la temperatura del cuerpo negro (T).

$$\lambda_{max} = \frac{A}{T} \quad (10)$$

Donde:

A= 2898  $\mu mK$

$\lambda_{max}$ = Longitud de onda máxima

Esta longitud de onda se le conoce como predominante y es muy importante para la selección de la banda espectral o longitudes de onda más convenientes para el estudio y la detección de determinado fenómeno u objeto siempre y cuando conozcamos su temperatura.

Las tres leyes de radiación son importantes para el entendimiento de la radiación electromagnética. Cada una tiene una aplicación de importancia.

Cuando la radiación entra en contacto con la superficie terrestre puede presentar diferentes comportamientos:

- Una parte es reflejada con ángulo igual a la incidencia.
- Otra parte es reflejada uniformemente hacia todas las direcciones.
- Una parte es absorbida por el objeto y se calentará, luego esta será reflejada en la banda térmica hasta que se enfríe.
- Parte es transmitida a otros objetos o a la superficie de la Tierra sin ser reflejada hacia el sensor.

Al incidir la energía electromagnética ( $E_i$ ) sobre un cuerpo se descompone en tres: la reflejada ( $E_R$ ), la absorbida ( $E_A$ ) y la transmitida ( $E_T$ ); Figura 3.5. Aplicando el principio de conservación de la energía se tiene:

$$E_i(\lambda) = E_R(\lambda) + E_A(\lambda) + E_T(\lambda) \quad (11)$$

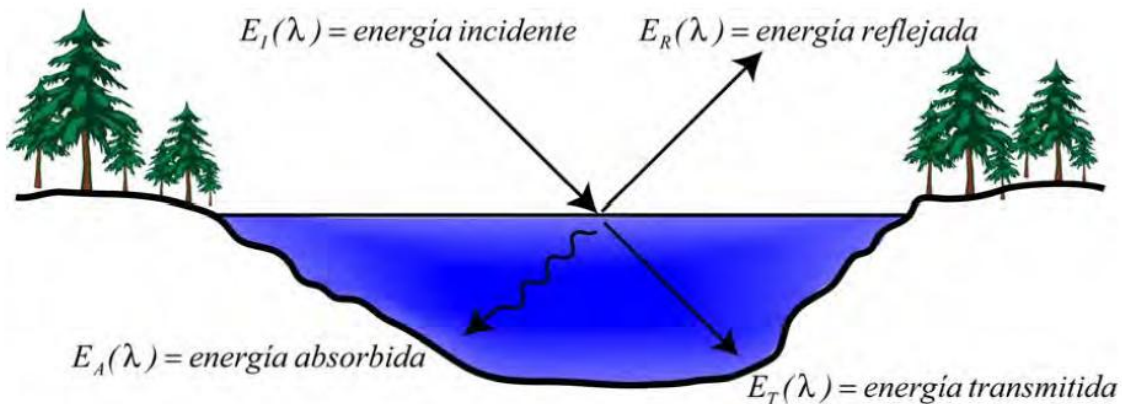


Figura 3.5: Interacción de la radiación con los materiales de la superficie terrestre.

Las diferencias en las proporciones de cada uno de estos tipos permiten discriminar entre objetos de diferente naturaleza.

Por otro lado, un cuerpo gris se define como aquel que no absorbe toda la radiación recibida, una parte es reflejada o transmitida. La proporción de cada uno de estos fenómenos está ligado con la composición química del material, de su forma y características externas, de la longitud de onda



de la energía incidente, del ángulo de iluminación de la escena, de las condiciones atmosféricas, la topografía de la cubierta, de la proximidad con otros objetos que modifican, agregando o restando energía. Cuando el flujo de energía incidente llega a la superficie pueden ocurrir los fenómenos de reflexión, transmisión y absorción:

La **reflexión** que presente de la energía incidente depende de la rugosidad de su superficie, por lo que se distinguen en dos tipos:

- Reflexión especular: Se da en superficies lisas y brillantes, en donde el ángulo de reflexión es igual al de incidencia.
- Reflexión difusa: se da en superficies que reflejan la radiación en todas direcciones. La situación ideal se presentaría cuando la radiancia desde la superficie es constante para cualquier ángulo de observación caso que se le da el nombre de **superficie Lambertiana**. Usualmente se considera que las superficies naturales se aproximan al comportamiento Lambertiano para simplificar los modelos de reflexión.

La capacidad de un material para reflejar parte de la energía incidente se mide mediante la reflectividad. La reflectividad se puede obtener mediante el cociente del flujo reflejado entre el flujo incidente.

La **transmisión** se da cuando la radiación pasa a través de un cuerpo sin una atenuación significativa. La capacidad de un medio para transmitir energía se mide como la transmitancia (Transmitancia es igual al flujo transmitido entre flujo incidente). La transmisión se puede dar en cuerpos opacos y transparentes a distintas longitudes de onda. Las hojas de las plantas, son opacas a la región del visible sin embargo en el infrarrojo transmiten una cantidad significativa de energía.

La **absorción** depende de las características del material, de su estructura interna y externa para retener la radiación incidente y transformarla en energía, que sumada a su energía interna constituye su emisividad. La absorción se mide por la absorción ( $A = \text{Flujo absorbido} / \text{Flujo incidente}$ ).

### 3.2 Firma Espectral

Todos los elementos geográficos (bosques, cultivos, ríos, lagos, edificios, etc.) transforman de forma diferenciada la radiación electromagnética que reciben del sol.

La variación de radiación reflejada en función de la longitud de onda se denomina firma espectral, es decir, la función que describe la cantidad de radiación reflejada, con respecto a la longitud de onda de dicha radiación, es la firma espectral de un objeto o elemento. Se pueden construir gráficas de reflectancia espectral contra longitud de onda, llamadas curvas de reflectancia o curvas espectrales (Vázquez 2000). De esta forma, al conocer la firma espectral de una superficie es

posible identificarla, detectar alteraciones en ella, o seleccionar las bandas más convenientes para estudiarla.

En la Figura 3.6 se muestran algunas firmas espectrales de las superficies terrestres más comunes. Para la curva del agua se aprecia que en las regiones en donde más refleja es en la del azul y la verde, aunque el porcentaje de reflectancia es escaso (no más del 10%). Fuera del visible, no refleja, y en el infrarrojo su absorbancia asciende rápidamente, por lo que al observar cuerpos de agua en bandas que correspondan a esta región pueden ser identificados fácilmente ya que se aprecian con niveles digitales muy bajos (siempre y cuando el agua no presente concentraciones significativas de algún contaminante que altere su firma espectral).

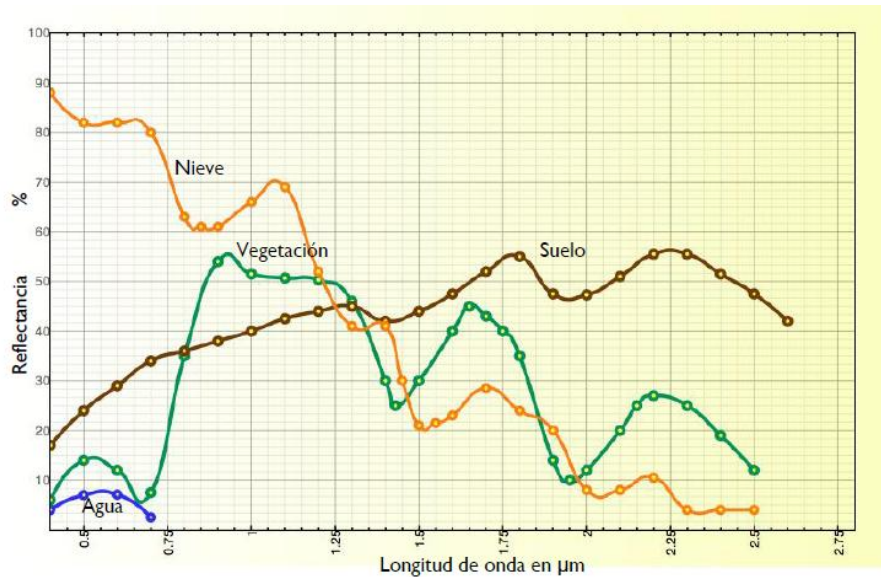


Figura 3.6: Curvas espectrales de agua, vegetación, suelo y nieve. Basado en (Sepúlveda 2011)

La superficie del agua absorbe o transmite gran parte de la radiación visible que recibe (0.4 – 0.7 µm), para longitudes de onda mayores la absorbancia se incrementa. La mayor reflectancia del agua clara se produce en las longitudes del azul y el verde (0.46 – 0.57 µm), disminuyendo gradualmente hasta ser prácticamente nula en el infrarrojo cercano. Con sólidos en suspensión, clorofila o con la eutrofización del agua, la reflectancia aumenta y se puede distinguir perfectamente su respuesta en el infrarrojo cercano.

### 3.3 Interacción y Corrección Atmosférica

La atmósfera está compuesta principalmente por nitrógeno y oxígeno molecular (aire limpio y seco), además de vapor de agua y partículas (aerosoles) como el polvo, hollín, gotas pequeñas de agua y cristales de hielo. La radiación electromagnética detectada por los sensores se ve afectada por los agentes nombrados.

Algunos tipos de radiación electromagnética pasan fácilmente a través de la atmósfera, mientras otros tipos no pueden. La capacidad de la atmósfera de permitir el paso de la radiación se le conoce como transmisibilidad. La transmisibilidad de la radiación a través de la atmósfera promedio sin cobertura de nubes varía con la longitud de onda de la radiación. La atmósfera es opaca a longitudes de onda cortas (radiación de alta energía) como lo son la radiación ultravioleta, los rayos gamma y los rayos X (Aguirre 2002). La atmósfera también absorbe energía en bandas de longitudes de onda específicas, especialmente en las regiones del infrarrojo y de las microondas.

Como se había mencionado anteriormente, la atmósfera influye sobre la radiación solar antes de que incida sobre un objeto y también antes de que la radiación solar reflejada o la radiación emitida por un objeto sea captada por el sensor. Esta influencia se manifiesta a través de diversos efectos:

- Absorción

Desde este punto de vista los absorbentes más eficaces de radiación solar es el agua, dióxido de carbono y ozono. La absorción selectiva de ciertas longitudes de onda por estas moléculas hace que la atmósfera constituya un medio opaco para ciertos rangos espectrales, mientras que ofrezca ventanas libres de absorción para otros rangos. A través de dichas ventanas los satélites captan la radiación en el sensor.

Los principales gases causantes de esta absorción son (Chuvienco, 2008):

- Oxígeno atómico ( $O_2$ ), que filtra las radiaciones ultravioleta por debajo de  $0.1 \mu m$ , así como pequeños sectores en infrarrojo térmico y las microondas.
- Ozono ( $O_3$ ), responsable de la eliminación de la energía ultravioleta, inferior a  $0.3 \mu m$ , así como en un sector de las microondas (en torno a  $27 mm$ ).
- Vapor de agua ( $H_2O$ ), con una fuerte absorción en torno a  $6 mm$ , por encima de  $27 mm$  y otras menores entre  $0.6$  y  $2 \mu m$ .
- Dióxido de carbono ( $CO_2$ ), que absorbe en el infrarrojo térmico ( $> 15 \mu m$ ), con importantes efectos en el infrarrojo medio, entre  $2.5$  y  $4.5 \mu m$ .
- Aerosoles atmosféricos, que principalmente absorben en el espectro visible.

En la Figura 3.7 se ilustra la transmisibilidad atmosférica a distintas longitudes de onda del espectro electromagnético. En algunos intervalos del espectro se aprecia que la atmósfera es completamente opaca o muy opaca, esos intervalos no son adecuados para utilizarlos en el estudio de PR. Por otro lado, los intervalos en los que hay una transmisibilidad adecuada para la PR, se les conoce como ventanas atmosféricas (de Jong 2005).

- Dispersión: la dispersión es un fenómeno producido por la presencia de partículas en la atmósfera, debidas al gas, agua y humo. Dependiendo de su tamaño producirá, la dispersión selectiva y no selectiva, a su vez se dividen en:

- Dispersión de Rayleigh (selectiva): Es producida cuando el tamaño de las partículas es menor que la longitud de onda incidente ( $d < \lambda$ ), el color azul y naranja del cielo se debe a este fenómeno. Se da entre los 5000 a 10000 m de altura.
  - Dispersión Mie (selectiva): Ocurre cuando las longitudes de onda de la radiación incidente son similares al tamaño de las partículas atmosféricas ( $d \approx \lambda$ , aerosoles: una mezcla de gases, vapor de agua y polvo). Influye desde el ultravioleta cercano hasta el infrarrojo cercano. Se realiza bajo los 5000 m de altura.
  - No selectiva: es independiente de la longitud de onda incidente, se produce cuando el tamaño de las partículas es mayor a la longitud de onda ( $d > \lambda$ ). Esta dispersión explica el color blanco de las nubes, es producida por el vapor de agua, para las longitudes de onda inferiores a 15 mm. Gotas de agua, cristales de hielo, arco iris, corona, halos.
- Emisión: de acuerdo a la ley de Wien, las nubes emiten radiación principalmente en el infrarrojo térmico, diferente a la terrestre debido a su menor temperatura, por lo que se superpone a la terrestre en esa región del espectro. Cuando se analizan las imágenes en el infrarrojo próximo, resulta difícil estimar la temperatura de la superficie terrestre, la radiación que llega al satélite contiene la emisión tanto de la superficie terrestre como de las diferentes capas de la atmósfera y es complicado distinguir un efecto del otro.

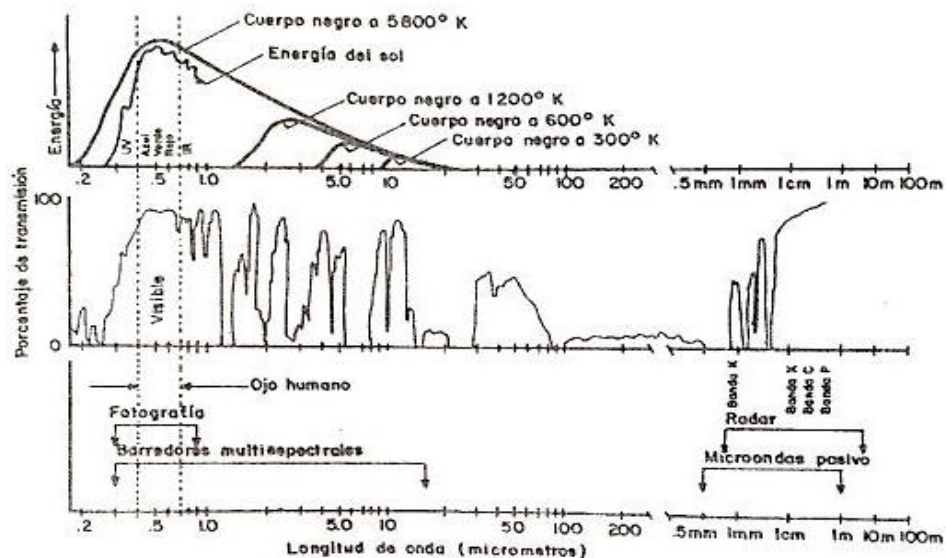


Figura 3.7: Ventanas Atmosféricas, transmisibilidad atmosférica de la radiación solar en función de la longitud de onda. (Aguirre 2002)

El principal problema de esta dispersión es su carácter heterogéneo, en el espacio y tiempo (Chuvieco 2008), es decir, la dispersión atmosférica no es constante en la imagen, ya que pueden existir otras zonas que se vean más afectadas que otras, en función de la concentración de los

aerosoles y vapor de agua. Realizar una rigurosa corrección atmosférica resulta sumamente complejo, ya que se requeriría una serie de medidas simultáneas al momento de la adquisición de dichas imágenes.

A pesar de esta limitante es necesario realizar una estimación del afecto atmosférico para el caso que se requiera establecer modelos que relaciones los ND con parámetros físicos como la temperatura, biomasa, humedad del suelo, clorofila en el agua, sólidos suspendidos totales, etc. y cuando se realicen estudios multitemporales, debido a que la dispersión sufrida por una imagen no es la misma que experimenta otra adquirida en distinta fecha.

Uno de los métodos más empleados para la estimación del efecto de dispersión que produce la atmósfera, es el que se denomina “Corrección del histograma por sus valores mínimos” (Chávez 1996), en el cual se establece las áreas con una fuerte absorbancia como pueden ser cuerpos de agua o sombras deberían presentar una radiancia espectral muy baja cercana a cero, por lo que mediante un análisis del histograma se puede determinar estos valores mínimos que corresponderían al efecto de dispersión atmosférica. En consecuencia una sencilla aproximación a la corrección atmosférica consiste en restar a todos los ND de cada banda el ND mínimo de la misma banda, produciendo que el histograma se recorra.

### 3.4 Sistemas de Información Geográfica

Los sistemas de información geográfica (SIG en lo sucesivo) son un caso especial de sistemas de información; están diseñados para trabajar con información organizada en bases de datos y georreferenciada a una unidad de análisis espacial a través de sus coordenadas geográficas, por lo que tienen la capacidad de representar en un mapa las variables contenidas en esas bases de datos, una vez analizada la información mediante un conjunto de operaciones y de funciones definidas previamente.

Podemos decir que un sistema de información geográfica es una herramienta basada en computadora y utilizada para mapear y analizar eventos que ocurren en un área geográfica. La tecnología de estos sistemas integra operaciones de bases de datos, tales como consultas y análisis estadístico, con la visualización y el análisis geográfico que ofrecen los mapas; estas habilidades los distinguen de otros sistemas de información ya

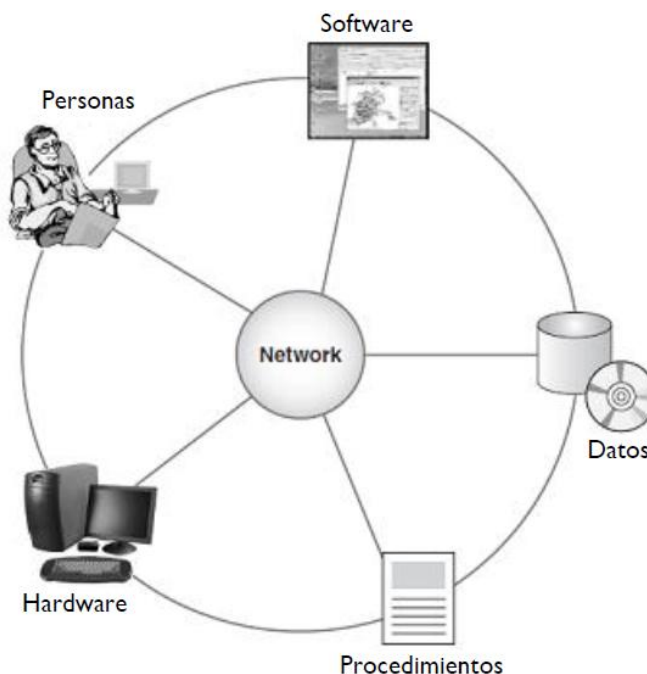


Figura 3.8: Componentes fundamentales del SIG. Modificado de (Kemp 2008)

que se pueden explicar eventos y planear estrategias.

### **Componentes de un SIG**

Los SIG están integrados por cinco componentes fundamentales: hardware, software, datos, personas y procedimientos (Figura 3.8).

El hardware se refiere a la computadora en la cual operará el SIG. Actualmente, estos sistemas pueden ser ejecutados en una amplia variedad de hardware, desde servidores de computadoras centralizados, hasta computadoras de escritorio utilizadas en configuraciones individuales o conectadas en red. Una organización requiere de un hardware específico para cumplir las necesidades de la aplicación. Algunas cosas que se deben considerar son, a saber: la velocidad, el costo, el soporte técnico, la administración, la escalabilidad y la seguridad.

El software de un SIG proporciona las funciones y herramientas necesarias para almacenar, analizar y desplegar información geográfica. Los componentes claves del software son: a) un sistema de manejo de base de datos (SMBD), b) las herramientas para la entrada y manipulación de información geográfica; c) las herramientas de soporte para consultas, análisis y visualización geográfica, y d) una interface gráfica de usuario (GUI, por sus siglas en inglés) para un fácil acceso a las herramientas.

El componente más importante de un SIG son los datos. La recolección de los datos es un proceso largo que frecuentemente demora el desarrollo de productos que pueden utilizarse para justificar la inversión. Los datos geográficos y los datos tabulares relacionados pueden obtenerse por medio de una fuente propia o a través de un proveedor comercial de datos. La mayoría de los SIG emplean un SMBD para crear y mantener una base de datos para ayudar a organizar y manejar dichos datos.

La tecnología de los SIG es de valor limitado sin el personal que maneje el sistema y desarrolle planes que se apliquen a los problemas del mundo real. Frecuentemente subestimados, sin gente, los datos no se actualizan y se manejan equivocadamente; además, el hardware no se utiliza en todo su potencial. Sin embargo, los usuarios de SIG varían y van desde especialistas técnicos, que diseñan y mantienen los sistemas, hasta aquellos que lo utilizan para ayudar a realizar sus tareas diarias.

En cuanto a los métodos, el éxito en la operación de los SIG debe estar acorde con un buen diseño en la planeación y con las reglas de operación de la organización, pues son los modelos prácticos de operaciones únicas para cada organización.

### **SIG existentes**

Existe una gran variedad de software SIG en el mercado. Entre los más utilizados se hallan los siguientes:

## ArcView

Es uno de los más utilizados del mundo; posee esencialmente capacidades para producir mapas y análisis espacial. ArcView permite organizar los datos utilizando bases de datos espaciales al responder a cuestionamientos de índole espacial y alfa numérica de una forma integrada al crear nuevos datos geográficos a partir de los datos existentes. Este SIG es utilizado por técnicos de diferentes especialidades, y pone a su alcance capacidades de análisis sofisticadas. Es un producto que no es muy caro, fácil de utilizar y está especialmente diseñado para trabajar en ambiente Windows; es por eso que no compite directamente con ARC/INFO, un producto que funciona en ambiente UNIX y que ofrece mucho más potencialidad en el área de diseño de mapas.

ArcView lee los formatos más comunes de bases de datos y de mapas. Los datos de mapas pueden ser leídos directamente en formato shapefile (o formato abierto de ArcView), ARC/INFO, PCARC/INFO, ArcCAD, AutoCAD (DXF y DWG), Intergraph (DGN) y VPF (con extensión VPF Reader), o importados de formatos MapInfo, Atlas GIS y ASCII.

## MapObject

MapObject es un conjunto de componentes SIG que incluye un control ActiveX (OCX) y más de treinta objetos de automatización ActiveX. MapObject trabaja en ambientes de desenvolvimiento estándar, como Visual Basic, Delphi y Visual C++.

Con MapObject se puede hacer una serie de operaciones tipo zoom; puede visualizar mapas, efectuar análisis espaciales, utilizar bases de datos relacionales y consultas en SQL, realizar geocodificación y visualizar acontecimientos en tiempo real con sistemas de posicionamiento global (GPS). MapObjects utiliza datos geográficos en formatos shape de ArcView, ARC/INFO y capas SDE (Spatial Database Engine). Permite también utilizar varios formatos de imágenes.

## AutoCAD Map

AutoCAD Map es un sistema que tiene como principal objetivo la producción de mapas en PC. Permite integrar varios tipos de datos en formatos gráficos, así como también hacer análisis espacial.

## AutoDesk World

AutoDesk World es una solución flexible que hace posible reunir datos de varias fuentes. Este software permite crear y editar diseños, analizar datos y filtros de selección, personalizar interfaces y hacer ligas potentes a bases de datos. Su principal característica es la facilidad que tiene para integrar mapas a la base de datos.

## MapInfo Profesional

MapInfo Profesional es un SIG con potencialidades semejantes a las de ArcView, que admite la visualización de datos geográficos, el análisis de esos datos y la impresión de mapas. El lenguaje de desarrollo ligado a este producto es Map Basic, que puede personalizar a MapInfo, integrarlo a

otras aplicaciones y aumentar su potencialidad base. MapInfo permite realizar análisis elaborados y gestión de bases de datos relacionales; por ejemplo, encontrar en un mapa una dirección, un código postal u otro elemento cualquiera, calcular distancias áreas o perímetros, crear o modificar mapas, etcétera, ya que puede trabajar con una gran variedad de datos. La creación de mapas y el análisis geográfico no son nuevos; sin embargo, los SIG transforman esas tareas más rápidamente que los viejos métodos manuales. Antes de la aparición de estos sistemas, sólo algunas personas tenían la habilidad necesaria para usar información geográfica con el fin de auxiliarse en la toma de decisiones y la solución a los problemas. Hoy en día, la industria SIG emplea a cientos de miles de personas en el mundo; de esta forma, los profesionales en todos los campos están cada vez más conscientes de las ventajas de pensar y trabajar geográficamente.

#### *Relación entre la energía emitida por el agua y su temperatura*

Las mediciones con equipo de PR para la temperatura del agua son hechas con un sensor que detecta radiación térmica (con bandas de longitud de onda: 3-5 y 8-14  $\mu\text{m}$ ) emitidas de la superficie del agua (Anderson y Wilson 1984). Definimos la temperatura superficial del agua medida por análisis de PR con un sensor térmico, como la temperatura radiante del agua en contraposición de la temperatura cinética del agua medida 10 cm por debajo de la superficie con un termómetro. Las medidas de la temperatura radiante del agua son representativas de la temperatura cinética cuando la columna de agua está bien mezclada y los gradientes térmicos no están en función de la profundidad.

Los factores que influyen las mediciones de la temperatura radiante del agua son emisividad (es la proporción de radiación térmica emitida por una superficie u objeto debida a su temperatura), absorción atmosférica, reflectancia de TIR y características superficiales (Smith et al., 1996). La emisividad describe la absorción actual y las propiedades de emisión de la superficie del agua a una temperatura determinada que forma un cuerpo negro a la misma temperatura (Avery y Berlin, 1992). Ya que el agua tiene una emisividad muy cercana a 1.0 y tiene una gran inercia térmica, es relativamente fácil obtener las mediciones de la temperatura radiante del agua en comparación a superficies de suelo. Los efectos atmosféricos pueden ser corregidos a base de contenido de vapor de agua y la transmisión en la trayectoria del objetivo del sensor, pero las refracciones de TIR pueden ser complicadas en la precisión de las medidas de temperatura, ya que las mediciones de los sensores térmicos de la radiación de onda larga son emitidos y reflejados desde la superficie del agua. De esta forma, la radiación emitida transmite información de la temperatura de la superficie del agua por sí sola, así como la radiación se refleja desde sus alrededores.



## CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA

### 4.1 Sitio de Estudio

Para este trabajo se seleccionó la descarga térmica de la Central Nucleoeléctrica de Laguna Verde (CNLV), la cual se encuentra en el Golfo de México (GM).

La CNLV se encuentra ubicada sobre la costa del Golfo de México en el km 43.5 de la carretera federal Cardel-Nautla, en la localidad denominada Punta Limón municipio de Alto Lucero de Gutiérrez Barrios, estado de Veracruz, cuenta con un área de 370 ha; geográficamente situada a 60.8 km al noreste de la ciudad de Xalapa, 72 km al noroeste de la Ciudad de Veracruz y a 272 km al noreste de la Ciudad de México. En los  $19^{\circ} 43' 30''$  latitud Norte y los  $96^{\circ} 23' 15''$  longitud Oeste (Figura 4.1). El centro urbano más cercano a la Central, vía terrestre, es José Cardel (45 km).

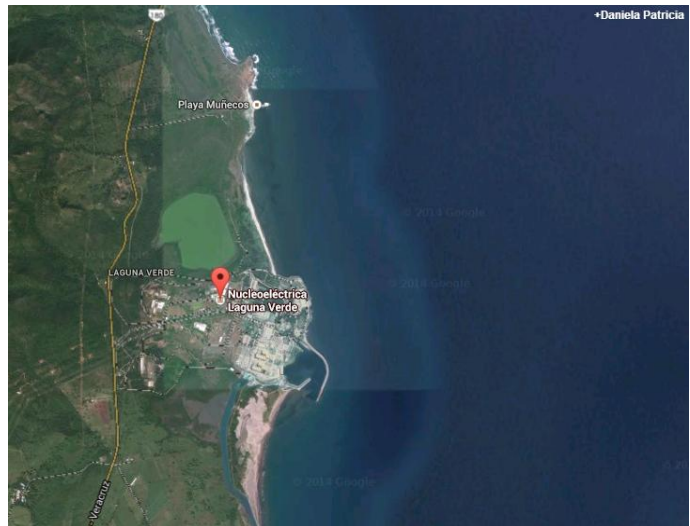


Figura 4.1: Localización de la CNLV

La CNLV pertenece al gobierno Federal de México y es administrada por la Comisión Federal de Electricidad (CFE), a través de la Gerencia de Centrales Nucleoeléctricas. Además está sujeta a la supervisión de organismos tanto nacionales como internacionales, que tienen como objetivo asegurar que la Central sea operada de forma segura, cumpliendo con las regulaciones nucleares nacionales e internacionales.

La CNLV está flanqueada por las cuencas de los ríos Barranca Hernández y El Viejón (éste último conocido también como río Paso Limón), el río Barranca Hernández tiene su desembocadura en el GM, 5 km al Norte del sitio; el río El Viejón desemboca también en el GM, 3 km al Sur del sitio donde se localiza la CNLV. Así mismo se tiene la presencia de dos lagunas denominadas Verde y Salada que colindan con el sitio, Laguna Verde se localiza en la porción Norte del sitio entre la CNLV y el río Barranca Hernández. La laguna Salada se localiza en la porción Sur del sitio entre la CNLV y el río El Viejón.

## **Descripción general de la CNLV**

### ***Operación normal de la central***

#### *El ciclo directo de BWR (Bowling Water Reactor)*

La CNLV cuenta con dos unidades idénticas, cada unidad dispone de un reactor BWR/5. El vapor es producido dentro del reactor a una presión que va desde 66.1 kg/cm<sup>2</sup> a 71.7 kg/cm<sup>2</sup> (de 1% a 100% de potencia) y a unos 285 °C. Dentro de los ensambles de combustibles se localizan las pastillas de óxido de uranio enriquecido, aquí es donde se produce la fisión nuclear.

El vapor producido en el núcleo tiene una calidad 15% en una relación de 1 T/s de vapor y aproximadamente 6 T/s de humedad a 100% de potencia

Una vez que el vapor pasa por las turbinas de baja presión va al condensador, donde es introducida agua de mar, ésta es succionada de la bahía a través de cuatro bombas, mismas que la envían por túneles hasta las cajas de agua del condensador, allí por dentro de miles de tubos de cobre níquel de aproximadamente 1" de diámetro se propicia el intercambio de calor, por fuera de los tubos está el cuerpo del condensador donde se sostiene un vacío y así el vapor al tocar las paredes frías de los tubos de cobre níquel del condensador propician la condensación del vapor obteniéndose agua y gases; el agua es succionada del pozo caliente del condensador y es enviada otra vez como agua de alimentación al reactor; los gases no condensables como el hidrógeno, oxígeno, helio, argón, kriptón, etc., se succionan del condensador a través del sistema de remoción de aire y gases, el cual los descarga al sistema de recombinación de hidrógeno/oxígeno y tratamiento de gases radioactivos; el hidrógeno se recombina con el oxígeno para evitar reacciones explosivas y los gases radioactivos se tratan para bajar su actividad y finalmente ser descargados a la atmósfera bajo los controles apropiados.

#### *La operación normal*

Fundamentalmente involucra cuatro etapas la primera llamada Operación de Arranque de la Central, donde el selector de modo del reactor se localiza en la posición Arranque y es la etapa que inicia teniendo todas las 109 barras de control totalmente insertadas dentro del núcleo del reactor, la vasija del reactor con agua fría y abajo del nivel normal, las dos bombas de recirculación (RRC) en baja velocidad y sus válvulas de control de flujo en mínima posición; la instrumentación nuclear operables y dentro del núcleo, con cuatro monitores de neutrones a rango de fuente, ocho detectores de rango intermedio (IRM'S) y 96 detectores a rango de potencia local (LPRM'S); debe contarse con los sistemas que harán extraer cada una de las 109 barras de control (BC), tales como el control manual del reactor (RMC), el sistema CRDH que inyecta agua a muy alta presión para que a través de cada una de las 109 unidades de control hidráulico (HCU) se pueden extraer o insertar las BC, obedeciendo a señales eléctricas iniciadas por el operador a través del control manual del reactor.

El sistema hace vacío en el condensador (AR), los sistemas de enfriamiento a los sistemas auxiliares del turbogenerador (TSW y TCCW) y Reactor (NSW y NCCW), asimismo operables también

el sistema de lubricación de la turbina, el sistema Electro-Hidráulico del turbogenerador, el EHC, el cual se encontrará en modo 1. En el camino del vapor principal y 4 válvulas de corte, totalmente abiertas, pero las 2 válvulas de paro y 4 gobernadoras completamente cerradas; y las válvulas de bypass también cerradas siempre que el ajuste de presión EHC permanezca arriba de la presión real del reactor, porque si ésta última sobrepasa al ajuste, el bypass abrirá, tirando exceso de vapor al condensador.

Al sacar las primeras BC las fisiones (el reactor se hace supercrítico) pero no logran sostenerse por sí solas, será hasta que se tengan aproximadamente la mitad de las 109 BC totalmente extraídas.

Una vez que el reactor se hace crítico por primera vez, lo que continúa es el calentamiento y presurización del reactor y líneas de vapor. El calentamiento aparece porque al continuar extrayendo BC se incrementa la potencia, y así el agua llega a los 100 °C y empieza a producirse hervido a presión atmosférica, de aquí en adelante toda extracción de BC producirá incrementos de temperatura con sus correspondientes incrementos de presión, en esta fase es importante conservar el calentamiento con incrementos de temperatura no mayores a 55 °C/hora. En estas condiciones el sistema que regula la presión del reactor es el EHC, el cual en su ajuste de presión inicia con 10 kg/cm<sup>2</sup> y si la presión del reactor se acerca a 10 kg/cm<sup>2</sup> el operador del turbogenerador deberá aumentar el valor de ajuste de presión a 3.5 kg/cm<sup>2</sup> arriba; una vez que se alcanzan unos 66.1 kg/cm<sup>2</sup> se puede iniciar el rodado y calentamiento del turbogenerador, e ir de 1.7 RPM hasta 1800 RPM para este tipo de potencia del reactor andará en menos de 1% el ajuste de presión del EHC se dejará en 66.8 kg/cm<sup>2</sup> mientras el operador del reactor continuará extrayendo BC para incrementar la potencia permitiendo que todo el exceso de vapor sea desfogado al condensador a través del bypass hasta que se alcance el permisivo de sincronización del generador el cual ocurre a 15% de potencia del reactor.

### ***Operación a potencia***

Cuando ya se tiene el permisivo para conectar el generador a la Red Eléctrica el SMR está ya en marcha; el operador del reactor deja momentáneamente de extraer BC, la turbina estará rodando a 1800 RPM, el voltaje del generador ligeramente mayor a 22000 Volts, la frecuencia 60 Hz, el bypass abierto para dejar pasar 15% del vapor al condensador; cuando el generador es conectado a la red, en automático empieza a dar un 5% de carga eléctrica, con lo que las válvulas de bypass sólo dejan pasar el 10% al condensador y el EHC se colocará en modo 3.

El operador del turbogenerador en el panel del EHC incrementará el ajuste de carga eléctrica hasta que el bypass cierre totalmente, esto ocurrirá cuando el generador esté dando 15% de potencia, al momento de cerrarse el bypass el EHC se ubicará en modo 4, de aquí en adelante primero el operador del turbogenerador aumentará el ajuste de carga eléctrica en el EHC, es decir las válvulas de gobierno tendrán permisivo para abrir pero no lo harán hasta que la presión del reactor aumente, y eso sólo ocurre cuando se aumenta la potencia del reactor, ya sea extrayendo BC o aumentando el flujo de la recirculación. Una vez que el EHC detecta mayor presión que la del

ajuste, inicia la apertura de las válvulas de gobierno permitiendo mayor paso de vapor y con ello aumentando la potencia de salida del generador.

Estando en modo 4 del EHC y partiendo del 15% de potencia del generador, se debe ir aumentando la potencia de la Central paulatinamente; al 30% se cambiará la alimentación eléctrica de las bombas del RRC de 15 a 60 Hz, al 57% se alcanzará el patrón de BC y hasta este valor de potencia todos los aumentos han sido realizados extrayendo BC; de 57% en adelante se usará el incremento en la recirculación para llegar hasta el 100% de potencia de la Central.

Se procurará y será objetivo de operación mantener la central en condición del 100% el mayor tiempo posible, esperando que aproximadamente a los 12 meses hacer una parada programada para realizar la recarga de combustible y el mantenimiento de la Central.

El proceso de reducción de potencia en términos generales es a la inversa que la subida de potencia, una vez que se alcanza la potencia cero y las BC en 00 el SMR puede ser pasado a parada, y una vez que se alcanza una temperatura menor en el SMR se puede pasar a recarga iniciando la cuarta etapa de la operación normal de la Central Laguna Verde. Esta puede utilizar unos 45 días, donde se aprovecha para sacar del reactor el combustible gastado. También se aprovecha esta etapa para realizar el mantenimiento general de la Central y los cambios o modificaciones necesarios a la Central.

#### ***Operación en transitorios y accidentes***

Se tiene todo un esquema de sistemas, componentes y estructuras enfocados solamente a la atención de emergencias para garantizar las tres barreras físicas más importantes que evitan liberación de material radioactivo al medio ambiente, la primera corresponde a la pared metálica (Zicra-loy-2) del combustible, la segunda mitad a la frontera de presión refrigerante del reactor y la tercera a la contención primaria. Las acciones de seguridad más importantes durante un evento anormal, cualquiera que este sea, son en función de su prioridad:

1. Parar las fisiones nucleares.
2. Despresurizar el reactor.
3. Enfriar el reactor.
4. Cerrar la contención primaria y secundaria.
5. Mantener las condiciones anteriores y propiciar el enfriamiento adecuado y sostenido del reactor y contención primaria.

## **Sistema de disipación del calor de la CNLV**

### ✓ Conceptos de sistema

Las instalaciones para disipación de calor para la CNLV corresponden a un sistema que consta en una obra de toma y una obra de descarga en la orilla del mar en el GM. Todas las funciones para disposición de calor son realizadas por este sistema; provee remoción de calor de los condensadores primarios y de los intercambiadores de calor del agua de servicio.

El agua de enfriamiento es tomada y regresada a las aguas del GM en las estructuras de toma y descarga localizadas al este y sureste de la CNLV respectivamente.

### ✓ Especificaciones generales

El sistema de disipación de calor para la CNLV utiliza un completo sistema de enfriamiento con agua de mar y está diseñado para proveer todos los requerimientos de remoción de calor para las dos unidades de la planta.

Para este propósito de enfriamiento la cantidad de agua de mar utilizada es de 3780 m<sup>3</sup>/min para ambas unidades. Este gasto será mantenido durante operación normal en todo el año. Toda el agua de enfriamiento es obtenida de las aguas del GM por una casa de bombas localizada a 260 m al este de los edificios de los reactores; fluye a través de 2 túneles con una velocidad de 3.46 m/s.

Cada unidad está provista de un condensador principal; la temperatura del agua de circulación se incrementa 10°C a su paso a través del condensador. El tiempo de viaje a través de condensador es cerca de 5.8 s. habiendo pasado por los condensadores, el agua de enfriamiento fluye aproximadamente 217 m en la unidad 2 y 52 m en la unidad 1, a través de los túneles de descarga, hasta la estructura de descarga y de ahí hacia el mar por un canal abierto de 1680 m de longitud.

El tiempo de recorrido a través del túnel de descarga de la unidad 1 es de 16.45 s (velocidad= 3.16 m/s) y de 78 s para el túnel de descarga de la unidad 2 (velocidad= 2.78 m/s). Finalmente el tiempo de recorrido a través del canal de descarga hacia el mar, es de 43 minutos con una velocidad de 0.65 m/s.

### ✓ **Sistema de Toma**

El sistema incluye: una superficie de calma creada por dos escolleras, dos estructuras que forman las casas de bombas, una para el sistema de agua de circulación y otra para el sistema de agua de servicio nuclear; así como dos túneles que transportarán al agua a los condensadores y distintos subsistemas.

### ✓ **Sistema de Descarga**

El diseño del Sistema de Descarga tiene como objetivo el transportar las aguas de los sistemas de la CNLV hasta su descarga al mar.

- Estructuras de los Vertedores de descarga

Se localizan en la esquina este de la costa norte de la Laguna Salada. La función principal de estas estructuras es la disminuir la turbulencia y evitar el golpe de ariete del flujo de agua que proviene de los diferentes sistemas de la CNLV. El flujo de agua que llega a los pozos de los vertedores, hace contacto con ellos y pasa a otra cámara y el nivel del agua sube, rebasa la cresta y baja hasta un pozo pequeño que permite reducir la velocidad del agua, para llegar a los canales de descarga.

- Canal de descarga

Las dos pequeñas porciones de canal de 30 m de ancho que conectan a cada uno de los vertedores, se unen posteriormente en un solo canal abierto, de 50 m de ancho que atraviesa la Laguna Salada y descarga finalmente al mar. La finalidad de la longitud del canal es la de disponer de una distancia mayor entre toma y descarga para evitar la recirculación de agua caliente.

### **Golfo de México**

La superficie del GM, incluyendo el cuerpo de agua y los humedales costeros de México y Estados Unidos es de 1942500 km<sup>2</sup>. La profundidad promedio del GM es de 1615 m.

La cuenca del GM posee una longitud de 1600 km en la línea este-oeste, 1300 km en la línea norte-sur en su porción occidental y 900 km en las porciones central y oriental. Cuenta con 1.6 millones de km<sup>2</sup> de superficie y un volumen aproximado de 2.3 millones de km<sup>3</sup> (Secretaría de Marina 2002).

Se considera como un Gran Ecosistema Marino (GEM) a aquella porción de mar, algunas veces semicerrada, que presenta características biológicas, físicas y químicas importantes desde el punto de vista de la productividad primaria y la biodiversidad. La complejidad intrínseca de estos grandes sistemas, representa un reto para el manejo, por lo que hasta ahora, este enfoque sólo ha servido para abordar estudios básicamente sobre cambios en la biodiversidad de las comunidades de peces estudiadas, ya que estos cambios pueden generar una cascada de efectos sobre las cadenas tróficas que incluyen a los depredadores hasta los componentes del plancton.

Por ser áreas que comprenden numerosos elementos geográficos, económicos, sociales y políticos, se les considera como adecuados para ser utilizados como base para el manejo de estos ecosistemas basado en los recursos naturales compartidos.

El litoral del Golfo de México está bordeado por 27 grandes sistemas, estuarios, bahías y lagunas costeras, que sirven de áreas de refugio, alimentación y reproducción de numerosas especies que representan a las pesquerías ribereñas más importantes. Este GEM alberga una de las riquezas biológicas más grandes del mundo, y sus humedales costeros le otorgan un valor muy alto como hábitat ya que es sustento de la economía ecológica del Golfo (gracias a sus servicios ambientales).

## CARACTERIZACIÓN DEL GOLFO DE MÉXICO COMO GEM

Los factores físicos que se presentan dentro del Golfo de México modulan el comportamiento de los procesos biológicos y ecológicos dentro de las comunidades de este GEM. Uno de los factores más importantes para el GEM Golfo de México, son sus corrientes marinas.

El 38% de la cuenca del Golfo de México está caracterizada por áreas intersticiales someras y presenta zonas donde la plataforma continental adyacente se tiende a una profundidad de entre 180 y 3,000 m.

Aquí habita el 67% de las especies vivientes en el territorio nacional y ocupa el primer lugar a nivel nacional en número de plantas superiores (20,000 especies), 150 especies de peces de agua dulce, 180 especies de anfibios y 240 especies de aves (Instituto de Geografía- UNAM, SEMARNAT 1996).

En cuanto a biodiversidad, CONABIO ha identificado 70 regiones marinas prioritarias para México, de las cuales 27 se encuentran en el Golfo de México y Caribe mexicano abarcando el 60% en superficie de las del Pacífico. Esta biodiversidad, convierte al GEM Golfo de México como una de las zonas con mayor importancia para el desarrollo marino y costero de México (Tabla 4.1).

Tabla 4.1: Biodiversidad en las Regiones Marinas Prioritarias identificadas para el GM.

| Región Prioritaria                        | Alta Biodiversidad | Con Amenaza a la Biodiversidad |
|---|--------------------|--------------------------------|
| 1. Laguna Madre                           | Si                 | Si                             |
| 2. La Pesca-Rancho Nuevo                  | Si                 | Si                             |
| 3. Laguna San Andrés                      | Si                 | -                              |
| 4. Pueblo Viejo-Tamiahua                  | Si                 | Si                             |
| 5. Tecolutla                              | Si                 | -                              |
| 6. Laguna Verde- Antón Lizardo            | Si                 | Si                             |
| 7. Sist. Lagunar de Alvarado              | Si                 | Si                             |
| 8. Los Tuxtlas                            | No disponible      | No disponible                  |
| 9. Delta del Río Coatzacoalcos            | Si                 | Si                             |
| 10. Pantanos de Centla-Laguna de Términos | Si                 | Si                             |
| 11. Giro Tamaulipeco                      | -                  | -                              |
| 12. Fosa Sigsbee                          | Si                 | -                              |
| 13. Cayos Campeche                        | Si                 | Si                             |
| 14. Escape Campeche                       | No disponible      | No disponible                  |
| 15. Arrecife Alacranes                    | Si                 | Si                             |
| 16. Sonde de Campeche                     | Si                 | Si                             |
| 17. Campotón- El Palmar                   | Si                 | Si                             |
| 18. Sisal-Dzilam                          | Si                 | -                              |

Fuente: Regiones prioritarias marinas de México, CONABIO, México 1998.

En esta zona también, se desarrollan actividades de producción de energía eléctrica como la que se lleva a cabo en la central núcleo eléctrica de Laguna Verde localizada sobre la costa del Golfo de México, en el municipio de Alto Lucero, estado de Veracruz.

Las áreas costeras y marinas del Golfo de México proveen a la población humana con servicios ambientales y recursos naturales estratégicos. Los servicios incluyen la regulación del clima, la protección de las costas y el equilibrio en la composición química de la atmósfera además de mantener la diversidad del patrimonio genético.

## **Temperatura**

En el GM la temperatura está determinada por el influjo de las aguas cálidas de la Corriente del Lazo, que se introduce por Canal de Yucatán y la zona del Caribe, cuya dinámica afecta aproximadamente al 50% del GM, donde además la evaporación supera a la precipitación (Biggs 1992). Se caracteriza por tener una temperatura superficial de 28 a 29°C durante el verano, con un incremento en las aguas superficiales de noroeste a sureste, debido a la intromisión de la Corriente del Lazo; en invierno disminuye hasta los 19 a 20°C, ya que los vientos fríos provenientes del norte ponen resistencia a las aguas cálidas procedentes del sureste.

En la temporada de invierno, en el área comprendida entre la zona de descarga del Río Bravo y la Laguna Madre, la temperatura superficial es de 12°C y más cercano a la plataforma continental tenemos una temperatura de 10°C, estas variaciones están asociadas al enfriamiento de las aguas costeras por los vientos del norte y por las aguas frías que descargan los ríos como el Misisipi, Afchafalaya y Bravo. En el GM se observan variaciones térmicas espacial y temporalmente, resultado de la formación de giros ciclónicos (fríos) y anticiclónicos (calientes); estos últimos debido al estrangulamiento de la Corriente del Lazo.

## **Oxígeno**

El oxígeno disuelto superficial de las aguas del Caribe mexicano es homogéneo en el transcurso del año (manteniendo niveles de 4 a 5 ml/L) como esta agua conforma la Corriente del Lazo, que representa más del 50% del agua que entra a la cuenca del GM, el contenido de oxígeno disuelto en el GM es uniforme en la capa superficial (150-250 m de profundidad) con 4.5 ml/L; como se observa en la plataforma de Campeche, Veracruz y el Caribe. Claro que al igual que la temperatura, los ciclos ciclónicos y anticiclónicos tienen un rol importante en la distribución espacial y temporal del oxígeno disuelto en el GM.

## **Fauna**

El GM es una importante zona de desove para los peces. El GM es una de las dos únicas zonas de desove del atún rojo del Atlántico (gravemente sobreexplotado). Cada primavera, estos túnidos se congregan en el GM para desovar. Los peces de arrecife, como los pargos y los meros, sustentan comunidades pesqueras a lo largo de toda la costa del golfo.

En el golfo también podemos encontrar especies como el abadejo, (especie valiosa por su valor comercial y usado para pesca deportiva) el mero rojo, ostras, langostas, gambas, 5 especies de tortugas como: lora, carey, verde, boba y laúd. Existen 28 especies de ballenas y delfines, 20 de las cuales habitan todo el año en las aguas del GM como los delfines mulares y los cachalotes. En todo el Golfo podemos encontrar hábitats como arrecife de coral, humedades y manglares, lugares de alimentación, desove y apareamiento. También es importante nombrar que el GM no solo es hábitat para especies marinas, podemos encontrar aves costeras como: pelícanos blancos y pardos, golondrinas marinas, gaviotas, zancudas, rayadores y garzas, especies que su alimentación se basa en peces y crustáceos.



## 4.2 Plataforma Seleccionada

Para la selección de nuestra plataforma se hizo una investigación de las misiones espaciales actuales que pudieran arrojar los datos para el estudio propuesto en esta tesis, se seleccionó de las diferentes misiones las que tienen como objetivo el estudio por imágenes del planeta (sin fines militares) y se hizo una comparación entre las plataformas para la elección de la mejor. (Tabla 4.2)

Tabla 4.2: Cuadro comparativo entre plataformas.

| Plataforma                      | Landsat 8                      | SPOT-7  | IKONOS                                     | RapidEye                 | IRS-P6                   |
|---------------------------------|--------------------------------|---|--|--------------------------|--------------------------|
| <b>País de origen</b>           | EUA                            | Francia   | EUA  | Alemania                 | India                    |
| <b>Sensor</b>                   | Operational Land Imager (OLI)  | New AstroSat Optical Modular Instrument (NAOMI) | Ikonos multispectral y pancromático        | Push Broom Multispectral | LISS-III segunda version |
| <b># de bandas</b>              | 11 bandas                      | 5 bandas  | 5 bandas                                   | 5 bandas                 | 8 bandas                 |
| <b>Resolución espacial</b>      | 30 m y 15 m banda pancromática | 8.8 m y 1.5 m banda pancromática                | 4 m y 1 m banda pancromática               | 6.5 m                    | 23.5 m                   |
| <b>Resolución temporal</b>      | 16 días                        | 26 días   | 3 días                                     | 1 día                    | 24 días                  |
| <b>Resolución radiométrica</b>  | 12 bits                        | 12 bits   | 8 bits                                     | 12 bits                  | 7 bits                   |
| <b>Tamaño de escena</b>         | 170 km x 185 km                | 120 km x 120 km<br>Ó<br>60 km x 180 km          | Definido por usuario<br>Mínimo 7 km x 7 km | 24 km x 24 km            | 141 km x 141 km          |
| <b>Costo por km<sup>2</sup></b> | Gratis                         | 4 – 5 euros                                     | 25 dólares aprox.                          | 25 dólares aprox.        | 0.012 – 1 euro           |
| <b>Fecha de lanzamiento</b>     | 11 de febrero del 2013         | 30 de junio del 2014                            | 24 de Septiembre de 1999                   | 29 de Agosto del 2008    | 17 de Octubre del 2003   |

Una imagen de satélite se caracteriza por las siguientes modalidades de resolución:

- **Resolución espacial:** Este concepto designa al objeto más pequeño que se puede distinguir en la imagen. Está determinada por el tamaño del píxel, medido en metros sobre el terreno, esto depende de la altura del sensor con respecto a la Tierra, el ángulo de visión, la velocidad de escaneo y las características ópticas del sensor.
- **Resolución espectral:** Consiste en el número de canales espectrales (y su ancho de banda) que es capaz de captar un sensor.
- **Resolución radiométrica:** Se la llama a veces también resolución dinámica, y se refiere a la cantidad de niveles de gris en que se divide la radiación recibida para ser almacenada y procesada posteriormente. Esto depende del conversor analógico digital usado.
- **Resolución temporal:** Es la frecuencia de paso del satélite por un mismo punto de la superficie terrestre. Es decir cada cuanto tiempo pasa el satélite por la misma zona de la Tierra. Este tipo de resolución depende básicamente de las características de la órbita.

De la tabla 4.2 vemos que los satélites SPOT-7, IKONOS y RapidEye nos ofrecen imágenes de alta resolución, para nuestro estudio no necesitamos gran detalle y por lo tanto una resolución media como la que ofrece el satélite Landsat 8 es suficiente, En cuanto a la resolución espectral el

satélite Landsat 8 tiene mayor número de canales espectrales (bandas) y en específico nos interesan dos canales que nos serán de gran ayuda ya que son bandas térmicas las cuales podrán arrojar información importante para nuestros objetivos. De los satélites comparados todos tienen una resolución radiométrica similar excepto IKONOS e IRS-P6 que son menores, y por último la resolución temporal no es una característica importante ni decisiva para nuestro proceso de elección.

Para este estudio se eligió la plataforma Landsat 8 (también conocido como LDCM por sus siglas en inglés *Landsat Data Continuity Mission*), debido a su resolución espectral y la accesibilidad para adquirir las imágenes a diferencia de las demás plataformas comparadas. El satélite Landsat 8 incorpora dos instrumentos de barrido: *Operational Land Imager (OLI)*, y un sensor térmico infrarrojo llamado *Thermal Infrared Sensor (TIRS)*. (Tabla 4.3)

Tabla 4.3: Características principales de la plataforma de Landsat 8.

| <b>Landsat 8</b>                 |   |  |
|----------------------------------|---|--|
| <b>Fecha de Lanzamiento</b>      | 11 de febrero del 2013 a las 18:02.536 UTC  |  |
| <b>Vida útil</b>                 | 5 años  |  |
| <b>Sensor</b>                    | Operational Land Imager (OLI)   |  |
| <b>Órbita</b>                    | 705 km circular @ 98.2°   |  |
| <b>Tamaño de escena</b>          | 170 km x 185 km   |  |
| <b>Resolución temporal</b>       | 16 días   |  |
| <b>Características orbitales</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Órbita polar Heliosíncrona</li> <li>• 705 km de altura orbital</li> <li>• Inclinación 98,2°</li> <li>• Cruce del Ecuador a las 10:00 am (± 15 min) local time (modo descendente)</li> <li>• WRS-2 (Worldwide Reference System) path/row system</li> <li>• Swath 180 km</li> <li>• Tiempo de revisita 16 días, 233 ciclos orbitales</li> <li>• Período de Revolución : 98.9 minutos; ~14.5 órbitas/día</li> </ul> |  |
| <b>Resolución radiométrica</b>   | 12 bits ( $2^{12}=4096$ )   |  |
| <b>Bandas espectrales OLI</b>    | <ul style="list-style-type: none"> <li>• B 1 - Costero / Aerosol</li> <li>• B 2 – Azul</li> <li>• B 3 – Verde</li> <li>• B 4 – Roja</li> <li>• B 5 - Infrarrojo cercano</li> <li>• B6 - Infrarrojo de onda corta</li> <li>• B7 - Infrarrojo de onda corta</li> <li>• B8 – Pancromática</li> <li>• B9 – Cirrus</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>0.433 - 0.453 <math>\mu\text{m}</math></li> <li>0.450 - 0.515 <math>\mu\text{m}</math></li> <li>0.525 - 0.600 <math>\mu\text{m}</math></li> <li>0.630 - 0.680 <math>\mu\text{m}</math></li> <li>0.845 - 0.885 <math>\mu\text{m}</math></li> <li>1.560 - 1.660 <math>\mu\text{m}</math></li> <li>2.100 - 2.300 <math>\mu\text{m}</math></li> <li>0.500 - 0.680 <math>\mu\text{m}</math></li> <li>1.360 - 1.390 <math>\mu\text{m}</math></li> </ul> |
| <b>Bandas espectrales TIRS</b>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• B10 - Infrarrojo termal</li> <li>• B11 - Infrarrojo termal</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>10.30 - 11.30 <math>\mu\text{m}</math></li> <li>11.50 - 12.50 <math>\mu\text{m}</math></li> </ul>   |

Las bandas espectrales del sensor OLI, aunque similares a el sensor Landsat 7 ETM +, proporcionan una mejora de los instrumentos de las misiones Landsat anteriores, debido a la incorporación de dos nuevas bandas espectrales: un canal profundo en el azul visible (banda 1), diseñado específicamente para los recursos hídricos e investigación en zonas costeras, y un nuevo canal

infrarrojo (banda 9) para la detección de nubes cirrus. Adicionalmente una nueva banda de control de calidad se incluye con cada producto de datos generado. Esto proporciona información más detallada sobre la presencia de características tales como las nubes, agua y nieve. Por otra parte el sensor TIRS recoge dos bandas espectrales en longitudes de onda incluidas por la misma banda en los anteriores sensores TM y ETM+ (Fig. 4.2).

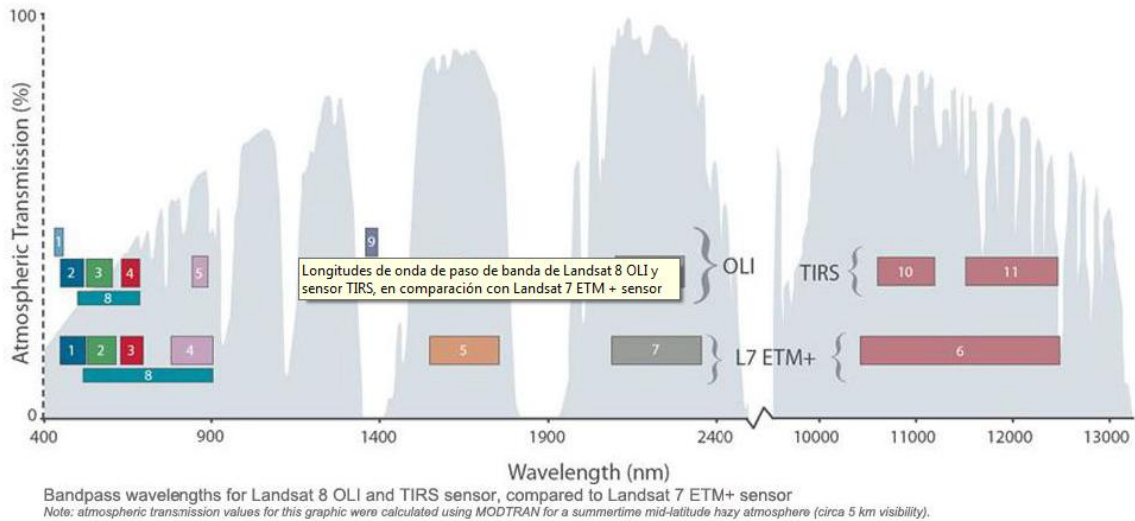


Figura 4.2: Ancho de banda para los sensores OLI y TIRS en Landsat 8 y ETM+ en Landsat 7 (USGS 2013)

La calidad de los datos (relación de la señal en función del ruido) y la resolución radiométrica (12 bits) del OLI y TIRS es más alta que los anteriores instrumentos Landsat (8 bits para TM y ETM+), proporcionando una mejora significativa en la capacidad de detectar cambios en la superficie terrestre.

Los archivos de Landsat 8 serán más grandes que los del Landsat 7, rondando los 2 GB, por tener más bandas que sus antecesores, tratarse de archivos de 12 bits y contener una banda de Valoración de Calidad (QA), que proporcionará información sobre la "calidad" de determinado píxel, respecto a anomalías en la toma del dato por problemas de instrumental u otras, tales como presencia de aerosoles, agua o nieve, etc.

### 4.3 Adquisición de las imágenes

Las imágenes del Landsat 8 se pueden obtener de manera gratuita y directa del servidor USGS (United States Geological Survey), a través de la aplicación Java USGS Visualization Viewer, en la dirección electrónica <http://glovis.usgs.gov/>, donde se puede seleccionar la región de interés en un mapa mundial así como la plataforma y el mes que se desean, desplegando la imagen de nuestro interés.

Es importante que para la selección de nuestras imágenes de estudio se tenga la menor nubosidad posible procurando una calidad de imagen alta.

#### 4.4 Pre-procesamiento y procesamiento de las imágenes mediante software especializado

Para este trabajo se empleó el software IDRISI Selva, un programa de percepción remota usado con funciones adecuadas con este trabajo de investigación.

Se adquirieron imágenes de nuestra zona de estudio (6 imágenes en diferentes meses o diferente día del mes), estas imágenes se recortaron para apreciar mejor la zona de estudio. Las imágenes se eligieron entre el catálogo de del servidor de USGS para la plataforma de Landsat 8, se descargaron las 6 imágenes que mostraban una mejor vista de nuestra área de estudio (Figura 4.3).

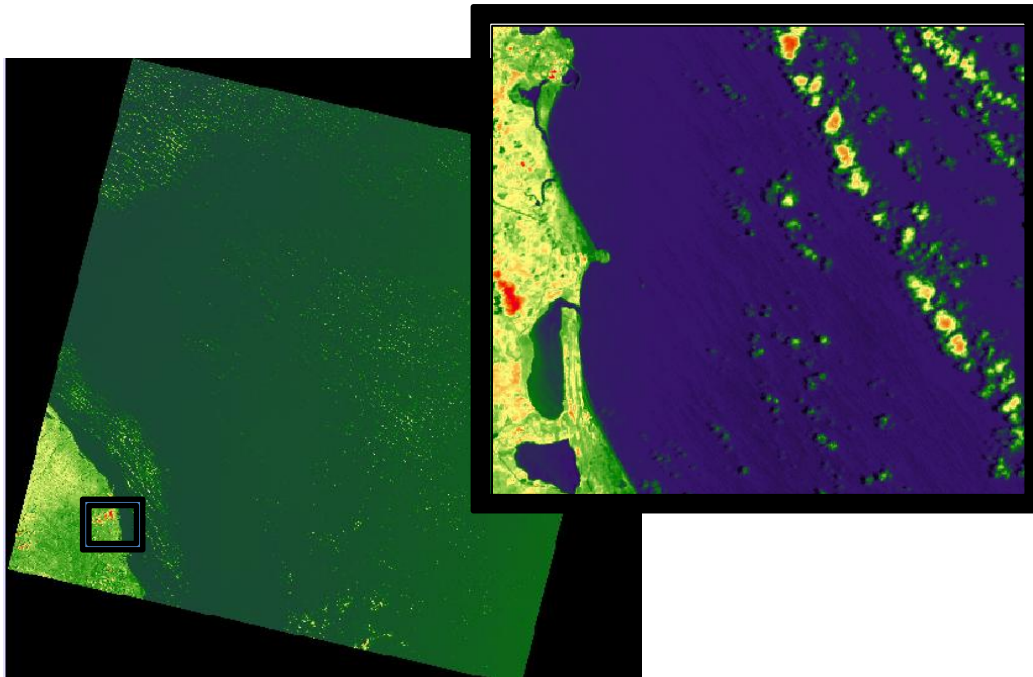


Figura 4.3. Recorte Banda 5 para acotar el área de estudio, Central Nucleoeléctrica Laguna Verde.

Cada imagen obtenida posee 11 bandas, se hizo el recorte de cada banda de cada imagen para que posteriormente se pudiera hacer la combinación de bandas recortadas para la mejor vista del área de estudio.

Para las combinaciones de bandas se realizaron varias pruebas, una de las combinaciones nos muestra el color verdadero del lugar (Figuras 4.4, 4.7, 4.10, 4.13, 4.16 y 4.19), entre las combinaciones de color falso se eligieron aquellas que se puede visualizar la descarga de la CNLV con mayor claridad (Figuras 4.5, 4.6, 4.8, 4.9, 4.11, 4.12, 4.14, 4.15, 4.17, 4.18, 4.20 y 4.21).

- Abril 2014

Tabla 4.4: Datos generales de imagen Abril 2014.

|                     |                 |
|---------------------|-----------------|
| Fecha de toma       | 2014-04-23      |
| <b>Hora de toma</b> | <b>16:47:07</b> |



Figura 4.4. Imagen de la CNLV en color verdadero (Combinación RGB: B04, B03, B02).

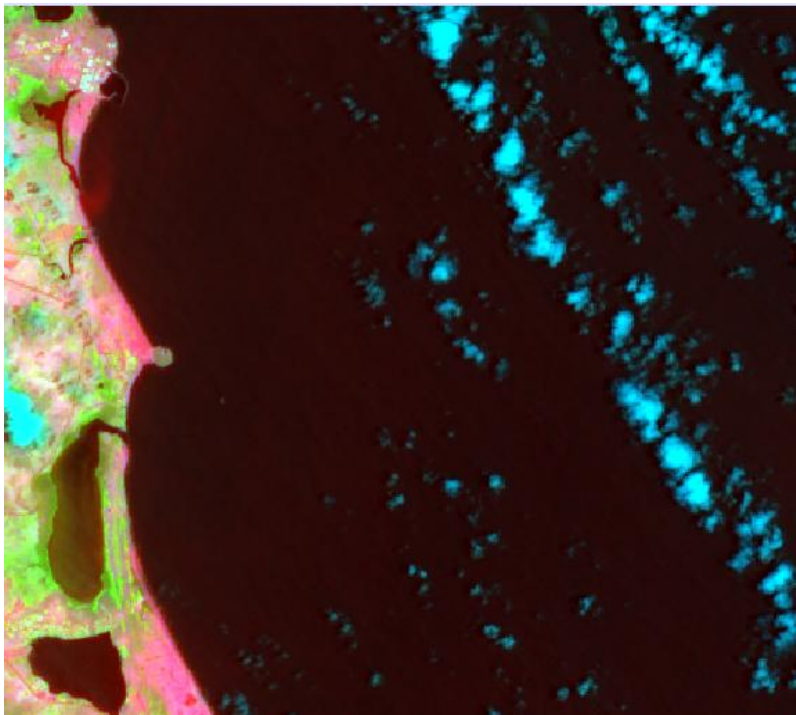


Figura 4.5. Imagen de la CNLV en color falso (Combinación RGB: B11, B05, B07).

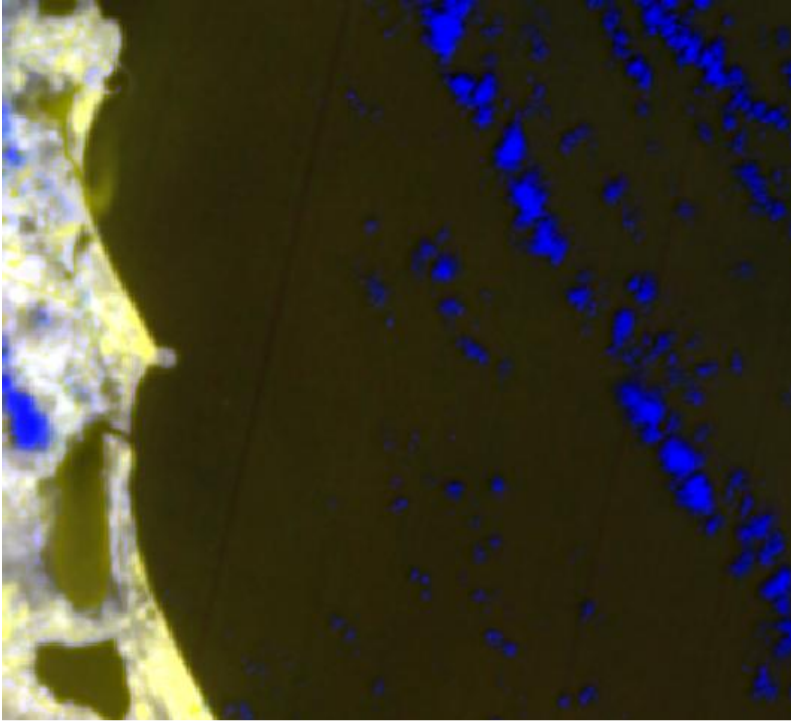


Figura 4.6. Imagen de la CNLV en color falso (Combinación RGB: B11, B10, B06).

- Agosto 2014 A

Tabla 4.5: Datos generales de imagen Agosto 2014 A.

|               |            |
|---------------|------------|
| Fecha de toma | 2014-08-14 |
| Hora de toma  | 16:47:18   |



Figura 4.7. Imagen de la CNLV en color verdadero (Combinación RGB: B04, B03, B02).

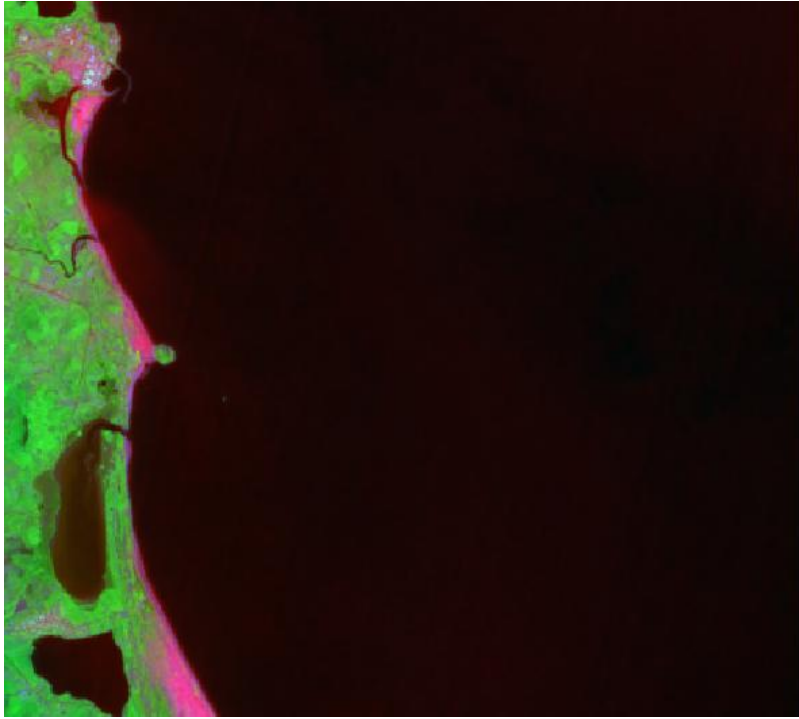


Figura 4.8. Imagen de la CNLV en color falso (Combinación RGB: B11, B05, B07).

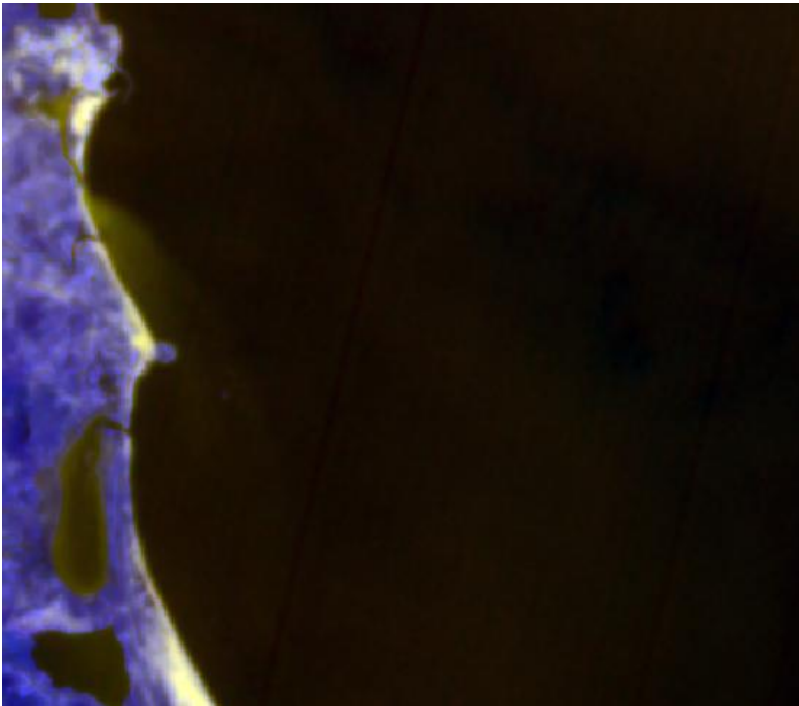


Figura 4.9. Imagen de la CNLV en color falso (Combinación RGB: B11, B10, B06).

# Análisis de la Descarga Térmica de la Central Nucleoeléctrica Laguna Verde, Veracruz, México

- Agosto 2014 B

Tabla 4.6: Datos generales de imagen Agosto 2014 B.

|                     |                 |
|---------------------|-----------------|
| Fecha de toma       | 2014-08-29      |
| <b>Hora de toma</b> | <b>16:47:19</b> |



Figura 4.10. Imagen de la CNLV en color verdadero (Combinación RGB: B04, B03, B02).

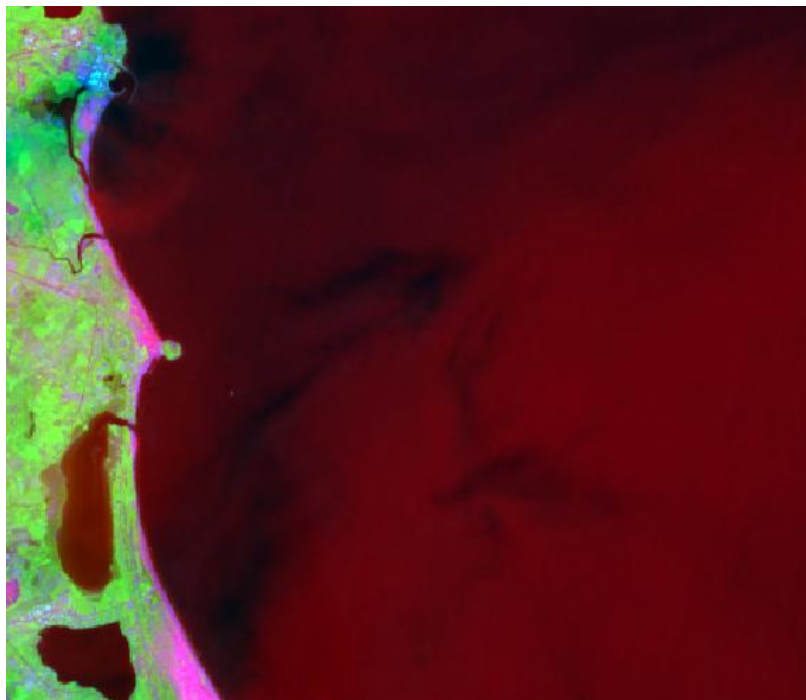


Figura 4.11. Imagen de la CNLV en color falso (Combinación RGB: B11, B05, B07).



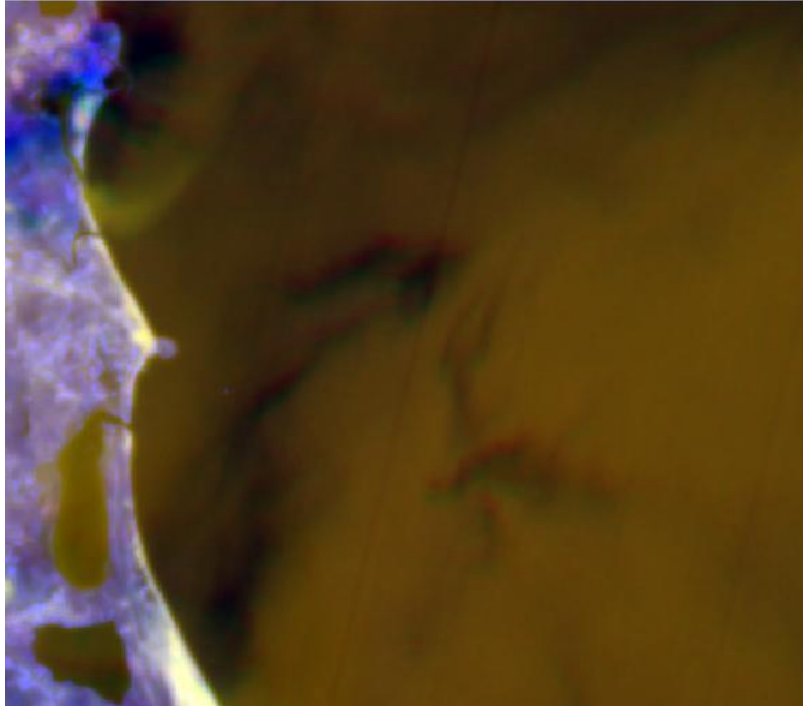


Figura 4.12. Imagen de la CNLV en color falso (Combinación RGB: B11, B10, B06).

- Febrero 2014 A

Tabla 4.7: Datos generales de imagen Febrero 2014 A.

|               |            |
|---------------|------------|
| Fecha de toma | 2014-02-05 |
| Hora de toma  | 16:48:17   |



Figura 4.13. Imagen de la CNLV en color verdadero (Combinación RGB: B04, B03, B02).

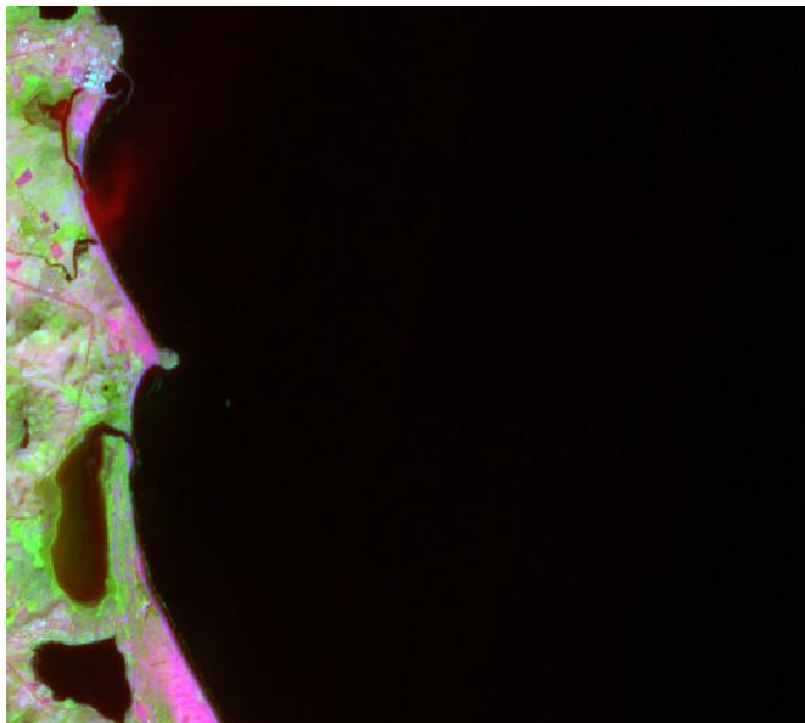


Figura 4.14. Imagen de la CNLV en color falso (Combinación RGB: B11, B05, B07).

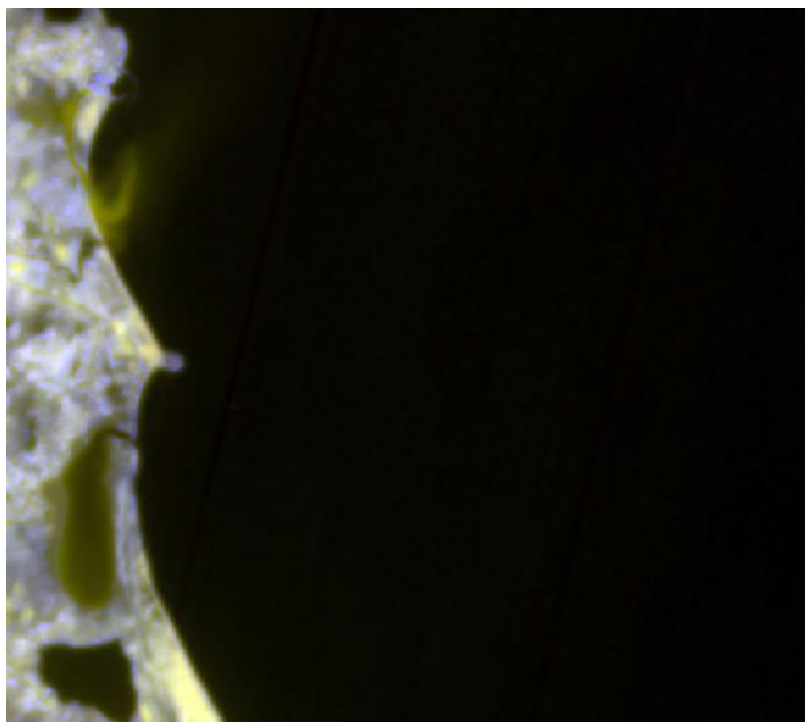


Figura 4.15. Imagen de la CNLV en color falso (Combinación RGB: B11, B10, B06).

- Febrero 2014 B

Tabla 4.8: Datos generales de imagen Febrero 2014 B.

|                      |                   |
|----------------------|-------------------|
| <b>Fecha de toma</b> | <b>2014-02-18</b> |
| <b>Hora de toma</b>  | <b>16:48:04</b>   |



Figura 4.16. Imagen de la CNLV en color verdadero (Combinación RGB: B04, B03, B02).

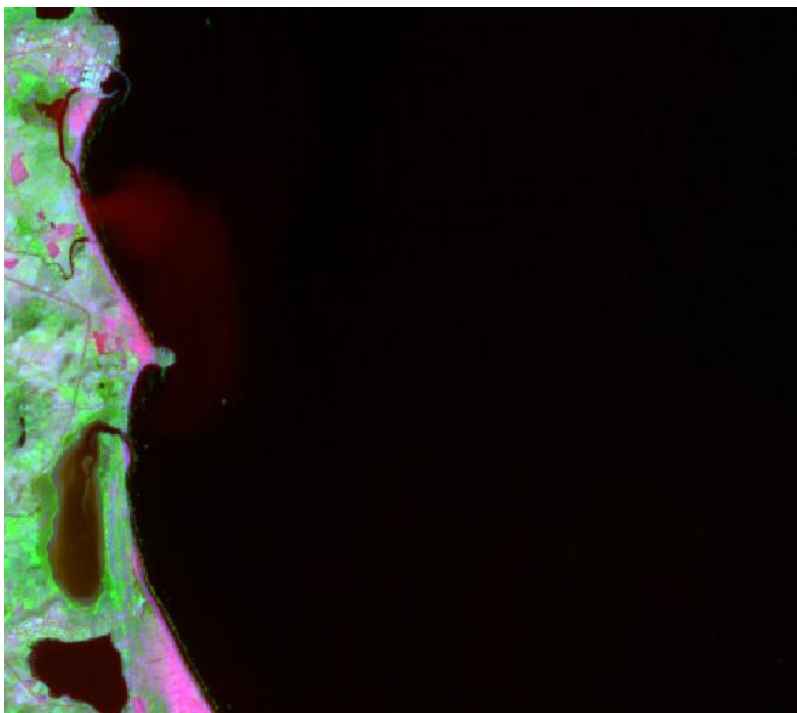


Figura 4.17. Imagen de la CNLV en color falso (Combinación RGB: B11, B05, B07).

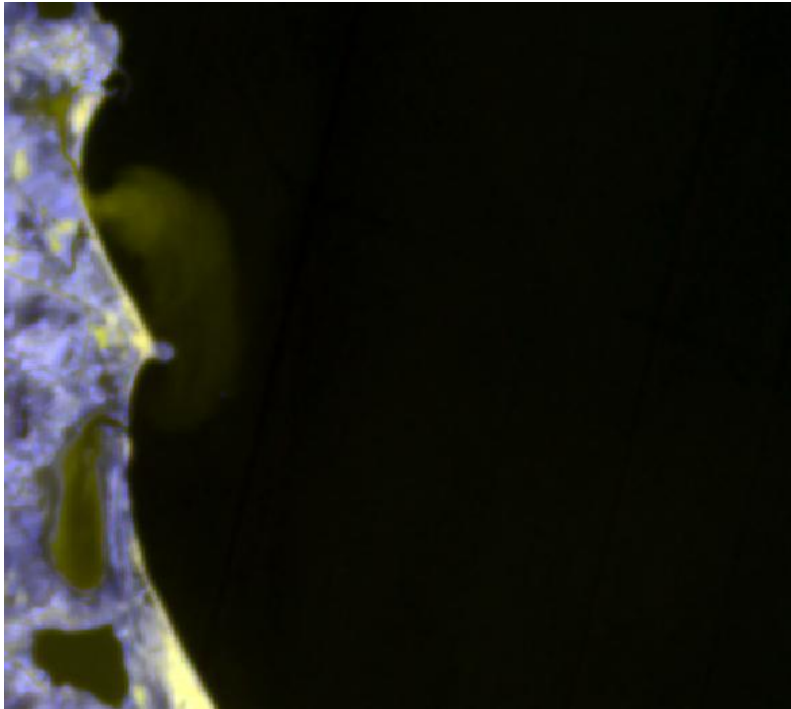


Figura 4.18. Imagen de la CNLV en color falso (Combinación RGB: B11, B10, B06).

- Julio 2013

Tabla 4.9: Datos generales de imagen Julio 2013.

|                      |                   |
|----------------------|-------------------|
| <b>Fecha de toma</b> | <b>2014-02-18</b> |
| <b>Hora de toma</b>  | <b>16:48:04</b>   |



Figura 4.19. Imagen de la CNLV en color verdadero (Combinación RGB: B04, B03, B02).

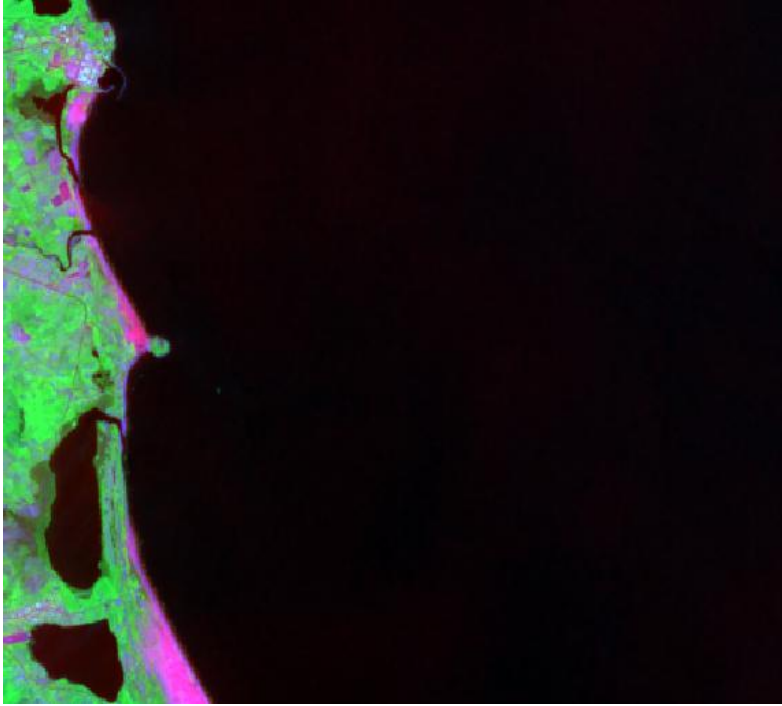


Figura 4.20. Imagen de la CNLV en color falso (Combinación RGB: B11, B05, B07).

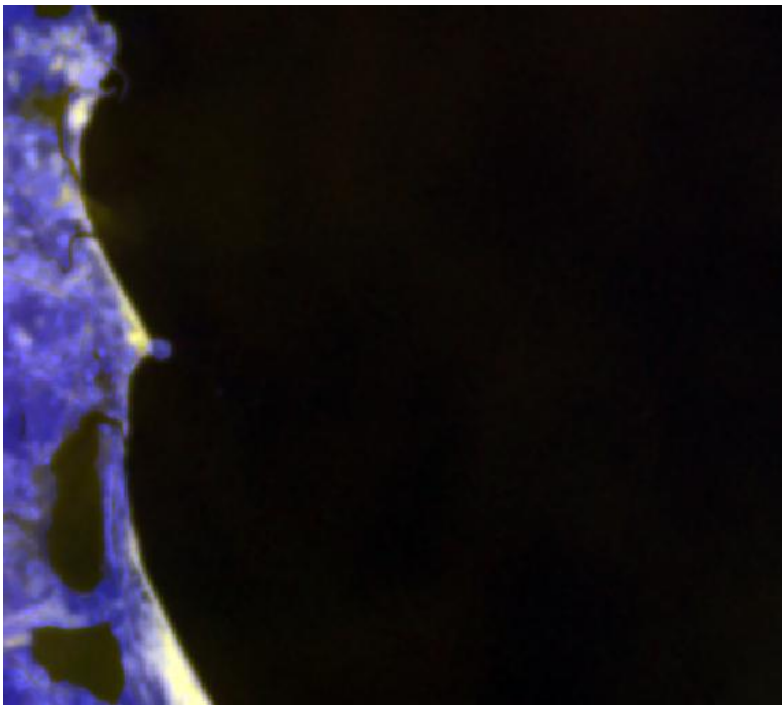


Figura 4.21. Imagen de la CNLV en color falso (Combinación RGB: B11, B10, B06).

Al terminar los recortes de las imágenes y la combinación de bandas, observamos que en las imágenes se nota la descarga térmica de la CNLV.

Queremos saber cómo afecta la temperatura de la descarga en la temperatura media de sus alrededores, por lo que deseamos saber la temperatura media del mar y la temperatura de la descarga de la CNLV, estas temperaturas se obtienen con la fórmula (12) proporcionada por USGS para productos de Landsat 8.

$$T = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1\right)} \quad (12)$$

Donde:

T= Temperatura [K]

$K_1$ = *Constante de conversión térmica de banda específico*, obtenido en los metadatos de las bandas

$K_2$ = *Constante de conversión térmica de banda específico*, obtenido en los metadatos de las bandas

$L_\lambda$ = Radiancia spectral TOA [Watts/( m<sup>2</sup> \* srad \* μm)]

De la fórmula anterior tenemos dos incógnitas, obviamente la primera es la temperatura que es la información que queremos obtener y la segunda la radiancia, los datos de las bandas OLI y TIRS pueden ser convertidas a la radiancia espectral TOA(Techo de la Atmósfera, por sus siglas en inglés) ajustando la escala de los factores de radiancia provistos en el archivo de los metadatos, la cual podemos obtener con la fórmula (13) también proporcionada por USGS para productos Landsat 8.

$$L_\lambda = M_L * Q_{cal} + A_L \quad (13)$$

Donde:

$L_\lambda$ = Radiancia Espectral TOA [Watts/( m<sup>2</sup> \* srad \* μm)]

$M_L$ = *Constante de conversión térmica de banda específico*, obtenido en los metadatos de las bandas

$A_L$ = *Constante de conversión térmica de banda específico*, obtenido en los metadatos de las bandas

$Q_{cal}$  = Valores de los píxeles de productos estándar cuantificados y calibrados (ND)

Los cuerpos calientes emiten radiación térmica en todo el espectro electromagnético, sobre todo en la zona del infrarrojo. Si se mide la radiancia de un cuerpo para todo el espectro de frecuencias, se obtiene la **radiancia espectral** del cuerpo.

Obtuvimos la radiancia en nuestro programa de procesamiento IDRISI selva de cada una de las imágenes en su banda 10, elegimos esta banda ya que es la banda térmica que arroja datos más cercanos a la costa. Con lo que obtuvimos los datos de radiancia (Figuras 4.22, 4.23, 4.24, 4.25, 4.26 y 4.27).

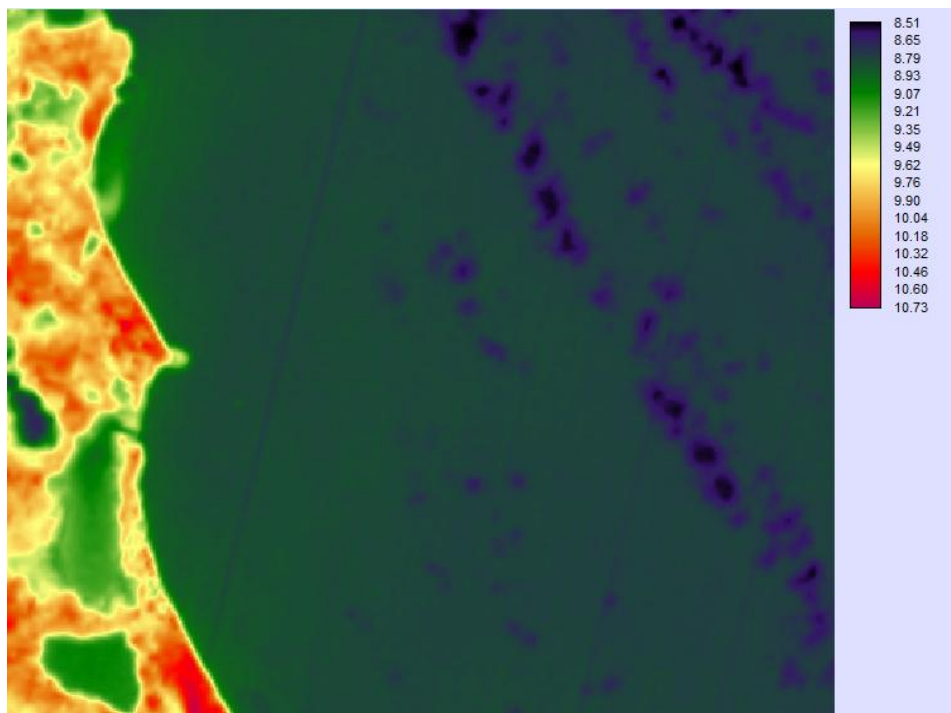


Figura 4.22. Imagen de datos obtenidos con IDRISI de la radiancia [Watts/( m<sup>2</sup> \* srad \* μm)] con banda 10. Imagen de Abril 2014

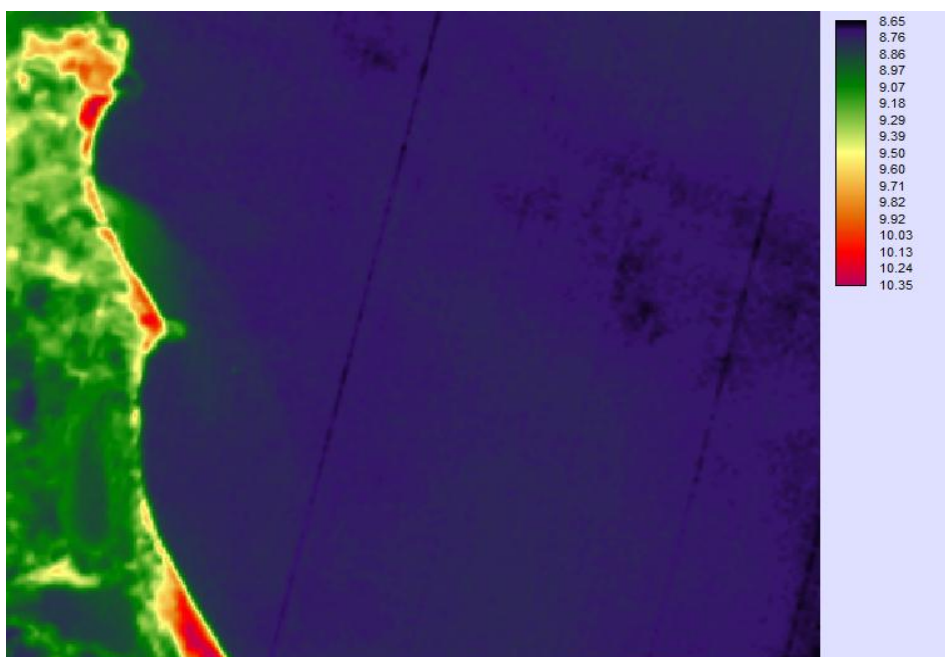


Figura 4.23. Imagen de datos obtenidos con IDRISI de la radiancia [Watts/( m<sup>2</sup> \* srad \* μm)] con banda 10. Imagen de Agosto 2014 A.

Análisis de la Descarga Térmica de la Central Nucleoeléctrica Laguna Verde, Veracruz, México

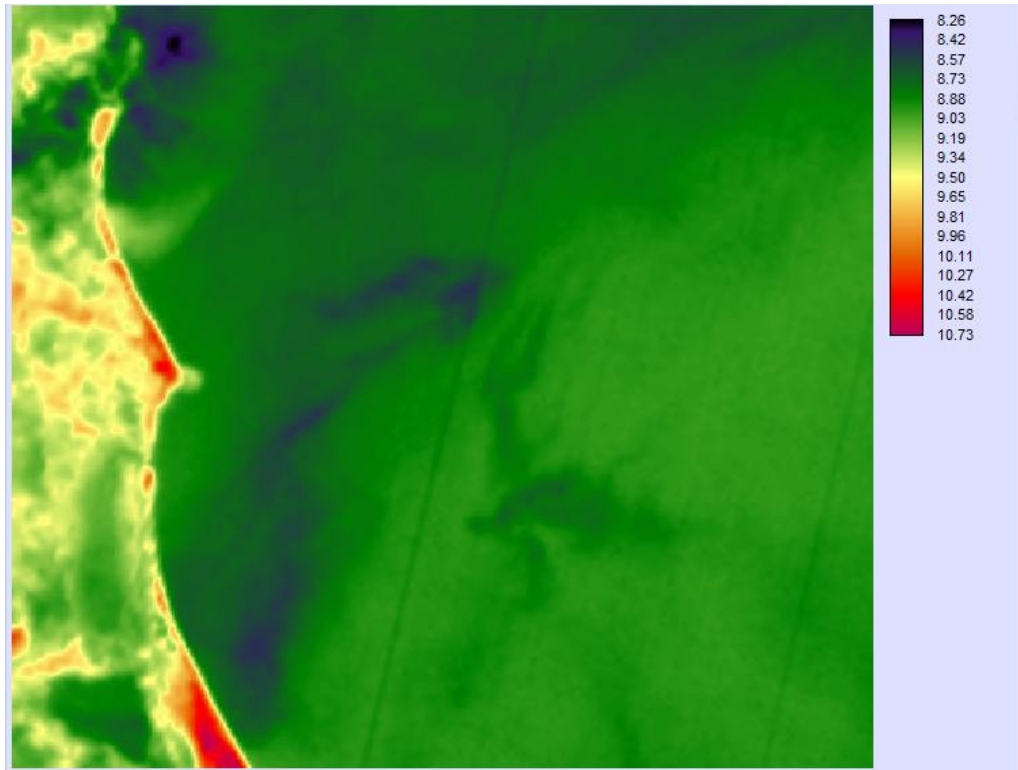


Figura 4.24. Imagen de datos obtenidos con IDRISI de la radiancia [Watts/( m<sup>2</sup> \* srad \* μm)] con banda 10. Imagen de Agosto 2014 B.

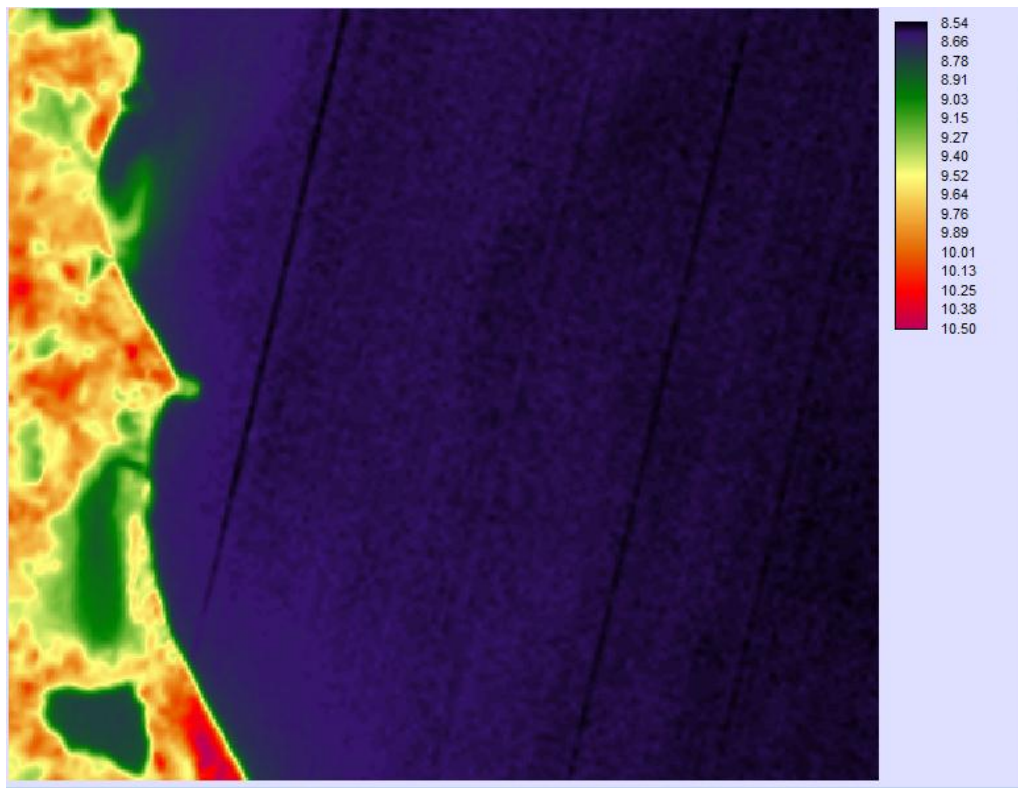


Figura 4.25. Imagen de datos obtenidos con IDRISI de la radiancia [Watts/( m<sup>2</sup> \* srad \* μm)] con banda 10. Imagen de Febrero 2014 A.



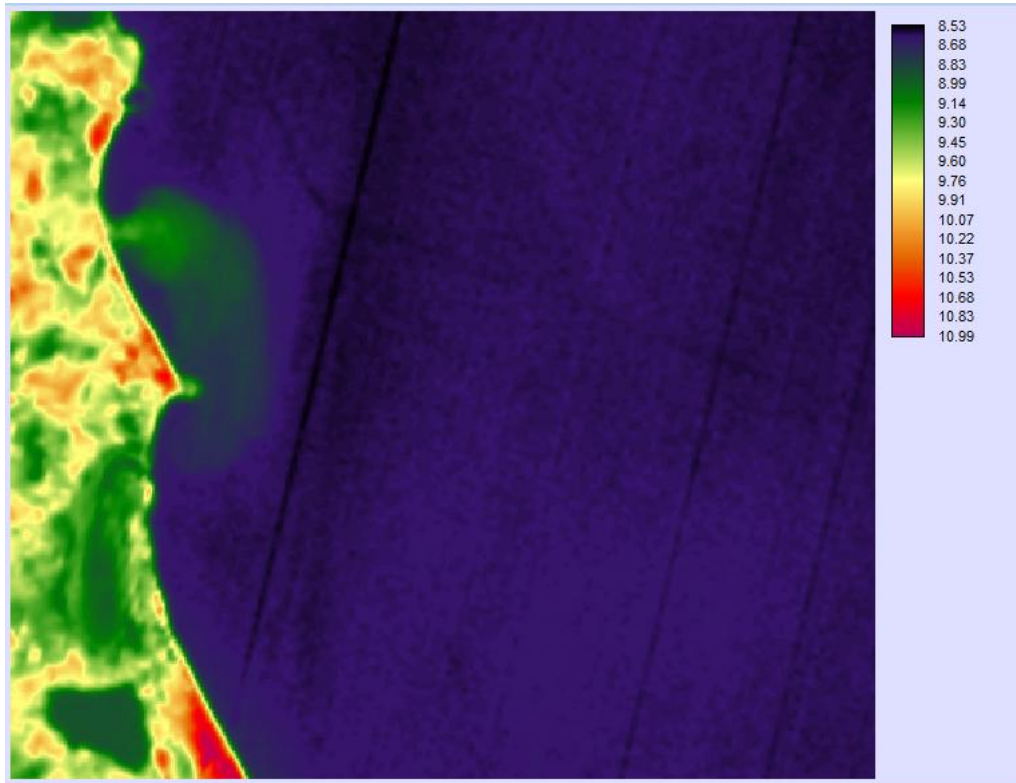


Figura 4.26. Imagen de datos obtenidos con IDRISI de la radiancia [Watts/( m2 \* srad \*  $\mu\text{m}$ )] con banda 10. Imagen de Febrero 2014 B.

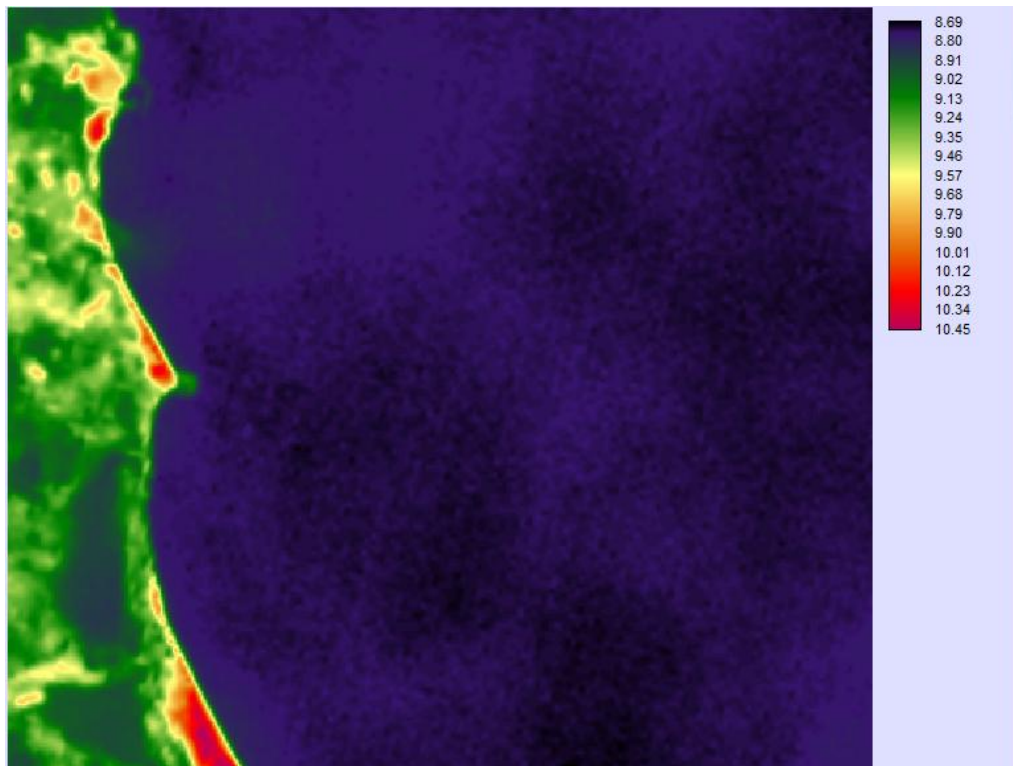


Figura 4.27. Imagen de datos obtenidos con IDRISI de la radiancia [Watts/( m2 \* srad \*  $\mu\text{m}$ )] con banda 10. Imagen de Julio 2013.

## Análisis de la Descarga Térmica de la Central Nucleoeléctrica Laguna Verde, Veracruz, México

Una vez obtenidos los datos de la radiancia, aplicamos una máscara para ocultar todos los valores de los píxeles continentales. Con la radiancia tenemos todos los datos necesarios para la obtención de la temperatura (Figuras 4.28a, 4.29a, 4.30a, 4.31a, 4.32a y 4.33a) en la zona de estudio. Los datos mostrados en las imágenes están en Kelvin, ya que los datos obtenidos con el programa IDRISI Selva son arrojados en Kelvin.

Con los datos de la temperatura, deseamos eliminar los datos de la temperatura media del mar eligiendo puntos al azar en el mar y sacando el promedio de sus temperaturas, a la matiz de la temperatura se le restó la temperatura media para que de esta forma obtuviéramos una imagen que nos diera los datos de sólo los incrementos (Figuras 4.28b, 4.29b, 4.30b, 4.31b, 4.32b y 4.33b) ocasionados por la descarga térmica de la CNLV.

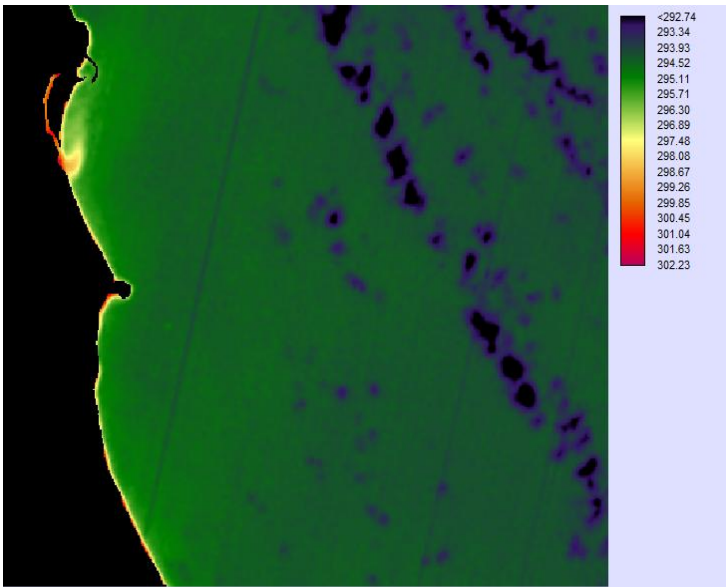


Figura 4.28a. Imagen de datos obtenidos con IDRISI de la temperatura en Kelvin. Imagen de Abril 2014.

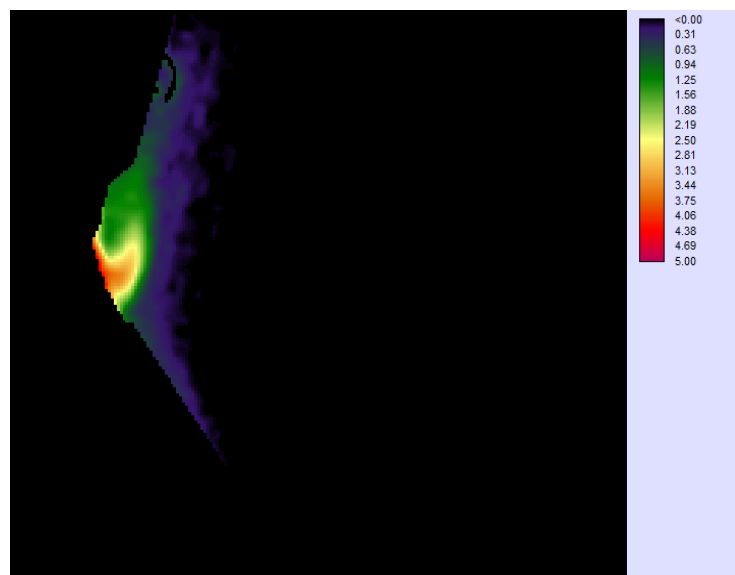


Figura 4.28b. Imagen de datos obtenidos con IDRISI de los incrementos sobre la temperatura media del mar. Imagen de Abril 2014.

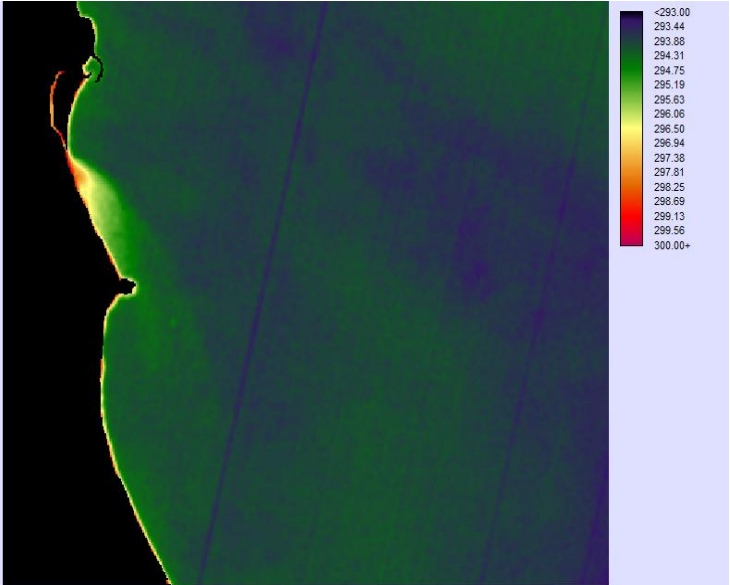


Figura 4.29a. Imagen de datos obtenidos con IDRISI de la temperatura en Kelvin. Imagen de Agosto 2014 A.

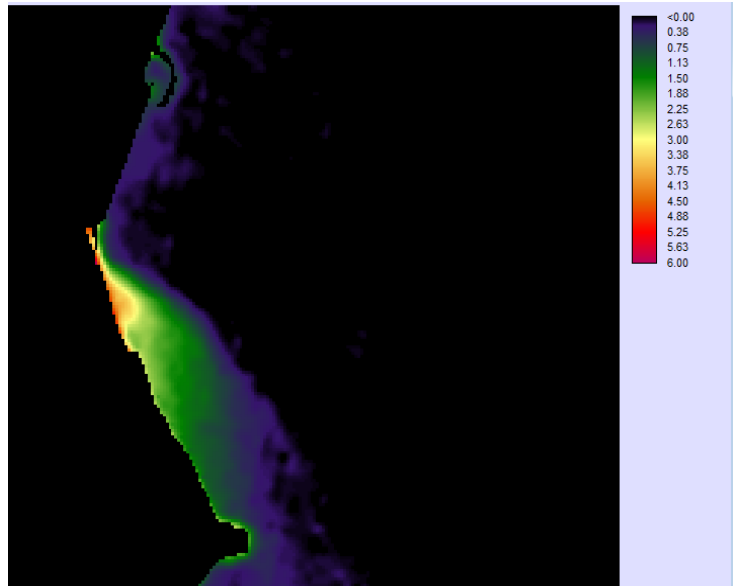


Figura 4.29b. Imagen de datos obtenidos con IDRISI de los incrementos sobre la temperatura media del mar. Imagen de Agosto 2014 A.

# Análisis de la Descarga Térmica de la Central Nucleoeléctrica Laguna Verde, Veracruz, México

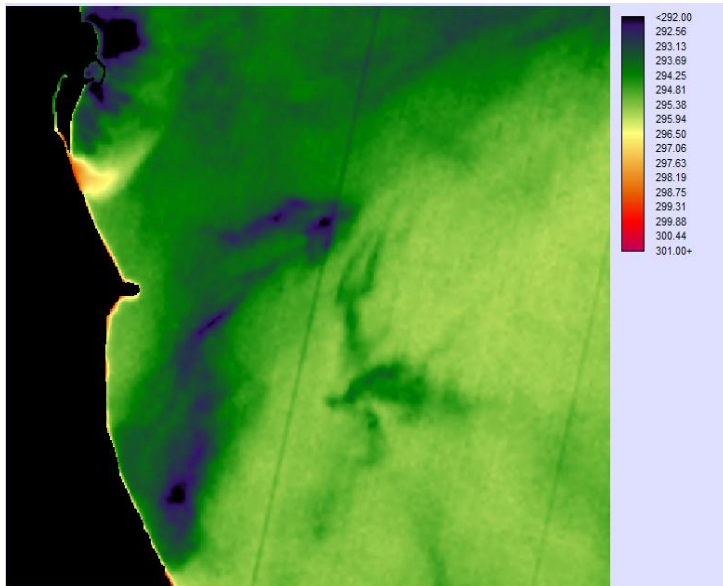


Figura 4.30a. Imagen de datos obtenidos con IDRISI de la temperatura en Kelvin. Imagen de Agosto 2014 B.

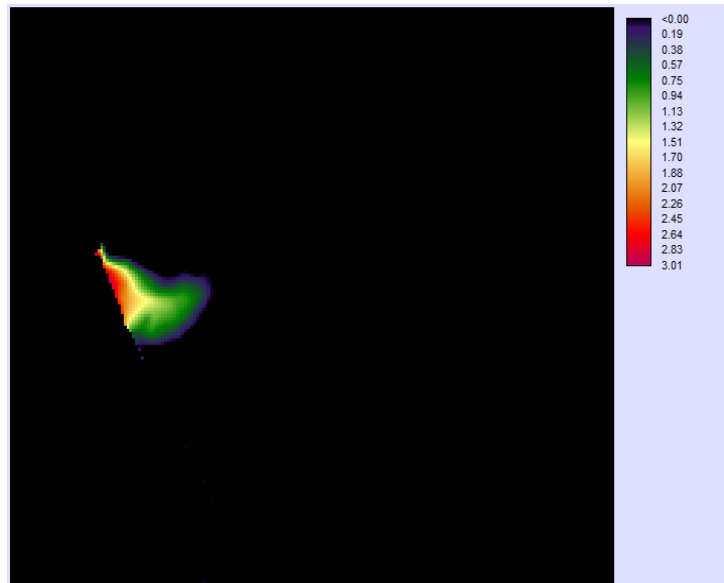


Figura 4.30b. Imagen de datos obtenidos con IDRISI de los incrementos sobre la temperatura media del mar. Imagen de Agosto 2014 B.

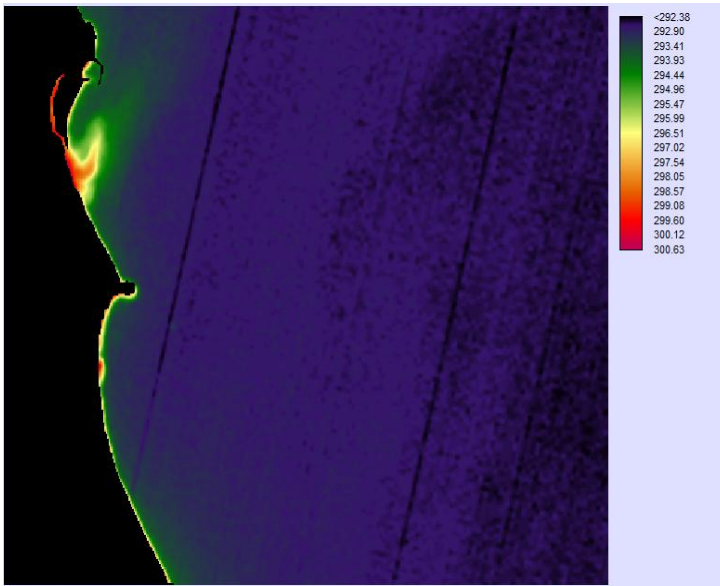


Figura 4.31a. Imagen de datos obtenidos con IDRISI de la temperatura en Kelvin. Imagen de Febrero 2014 A.

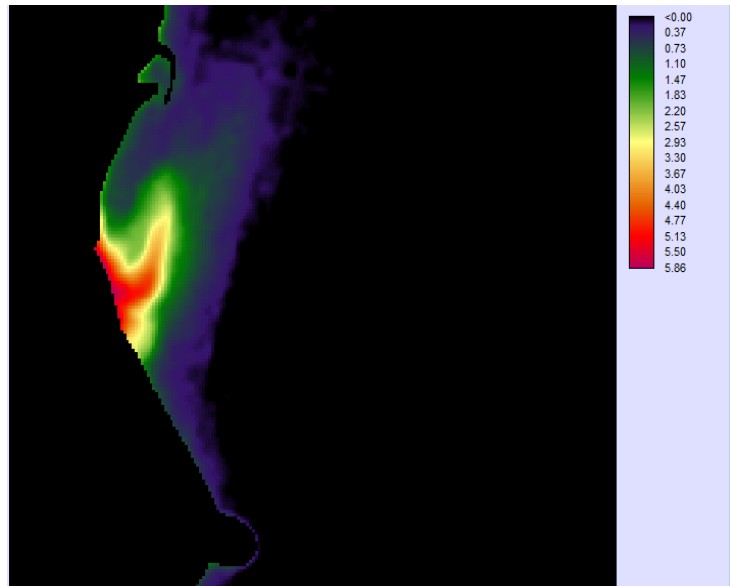


Figura 4.31b. Imagen de datos obtenidos con IDRISI de los incrementos sobre la temperatura media del mar. Imagen de Febrero 2014 A.

## Análisis de la Descarga Térmica de la Central Nucleoeléctrica Laguna Verde, Veracruz, México

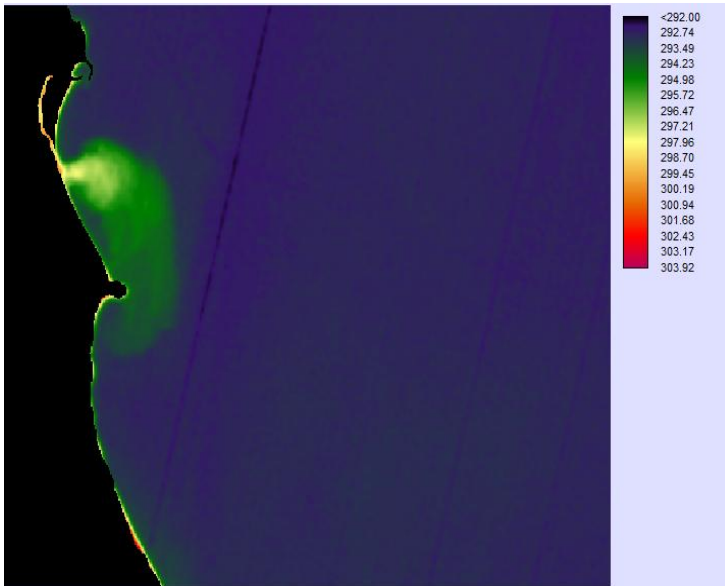


Figura 4.32a. Imagen de datos obtenidos con IDRISI de la temperatura en Kelvin. Imagen de Febrero 2014 B.

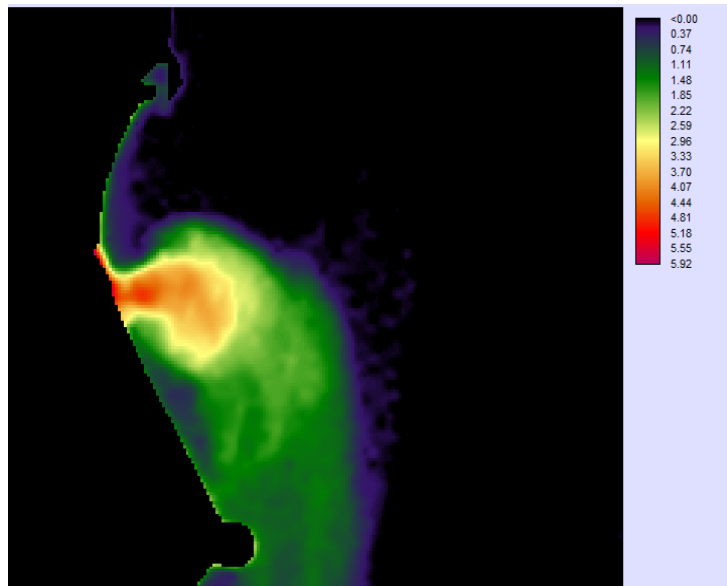


Figura 4.32b. Imagen de datos obtenidos con IDRISI de los incrementos sobre la temperatura media del mar. Imagen de Febrero 2014 B.

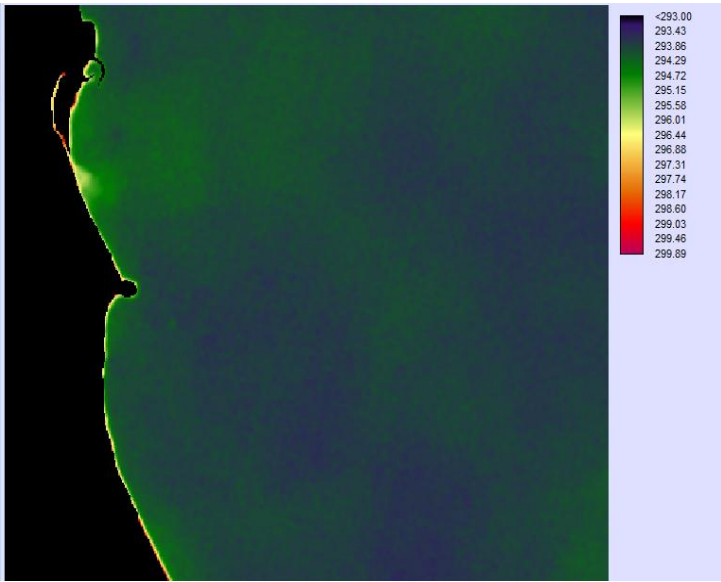


Figura 4.33a. Imagen de datos obtenidos con IDRISI de la temperatura en Kelvin. Imagen de Julio 2013.

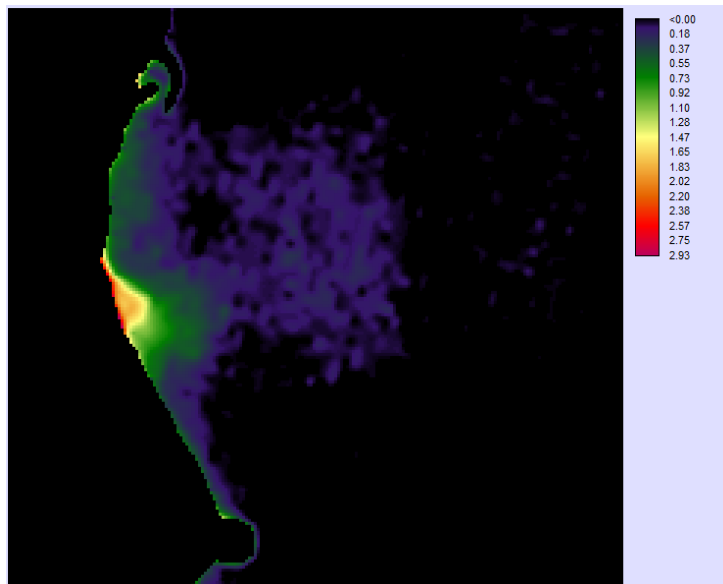


Figura 4.33b. Imagen de datos obtenidos con IDRISI de los incrementos sobre la temperatura media del mar. Imagen de Julio 2013.

## Análisis de la Descarga Térmica de la Central Nucleoeléctrica Laguna Verde, Veracruz, México

Después de haber obtenido los incrementos de temperatura de la descarga en relación a la temperatura media del mar, se hizo una estratificación de los incrementos para observar con mejor detalle el aumento de las temperaturas. (Figuras 4.34, 4.35, 4.36, 4.37, 4.38 y 4.39)

Para finalizar con el procesamiento de las imágenes se obtuvieron los datos que relacionan las hectáreas en el mar que tienen incrementos de temperatura dados por la descarga térmica de la CNLV, que se traduce en las áreas impactadas con un aumento de temperatura mayor a la media esperada.

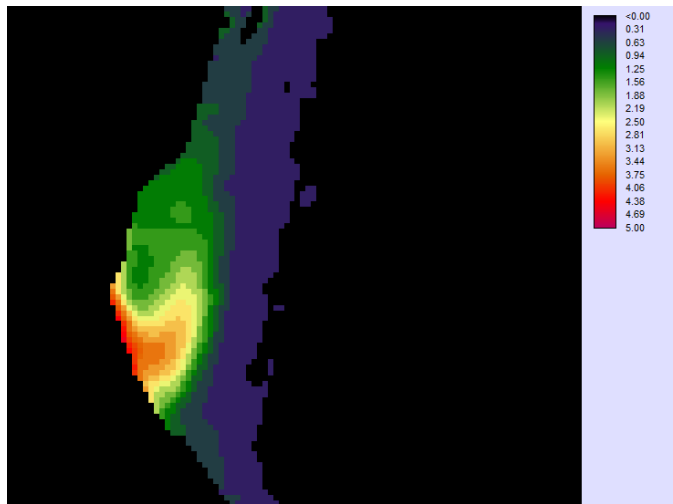


Figura 4.34. Imagen de datos obtenidos con IDRISI de los incrementos estratificados sobre la temperatura media del mar. Imagen de Abril 2014.

Tabla 4.10: Relación entre incremento de temperatura y las hectáreas que afecta, de la imagen de Abril 2014.

| Incremento | Número de Hectáreas |
|------------|---------------------|
| 0          | 1137.24             |
| 1          | 56.88               |
| 2          | 16.92               |
| 3          | 11.07               |
| 4          | 3.24                |
| 5          | 0.09                |

Tabla 4.11: Relación entre incremento de temperatura y las hectáreas que afecta, de la imagen de Agosto 2014 A.

| Incremento | Número de Hectáreas |
|------------|---------------------|
| 0          | 2459.88             |
| 1          | 124.92              |
| 2          | 52.02               |
| 3          | 11.97               |
| 4          | 5.85                |
| 5          | 1.08                |
| 6          | 0.09                |

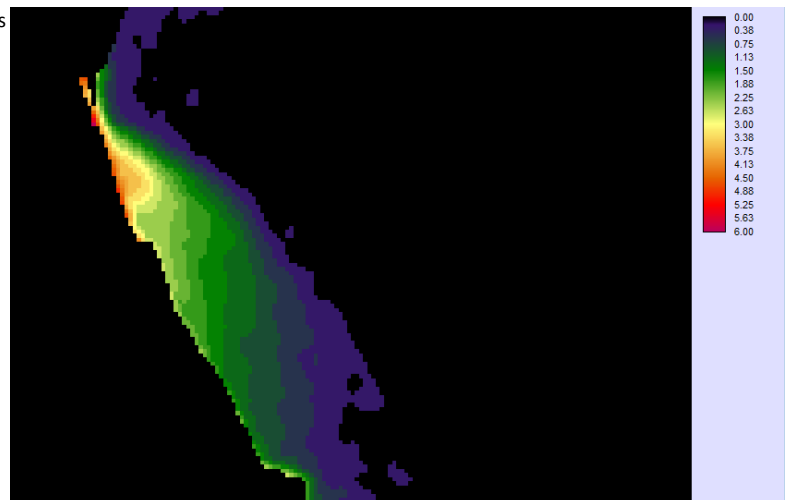


Figura 4.35. Imagen de datos obtenidos con IDRISI de los incrementos estratificados sobre la temperatura media del mar. Imagen de Agosto 2014 A.



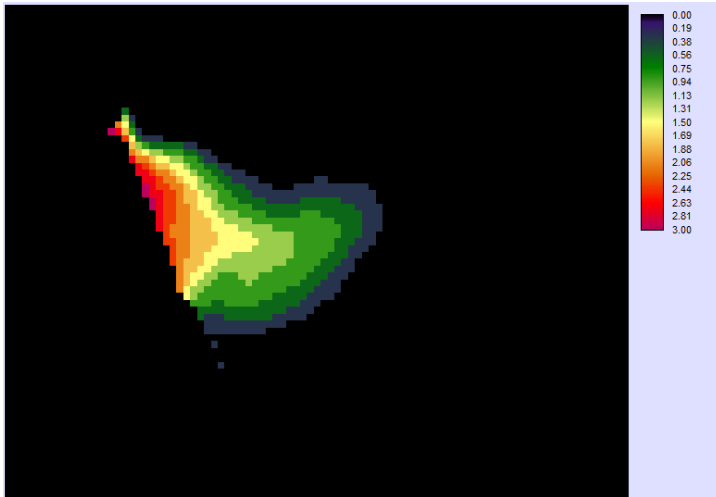


Figura 4.36. Imagen de datos obtenidos con IDRISI de los incrementos estratificados sobre la temperatura media del mar. Imagen de Agosto 2014 B.

Tabla 4.12: Relación entre incremento de temperatura y las hectáreas que afecta, de la imagen de Agosto 2014 B.

| Incrementos | Número de Hectáreas |
|-------------|---------------------|
| 0           | 70.74               |
| 1           | 31.68               |
| 2           | 10.35               |
| 3           | 1.8                 |

Tabla 4.13: Relación entre incremento de temperatura y las hectáreas que afecta, de la imagen de Febrero 2014 A.

| Incrementos | Número de Hectáreas |
|-------------|---------------------|
| 0           | 1784.25             |
| 1           | 159.66              |
| 2           | 44.73               |
| 3           | 24.57               |
| 4           | 14.49               |
| 5           | 11.79               |
| 6           | 1.98                |

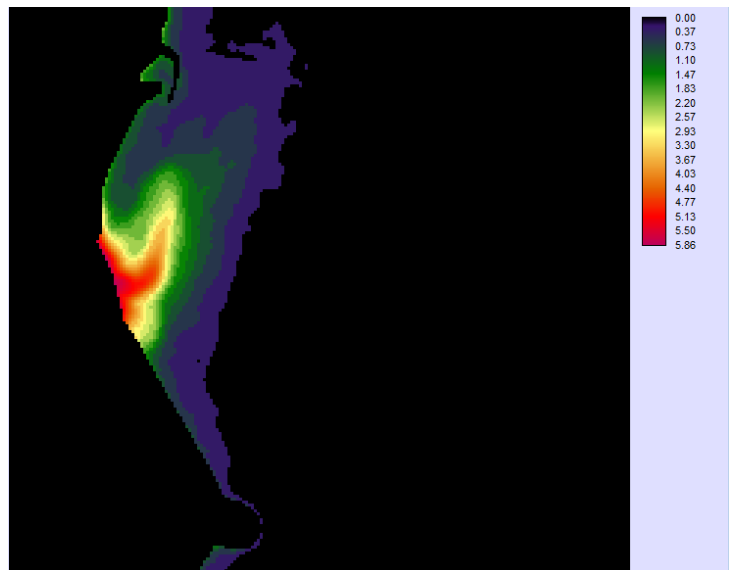


Figura 4.37. Imagen de datos obtenidos con IDRISI de los incrementos estratificados sobre la temperatura media del mar. Imagen de Febrero 2014 A.

## Análisis de la Descarga Térmica de la Central Nucleoeléctrica Laguna Verde, Veracruz, México

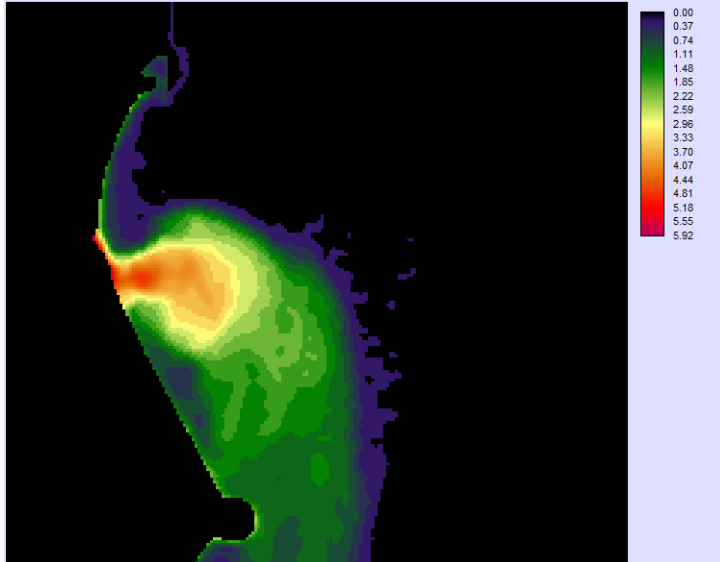


Tabla 4.14: Relación entre incremento de temperatura y las hectáreas que afecta, de la imagen de Febrero 2014 B.

| Incrementos | Número de Hectáreas |
|-------------|---------------------|
| 0           | 1992.15             |
| 1           | 336.87              |
| 2           | 185.49              |
| 3           | 65.43               |
| 4           | 39.24               |
| 5           | 5.40                |
| 6           | 0.09                |

Figura 4.38. Imagen de datos obtenidos con IDRISI de los incrementos estratificados sobre la temperatura media del mar. Imagen de Febrero 2014 B.

Tabla 4.15: Relación entre incremento de temperatura y las hectáreas que afecta, de la imagen de Julio 2013.

| Incremento | Número de Hectáreas |
|------------|---------------------|
| 0          | 2617.11             |
| 1          | 57.42               |
| 2          | 10.26               |
| 3          | 0.81                |

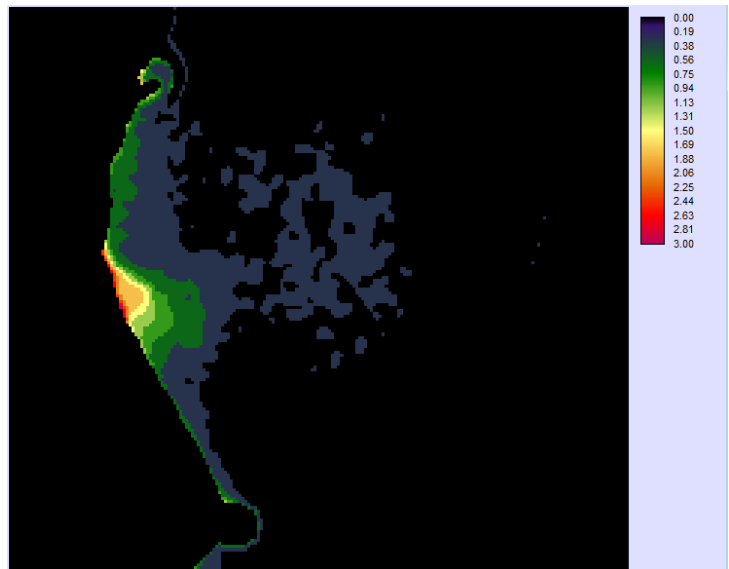


Figura 4.39. Imagen de datos obtenidos con IDRISI de los incrementos estratificados sobre la temperatura media del mar. Imagen de Julio 2013.

## CAPÍTULO 5. ANÁLISIS DE DATOS

Dentro del análisis de datos se presentará un extracto de análisis sobre el oleaje en Laguna Verde (Garnica Raúl 2008). Se presenta un régimen anual de oleaje, el cual divide la República Mexicana en varias zonas, se eligió la zona de interés (Figura 5.1) donde hay un régimen de oleaje en aguas profundas. La información dentro del estudio de oleaje fue obtenida del Manual de Dimensionamiento Portuario (SCT, 2001). En la Figura 5.2 se puede ver el régimen de oleaje en aguas profundas local y distante, la altura de ola se encuentra en metros.

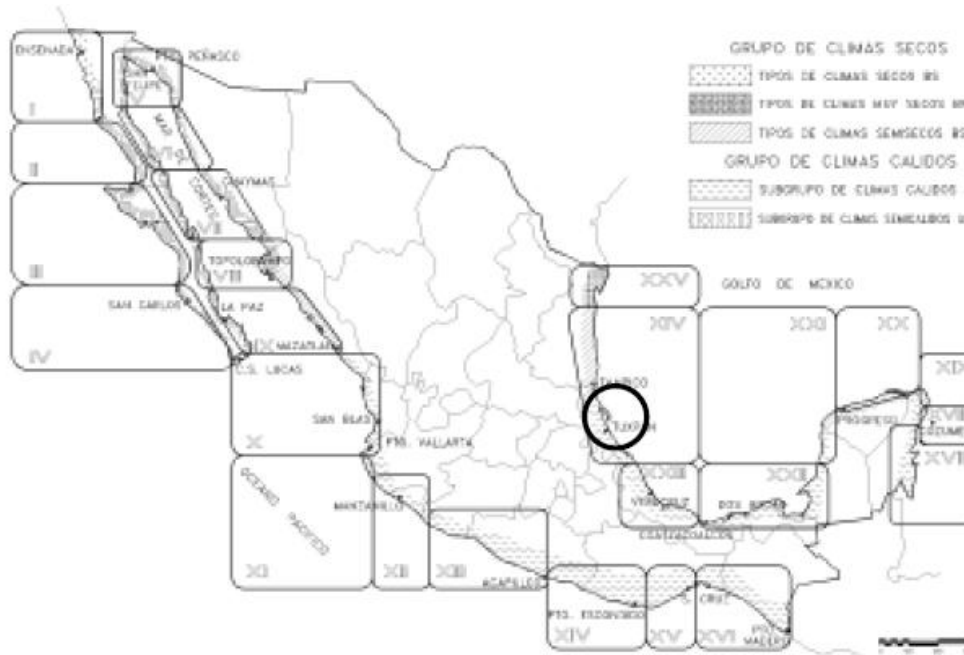


Figura 5.1. Zonificación de acuerdo a condiciones físicas. Fuente: Garnica Raúl 2008.

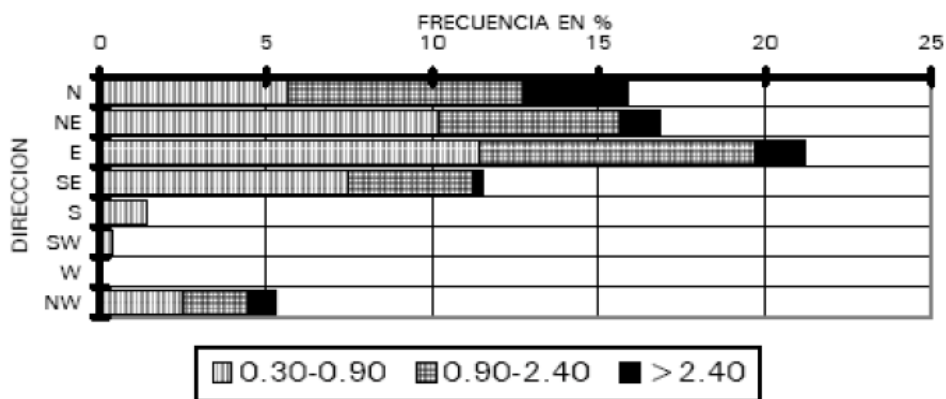


Figura 5.2. Régimen anual de oleaje. Fuente: Garnica Raúl 2008.

Análisis de la Descarga Térmica de la Central Nucleoeléctrica Laguna Verde, Veracruz, México

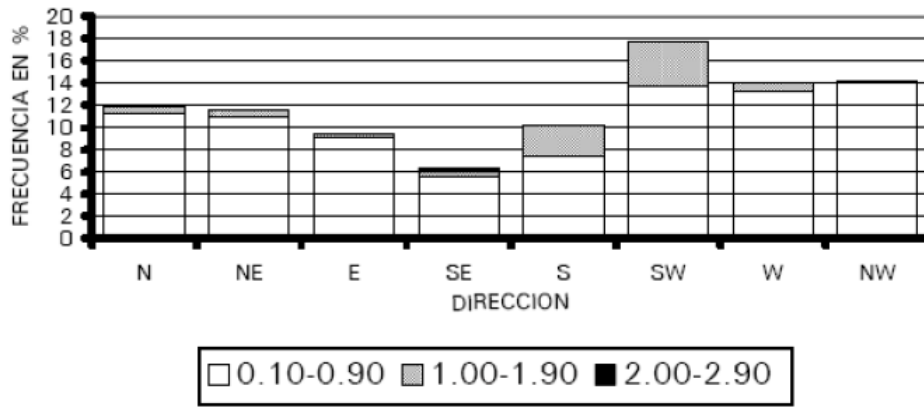


Figura 5.3. Régimen anual de corrientes. Fuente: Garnica Raúl 2008.

En el estudio muestra que el estudio de régimen anual de corriente arroja que en la zona de interés las corrientes son del tipo superficial y están representadas en la figura 5.3, dice que en el frente costero de la CNLV se presentaron en el periodo de 1982 a 1984 corrientes superficiales con intensidad máxima de 0.8 m/s en la dirección NW y WSW con una frecuencia relativa de 21.74% y 7.25% respectivamente. A su vez observa que durante este periodo las corrientes superficiales tuvieron un patrón predominante con las direcciones NW, WNW y S. (representado en la Figura 5.4 y la tabla 5.1)

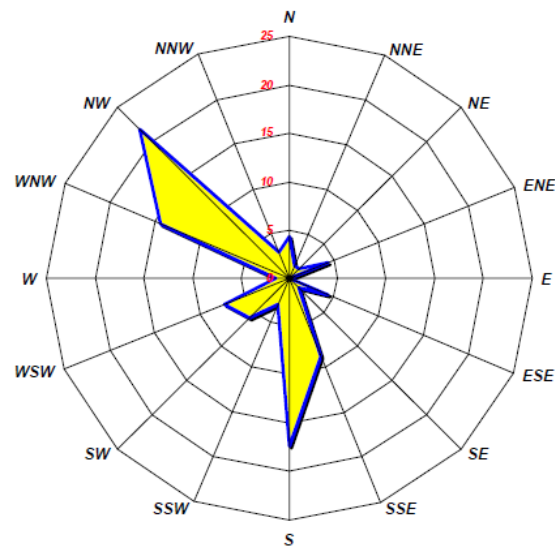


Figura 5.4. Rosa de dirección de corrientes. Fuente: Garnica Raúl 2008.

Tabla 5.1: Intensidad de corrientes superficiales en el frente costero de la CNLV. Periodo de mediciones 1982 a 1984.

| Dirección    | Velocidad (m/s) | Frec. Relativa | Dirección | Eventos   |
|--------------|-----------------|----------------|-----------|-----------|
| N            | 0.7             | 4.35           | N         | 3         |
| NNE          | 0.44            | 1.45           | NNE       | 1         |
| NE           | 0.62            | 1.45           | NE        | 1         |
| ENE          | 0.01            | 4.35           | ENE       | 3         |
| E            | 0               | 0.00           | E         | 0         |
| ESE          | 0.37            | 4.35           | ESE       | 3         |
| SE           | 0.03            | 1.45           | SE        | 1         |
| SSE          | 0.34            | 8.70           | SSE       | 6         |
| S            | 0.7             | 17.39          | S         | 12        |
| SSW          | 0.19            | 2.90           | SSW       | 2         |
| SW           | 0.66            | 5.80           | SW        | 4         |
| WSW          | 0.81            | 7.25           | WSW       | 5         |
| W            | 0.17            | 1.45           | W         | 1         |
| WNW          | 0.61            | 14.49          | WNW       | 10        |
| NW           | 0.8             | 21.74          | NW        | 15        |
| NNW          | 0.67            | 2.90           | NNW       | 2         |
| <b>TOTAL</b> |                 | <b>100</b>     |           | <b>69</b> |

Fuente: Garnica Raúl 2008.

Para poder leer mejor los datos la figura 5.5 es un mapa de ubicación de la obra de toma, el canal de descarga, las unidades de la Central y el desembocadura del Río en Viejón (Río más próximo a la Central que puede afectar el movimiento de las corrientes y oleaje).

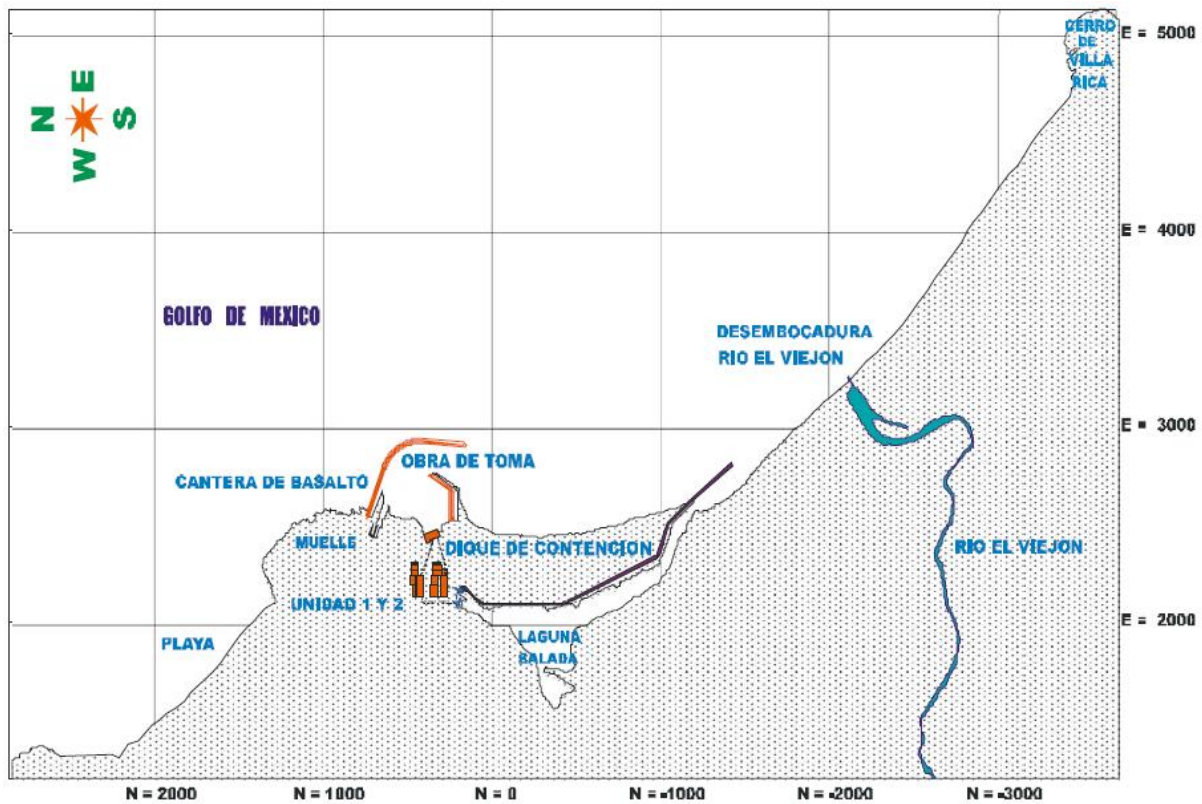


Figura 5.5. Ubicación de los componentes estudiados. Fuente: Garnica Raúl 2008.

Para la variación de las temperaturas en la tesis de maestría de Raúl Garnica muestra con base en su estudio y modelaciones la dispersión de la pluma de temperatura (Figura 5.6); en el inciso a) se tiene el inicio de la pluma de descarga con una temperatura de 44°C; en el inciso b) presenta una deflexión de la pluma hacia la obra de toma, esto debido a las forzantes de marea, corrientes y viento presentes para este escenario; en el inciso c) y d) muestran el efecto de la pluma dentro de la obra de toma, en el inciso e) y f) la pluma se pega a la línea de costa produciendo una situación crítica para la obra de toma, esto debido a la intensidad de la corriente marina la cual predomina con dirección Sur a Norte, para este escenario.

Con el estudio de Raúl Garnica podemos ver de forma clara que el estudio de las corrientes arroja que las mismas propician que el agua de la descarga regrese a la obra de toma lo cual puede entorpecer el funcionamiento del sistema de enfriamiento de la CNLV, observado en la figura 5.6, y en las figuras 4.28b y 4.31b.

## Análisis de la Descarga Térmica de la Central Nucleoeléctrica Laguna Verde, Veracruz, México

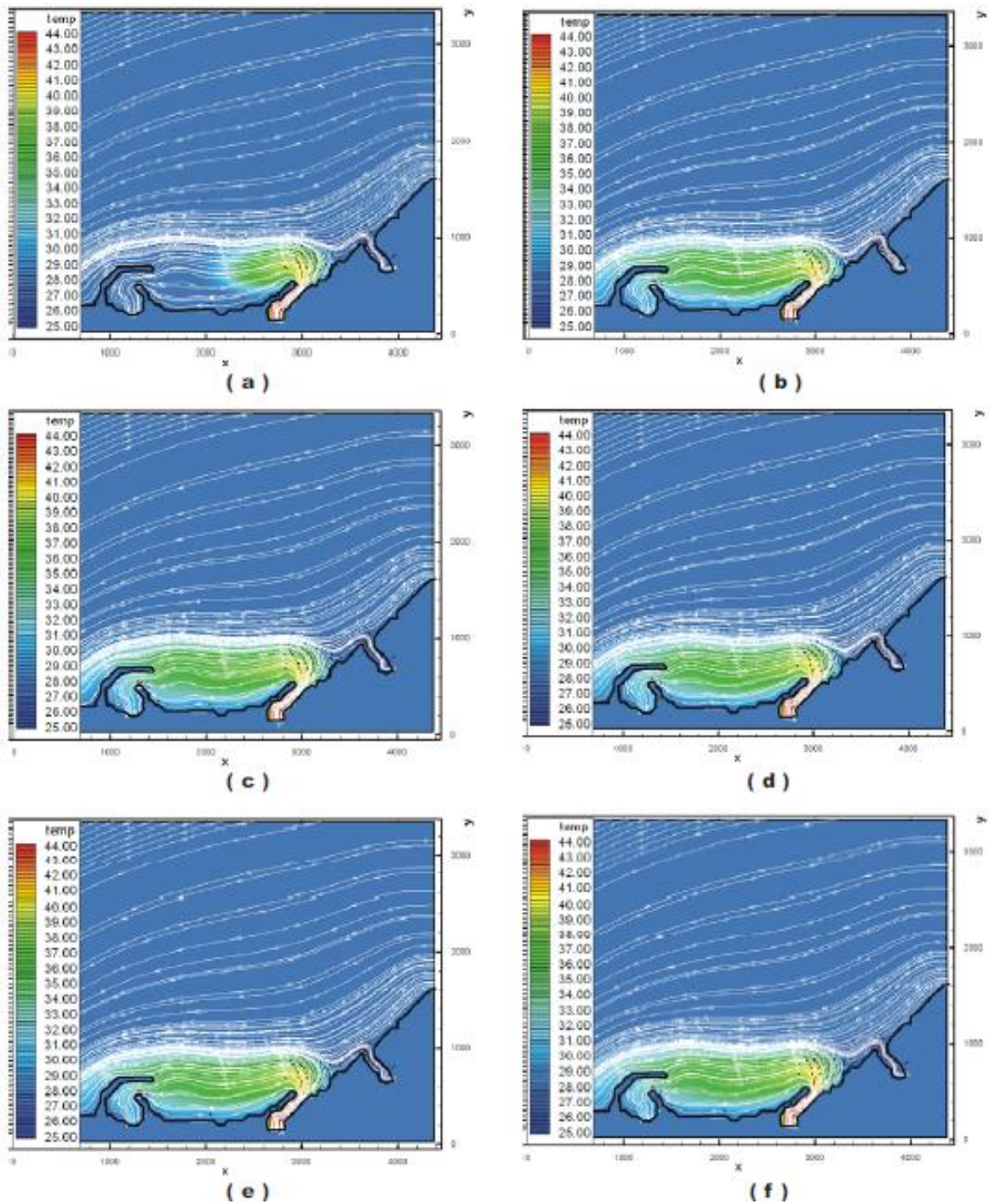


Figura 5.6. Dispersión de la pluma térmica del sistema de enfriamiento de la CNLV, a) 1 día de simulación, b) 3 días de simulación, c) 9 días de simulación, d) 45 días de simulación, e) 90 días de simulación, f) 120 días de simulación. Fuente: Garnica Raúl 2008.

En cuanto al impacto de la descarga térmica en el estudio hecho en esta tesis, arroja que si hay un incremento de la temperatura en cierta área del GM provocado por la descarga térmica de la CNLV, este incremento oscila entre los valores de 3 °C a 6 °C.

### *Programa de Monitoreo Ecológico*

El Programa de Monitoreo Ecológico (PME), pretende establecer los impactos que la operación de los sistemas de enfriamiento pudiera causar en los ecosistemas y organismos del área marina adyacente, mediante la comparación de los datos actuales con los obtenidos en la etapa preoperacional. De esta manera, se han verificado los cambios en la distribución, abundancia y diversidad de las poblaciones y se ha determinado la naturaleza y extensión de dichos cambios.

### *Descarga Térmica*

Una descarga térmica, para fines de impacto ecológico, es aquella cuyo propósito primario es la disposición del calor originado por procesos de intercambio en el interior de la planta, y cuyos contaminantes provienen de la adición de biocidas o sustancias inhibidoras de la corrosión (Langford, 1990).

Para el caso de la CNLV, las condiciones climatológicas, especialmente la velocidad del viento, las corrientes marinas y el oleaje, son las que determinan el comportamiento de la pluma térmica.

### *Características Abióticas*

Salinidad: La diferencia en promedios para las etapas pre y operacional fue de apenas 4 décimas y respecto a 2003 fue de 3 décimas.

Temperatura: Este factor de vital importancia para el desarrollo y distribución de muchos organismos presentó un promedio en la etapa operacional de 25.6 °C y de 26.1 °C en 2003. Con el estudio de percepción remota obtuvimos que para el 2014 las temperaturas varían entre 296.47 K y 301.04 K que equivalen a 24.32 °C y de 28.89 °C.

Para el 2003:

- El área de la pluma térmica (+ 2.5°C) abarcó de 3,0 km<sup>2</sup> a 0,7 km<sup>2</sup> equivalentes al 82,6 y 68,0% de las áreas establecidas en la evaluación del impacto ambiental y que sirvieron para el licenciamiento. El espesor de la “capa caliente” no rebasó los 2,0 m. Los factores ambientales con mayor influencia son el viento y las corrientes marinas.
- Las características bióticas, que pudieron haber sido afectadas por la descarga del agua de enfriamiento, no mostraron diferencias significativas entre las etapas pre y operacional, al igual que los promedios de densidad de organismos e índices de diversidad.

Para el 2014:

- De los meses estudiados por percepción remota, con incrementos en la temperatura de 1 °C tenemos área mínima impactada de 31.68 hectáreas en la imagen de Agosto 2014 B y área máxima impactada de 336.87 hectáreas, para incrementos de 3 °C tenemos área mínima impactada de 0.81 hectáreas para Julio del 2013 y área máxima impactada de 1.8 hectáreas para Agosto 2014 B; finalmente para incrementos de 6 °C tenemos área mínima impactada de 0.09 hectáreas para Agosto 2014 A y área máxima impactada de 1.98 hectáreas para Febrero 2014 A.
- Las características bióticas, que pudieron haber sido afectadas por la descarga del agua de enfriamiento, no podemos tener un resultado significativo ya que se necesitaría que fuera un trabajo multidisciplinario que midiera los promedios de densidad de organismos e índices de diversidad bajo las condiciones estudiadas en este trabajo.



## CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES

Se han cumplido los objetivos de la tesis; se explicaron los fundamentos de percepción remota, se analizaron y desarrollaron con brevedad temas como pre-procesamiento, procesamiento, análisis visual y digital de las imágenes. Lo anterior fue aplicado al estudio de caso elegido, usando los conceptos e imágenes satelitales pudimos evaluar el impacto térmico de la descarga de la Central Nucleoeléctrica Laguna Verde sobre el Golfo de México por percepción remota.

La energía nuclear es una de las mejores alternativas de producción de energía de origen no fósil que tenemos en el país, pero tiene sus impactos sobre el ambiente, de este trabajo podemos concluir que durante los meses de estudio y por el estudio de corrientes, la descarga térmica generada por el sistema de enfriamiento de la Central Nucleoeléctrica Laguna Verde regresa a la obra de toma, esto puede ser perjudicial para el sistema de enfriamiento de la planta ya que no capta agua a la temperatura de diseño necesaria para la operación, así también, en comparación al estudio de impacto ambiental del 2003 la temperatura de la descarga ha aumentado, debe ser de atención ya que en el 2003 el impacto ambiental sobre la zona era mínimo por la descarga, es posible que si sigue aumentando la temperatura, en un futuro se pueda alcanzar un umbral crítico en las cadenas tróficas; y por ser el Golfo de México un Gran Ecosistema Marino es sumamente importante tener cuidado y aplicar normas más estrictas, tener regulaciones y sanciones en caso de no cumplir con los estándares establecidos para los cuidados de la biodiversidad de la zona y de los servicios ambientales que este ofrece a los habitantes.

Los incrementos de temperatura afectan varias hectáreas, pero por el oleaje el calor se disipa poco a poco, aun así no es suficiente y es recomendable que se hiciera adecuaciones para tratar la temperatura de la descarga disminuyendo el impacto térmico que se genera sobre el Golfo de México. Como desventaja tenemos de los estudios por medio de percepción remota que para algunos meses del año no fue posible obtener imágenes de la zona por la nubosidad ya que estamos sujetos al clima del día en el que pasa el satélite, y no sabemos los incrementos que se presentan en estos meses. Es importante destacar que llegamos a incrementos de hasta 6 °C y esto puede afectar características físicas y químicas del hábitat; aun así, siendo la energía nuclear una de las menos populares en nuestro sistema de producción energético, la Central Nucleoeléctrica Laguna Verde trabaja bajo parámetros internacionales de cuidado y tratamiento sobre la disposición de sus desechos, el único cuidado adicional que sería recomendable traer a su atención es implementar alguna medida adicional para la disipación de calor de su descarga, evitando así futuros cambios ambientales.

Claro está que existe impacto por la descarga térmica pero es mínimo frente al impacto de las actividades de la industria y el petróleo, sin embargo es importante cuidar cada uno de los factores que puedan cambiar las condiciones del hábitat marino y de los servicios ambientales de los que la gente depende, a mayor temperatura, puede haber pérdida de especies o desplazamiento de sitios de desove, así como alteraciones en la producción de algas o condiciones propicias para el plancton, y dado que las cadenas tróficas están íntimamente conectadas y los malos usos que impactan el ambiente van en aumento, es importante cuidar zonas específicas como lo es el Golfo de México ya que éstas son sitios críticos megadiversos que funcionan como actores mitigantes ante la pérdida alarmante de biodiversidad que tiene tanto el país como el mundo.

## **BIBLIOGRAFÍA**

Aguirre Raúl, "Los mares mexicanos a través de la percepción remota". Instituto de Geografía UNAM, 2002.

Aldalur, B., and M. Santamaría. "REalce de imágenes: filtrado especial" Revista de Teledetección, no. 17 (2002): 31-42

Botello A., Rendón von Ostem J., Gold-Bpuchot G. y Agraz-Hernández C., "Golfo de México Contaminación e Impacto Ambiental: Diagnóstico y tendencias", UAC, UNAM, INE, SEMARNAT, UJAT, UIA, Gobierno de Veracruz, 2005

Campos, I. "Modelación de la recirculación de la descarga térmica de la Central Nucleoeléctrica Laguna Verde", Artículo para el Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM.

Cetto, Ana María. "La luz en la naturaleza y el laboratorio". México, D.F.: Fondo de Cultura Económica, 1996.

Christian E., Russel N., Bruce A. , Nathan J., Douglas J., "Airborne thermal remote sensing for water temperature assessment in rivers and streams", ELSEVIER, 2000: 387.

De Jong, Steven. "Remote Sensing Image Analysis, Including the spatial Domain". New York: Springer Science, 2005

Elachi, Charles, and Jakob van Zyl. "Introduction to the Physics and Techniques of Remote Sensing". 2a Edición. New Jersey: John Wiley & Sons, 2006

Garnica Miranda, R. "Modelo matemático de los fenómenos que modifican el oleaje. Aplicado a las obras de protección de la Central Nucleoeléctrica de Laguna Verde", Tesis para obtener grado de Maestro en Ingeniería, IPN, México, D.F., 2008.

Lagúnez J. "Plan Nacional de Laguna Verde de la CFE", Comisión Nacional de Electricidad.

Ledesma Hernández, S. "Diagnóstico ambiental de presas mediante el uso de la percepción remota", Tesis para obtener grado de Licenciado en Ingeniería, UNAM, México, D.F., 2013.

Mapping and Co solutions: <http://mappingandco.com/blog/disfrutando-del-landsat-8-1-parte-especificaciones-tecnicas/>

Olgún Ortiz, Miriam. "Fotografía del siglo XIX, principios del XX, Mujeres Productoras". D.F.: UNAM, ENAP, 2008

Pacholczyk, Philippe. "Spot satellite Family: Past, Present and Future of the Operations in the Mission and Control Center". 1993: 81-86.

Rees, Gareth. "Physical Principles of Remote Sensing". Cambridge: Cambridge University Press, 2001.

Rivera Arraiga E., y Borges Souza G., "El Gran Ecosistema Marino del Golfo de México: Perspectivas para su Manejo", Centro EPOMEX-UAC, Jaina Boletín informativo Vol (16) 1.

Sistema de Información Satelital: <http://www.sib.gov.ar/doc337.html>

Sepúlveda Hirose, R. "Diseño de modelos de calidad del agua mediante el uso de la percepción remota", Tesis para obtener grado de Maestro en Ingeniería, UNAM, México, D.F., 2011.

Vázquez, Alba. "Evaluación de la Calidad del Agua Mediante Percepción Remota". Tesis para obtener grado de Maestra en Ingeniería, UNAM, México, D.F., 2000