



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

---

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Cálculo de temperatura de la  
superficie del relleno  
sanitario de Tlalnepantla de  
Baz mediante imágenes  
satelitales Landsat 8**

**TESIS**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**Ingeniero Geomático**

**PRESENTA**

Luis Gerardo Luna Soto

**DIRECTORA DE TESIS:**

Dra. Griselda Berenice Hernández Cruz

Ciudad universitaria, Cd. Mx. 2018





Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Ciudad Universitaria CDMX a 02 de abril de 2018

**M. EN I. GERMAN LÓPEZ RINCÓN**  
PRESIDENTE DEL COMITÉ DE TITULACIÓN  
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y GEOMÁTICA.  
P R E S E N T E.

Me dirijo a usted en su calidad de Presidente del Comité de Titulación de la División a su cargo, para solicitar su autorización para obtener mi título de licenciatura, apegándome a la opción:

**I. Titulación mediante tesis o tesina y examen profesional**

Misma que aprobó el Consejo Técnico de la Facultad de Ingeniería en su sesión ordinaria celebrada el 22 de abril del 2015, de acuerdo al artículo 20 del Reglamento General de Exámenes de la UNAM. Por lo que pongo a consideración el tema:

Cálculo de temperatura de la superficie del relleno sanitario de Tlalnepantla de Baz mediante imágenes satelitales landsat 8

Me doy por enterado que para obtener mi título profesional mediante esta opción debo cumplir con los siguientes requisitos:

- ✓ Registro del tema de tesis o tesina ante el comité de titulación
- ✓ Presentar tesis o tesina aprobada por el director del trabajo escrito
- ✓ Presentar replica oral.

Esperando contar con su respuesta favorable, le envío un cordial saludo.

Atentamente

  
Luis Gerardo Luna Soto

No. de cuenta: 414002153  
Teléfonos: 044 7751392739  
Correo electrónico: luisglunas@gmail.com  
Dirección: Plutarco Elías Calles 165 Jaltepec, Tulancingo de Bravo, Hidalgo C.P. 43700

ANEXO: enviar su información al correo: [secretariatecnicacivil@hotmail.com](mailto:secretariatecnicacivil@hotmail.com)

- ✓ Historial académico

# Agradecimientos

Gracias al proyecto PAPIIT IA108017, titulado: "uso de aeronaves no tripuladas y percepción remota para el monitoreo de biogás en rellenos sanitarios" por el apoyo en el trabajo de campo y la adquisición de datos.

# Resumen

Para el presente trabajo se partió de la hipótesis de que el metano aumenta la temperatura de la superficie de un relleno sanitario. La temperatura se puede conocer por medio de sensores remotos. El estudio se realizó tomando muestras de la temperatura y aplicando el algoritmo split window a las imágenes para obtener el valor de la temperatura de la superficie. Para validar la información se utilizó la prueba estadística chi cuadrada para conocer la correlación entre los datos. Con los datos obtenidos se encontró que existe una gran correlación entre las temperaturas tomadas en campo y las obtenidas con las imágenes. Estos resultados son de gran importancia ya que con este algoritmo se puede estudiar la temperatura de otros rellenos sanitarios sin tener que ir directamente al sitio. El algoritmo se puede usar también, en gran escala, para estudiar el calentamiento global.

For the present work, it was hypothesized that methane increases the surface temperature of a landfill. The temperature can be known towards remote sensors. The study was carried out by taking samples of the temperature and applying the split window algorithm to the images to obtain the value of the surface temperature. To validate the information, the chi square statistical test was used to know the correlation between the data. With the data obtained it was found that there is a great correlation between the temperatures taken in the field and those obtained with the images. These results are of great importance since with this algorithm, the temperature of other landfills can be studied without having to go directly to the site. The algorithm can also be used, on a large scale, to study global warming.

# Introducción

La percepción remota es la ciencia que se encarga de estudiar la superficie de la Tierra sin estar en contacto con ella. Esta ciencia tiene diversas aplicaciones, por ejemplo estudios de vegetación, derrames de hidrocarburos, calentamiento global, entre otras. En este trabajo se estudia una de las aplicaciones antes mencionadas, la cual es la temperatura de la superficie terrestre, específicamente aplicado a un relleno sanitario.

Para este estudio se partió de la hipótesis de que la producción de metano aumenta la temperatura de la superficie del relleno sanitario. Para comprobar que existiera un escape de metano hacia el exterior se realizó un estudio teórico en el cual se utilizaron diferentes datos del relleno y de estudios anteriores para determinar la producción de metano que tenía el relleno.

El siguiente estudio que se realizó fue práctico, en el que se tomaron diferentes lecturas de la temperatura in situ, para poder compararlas con el resultado de aplicar un algoritmo de temperatura a las imágenes satelitales.

A los resultados obtenidos se les aplicó una prueba estadística para ver la concordancia entre ellos y con los resultados de la prueba se pudo determinar la veracidad de los resultados obtenidos, y si el algoritmo aplicado a las imágenes es de utilidad.

# Índice

Índice de figuras	VI
Índice de tablas	VIII
<b>1 Percepción remota</b>	<b>1</b>
1.1 Percepción remota . . . . .	1
1.1.1 Definición . . . . .	1
1.1.2 Aplicaciones . . . . .	2
1.2 Espectro electromagnético . . . . .	2
1.2.1 Definición . . . . .	3
1.2.2 Regiones del espectro electromagnético . . . . .	4
1.3 Ventanas atmosféricas . . . . .	6
1.4 Sensores . . . . .	6
1.4.1 Thermal Infrared Sensor . . . . .	7
1.4.2 MODIS . . . . .	8
1.5 Plataformas satelitales . . . . .	9
1.5.1 Landsat 8 . . . . .	9
1.5.2 Aqua . . . . .	10
<b>2 Temperatura de la superficie terrestre</b>	<b>11</b>
2.1 Conceptos básicos . . . . .	11
2.1.1 Radiancia ( $L$ ) . . . . .	11
2.1.2 Transmitancia ( $\tau$ ) . . . . .	11
2.1.3 Radiancia espectral ( $L_\lambda$ ) . . . . .	11
2.1.4 Dispersión (Canada Centre for Remote Sensing, 2016) .	12
2.1.5 Dispersión Rayleigh (Canada Centre for Remote Sensing, 2016) . . . . .	12

2.1.6	Dispersión Mie (Canada Centre for Remote Sensing, 2016) . . . . .	13
2.2	Emisividad de la superficie terrestre (LSE) . . . . .	13
2.2.1	Emisividad espectral (Liang, Li, & Wang, 2012) . . . . .	13
2.2.2	Emisividad – e (Norman & Becker, 1995) . . . . .	14
2.2.3	Emisividad – r (Norman & Becker, 1995) . . . . .	14
2.3	Temperatura de la superficie terrestre . . . . .	15
2.3.1	Temperatura termodinámica o cinética (Norman & Becker, 1995) . . . . .	15
2.3.2	Temperatura de brillo (Liang, Li, & Wang, 2012) . . . . .	16
2.3.3	Temperatura radiométrica (Becker & Li, 1995) . . . . .	17
<b>3</b>	<b>Pre – procesamiento de imágenes</b>	<b>19</b>
3.1	Pre – procesamiento . . . . .	19
3.1.1	Corrección geométrica . . . . .	19
3.1.2	Corrección radiométrica . . . . .	21
3.1.3	Corrección atmosférica . . . . .	21
3.2	Procesamiento . . . . .	22
3.3	Post-procesamiento . . . . .	23
<b>4</b>	<b>Temperatura en la superficie del relleno sanitario</b>	<b>24</b>
4.1	Área de estudio . . . . .	24
4.2	Datos generales . . . . .	24
4.3	Potencial de generación de biogas . . . . .	26
4.4	Procesamiento de imagenes . . . . .	34
4.4.1	Radiancia en la parte superior de la atmósfera . . . . .	35
4.4.2	Temperatura de brillo en el satélite . . . . .	35
4.4.3	Temperatura de la superficie terrestre (Algoritmo Split Window) . . . . .	36
<b>5</b>	<b>Resultados y conclusiones</b>	<b>38</b>
5.1	Resultados . . . . .	38
5.2	Conclusiones . . . . .	43
<b>A</b>	<b>Valores de chi-cuadrada</b>	<b>49</b>

# Índice de figuras

1.1	Muestra las regiones del espectro electromagnético. Imagen modificada de una imagen de la NASA, 2007 . . . . .	4
1.2	Ventanas atmosféricas. La transmisión al 100% significa que existe una ventana atmosférica en esa región. Imagen tomada de Canada Centre for Remote Sensing, 2016. . . . .	7
2.1	Imagen que muestra el fenómeno de dispersión. Imagen tomada de Canada Centre for Remote Sensing, 2016. . . . .	12
3.1	Ejemplo de la respuesta y la corrección sistemática de la imagen del mapa del río Amazonas, Brasil. La imagen de la izquierda representa una imagen que muestra una distorsión sistemática debido al movimiento de la plataforma causado por el movimiento hacia adelante del avión o nave espacial. La imagen de la derecha representa las correcciones aplicadas a la imagen. Imagen tomada de (Khorram et al., 2016). . . . .	20
3.2	Un ejemplo de corrección radiométrica de las líneas de datos caídas en una imagen del escáner de color oceánico (OCS) de San Pablo Bay, CA, y su delta asociado. Imagen tomada de (Khorram, Coastwatch–water quality mapping of the entire San Francisco Bay and delta from Landsat multispectral scanner data, 1982). . . . .	21
3.3	La figura muestra la integración de toda la información, vectorial y raster, después del post - procesamiento de la imagen. Imagen tomada de (Khorram et al., 2016) Cortesía de la NOAA	23
4.1	Localización del relleno sanitario de Tlalnepantla de Baz. . . . .	25

4.2	Tonelaje por subproducto. Imagen tomada del estudio de IN-CREMI, 2011 . . . . .	26
4.3	La figura superior muestra la composición de los residuos sólidos muestreados en el frente de trabajo; mientras que la figura inferior muestra el promedio de composición de subproductos. Imagen tomada del estudio de INCREMI, 2011 . . . . .	27
4.4	La imagen muestra la disposición por año de residuos sólidos desde el año 1998 . . . . .	28
4.5	Digitalización de las zonas de cobertura. . . . .	29
4.6	Digitalización de las zonas de cobertura. . . . .	30
4.7	Hoja de alimentación del modelo mexicano del biogás . . . . .	31
4.8	Hoja de disposición y recuperación de biogás . . . . .	32
4.9	Criterios utilizados para el cálculo de la eficiencia del sistema de captura . . . . .	33
4.10	Criterios utilizados para el cálculo de la eficiencia del sistema de captura . . . . .	33
4.11	Gráfica donde se muestra los resultados finales del modelo mexicano del biogás . . . . .	34
5.1	Imagen obtenida después de aplicar el algoritmo Split Window. Temperatura mostrada en grados centígrados. . . . .	39
5.2	Datos obtenidos in situ y de satélite . . . . .	40
5.3	Temperatura tomada entre las 15:36 y 16:33 horas . . . . .	42
A.1	Valores de chi cuadrada para diferentes grados de libertad. Imagen tomada de McKillup & Dyar (2010) . . . . .	50

# Índice de tablas

1.1	Longitudes de onda captadas por el sensor OLI, resolución de la imagen y la banda en la que se encuentran en el archivo. Tabla tomada de (United States Geological Survey, 2016) . . .	8
4.1	Valor de coeficientes de algoritmo split window. . . . .	37

# Capítulo 1

## Percepción remota

### 1.1 Percepción remota

La percepción remota es una herramienta que ayuda al estudio de la superficie terrestre ya que se cuenta con diferentes recursos con los que se puede estudiar diferentes aspectos como son: el agua, vegetación, ordenamiento territorial. En este trabajo se va a utilizar la percepción remota para el estudio de la temperatura de la superficie terrestre.

#### 1.1.1 Definición

La percepción remota o teledetección es, en términos generales, pero razonablemente hablando, la recopilación de información sobre un objeto sin estar en contacto físico con él (Rees, 2013). La percepción remota también es la medición de las propiedades del objeto en la superficie terrestre usando datos adquiridos de aeronaves y satélites (Schowengerdt, 2006).

En la actualidad, es una herramienta que ahorra muchos recursos, entre ellos, se encuentran los recursos económicos y de tiempo. Es por ello que esta ciencia se ha aplicado en diversos campos de estudios.

### 1.1.2 Aplicaciones

Algunas aplicaciones importantes de la percepción remota son (Schowengerdt, 2006):

1. Evaluación y monitoreo ambiental (crecimiento urbano, residuos peligrosos)
2. Detección y vigilancia del cambio global (agotamiento del ozono atmosférico, deforestación, calentamiento global)
3. Agricultura (condición del cultivo, predicción del rendimiento, erosión del suelo)
4. Exploración de recursos no renovables (minerales, petróleo, gas natural)
5. Recursos naturales renovables (humedales, suelos, bosques, océanos)
6. Meteorología (dinámica de la atmósfera, predicción del tiempo)
7. Mapeo (topografía, uso del suelo, ingeniería civil)
8. Vigilancia y reconocimiento militar (política estratégica, evaluación táctica)
9. Medios de comunicación (ilustraciones, análisis)

## 1.2 Espectro electromagnético

El espectro electromagnético forma parte de la vida cotidiana. Este se encuentra en diferentes lugares, desde un horno de microondas hasta nuestra propia vista. Todo lo que podemos ver es solo una porción de éste. Es por esto que su estudio es de gran importancia para entender algunos fenómenos que nos rodean.

### 1.2.1 Definición

El espectro electromagnético describe todas las longitudes de onda de la luz (Crockett, 2016). En otras palabras, el espectro electromagnético es la radiación electromagnética (REM), que se define como toda la energía que se mueve con la velocidad de la luz en un patrón de onda armónica (Khorram, Van Der Wiele, Koch, Nelson, Potts, 2016), es decir, siguen un patrón establecido y son a intervalos iguales.

Las diferentes formas de REM varían a través del espectro en términos de longitud de onda y frecuencia (Khorram et al., 2016). La longitud de onda es la distancia que se mide desde un punto de una onda al mismo punto, pero de la siguiente onda, generalmente se mide de cresta a cresta, es decir, desde el punto más alto de una onda al punto más alto de otra, se mide en metros (m). La frecuencia es el número de ondas que pasan por un punto en un periodo de tiempo, se mide en Hertz (Hz).

La ecuación matemática que relaciona todos los conceptos antes mencionados es la siguiente:

$$c = \lambda f \tag{1.1}$$

Donde:

$c$  = velocidad de la luz

$\lambda$  = longitud de onda

$f$  = frecuencia

De acuerdo con Khorram et al., 2016:

*“Cuando el REM entra en contacto con la materia (es decir, cualquier objeto o material, tal como árboles, agua o gases atmosféricos), produce interacciones. Las interacciones posibles son: absorción, reflexión, dispersión o emisión de REM por la materia, o transmisión de REM a través de la materia. La teledetección se basa principalmente en la detección y grabación de REM reflejada y emitida.*

*Ya que la REM abarca muchas longitudes de ondas se ha decidido dividirla en pequeñas regiones según su aplicación en diferentes campos de estudio como medicina, telecomunicaciones, entre otros.”*

### 1.2.2 Regiones del espectro electromagnético

El espectro electromagnético se puede dividir en diferentes regiones dependiendo del campo de estudio. La clasificación más común se muestra en la figura 1.1.

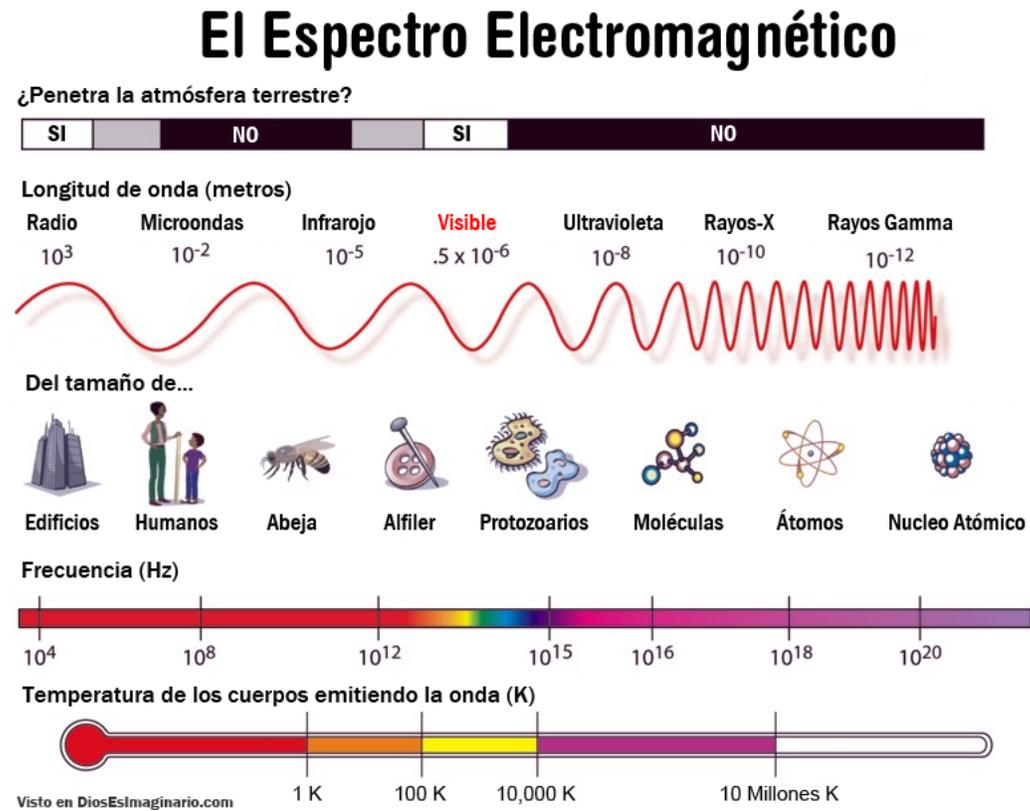


Figura 1.1: Muestra las regiones del espectro electromagnético. Imagen modificada de una imagen de la NASA, 2007

A continuación se muestra la clasificación del espectro electromagnético:

1. Radio. Esta región se encuentra entre  $10^1 - 10^4$  m. Las frecuencias bajas son reflejadas por la atmósfera terrestre. Se usan principalmente en radio y TV, ingeniería electrónica, industria de la comunicación, medicina, resonancias magnéticas.
2. Microondas. Se encuentra en la región de  $10^{-3} - 10^{-1}$  m. Estas ondas son bloqueadas por puntos pequeños en las puertas de los hornos de microondas. Su uso es principalmente para cocina, TV y teléfono de larga distancia, RADAR y mapeo de terreno.
3. Infrarrojo (IR). Se ubican en la región entre  $10^{-7} - 10^{-3}m$ . Pasa a través de la bruma en la atmósfera. Se usa para calefacción y secado, cámaras de visión nocturna, controles remotos y percepción remota. Para fines de la percepción remota, el infrarrojo se subdivide en dos clasificaciones más, las cuales son:
  - (a) Infrarrojo reflectivo: Se utiliza para fines de teledetección de formas muy similares a la radiación en la parte visible. El IR reflejado cubre longitudes de onda de aproximadamente  $0,7 \mu\text{m}$  a  $3,0 \mu\text{m}$ . En esta clasificación se encuentra el infrarrojo cercano y de onda corta (Canada Centre for Remote Sensing, 2016).
  - (b) Infrarrojo termal. Esta región es en la cual se basa el estudio realizado en este trabajo. La región es muy diferente de las porciones IR visible y reflejada, ya que esta energía es esencialmente la radiación que se emite de la superficie de la Tierra en forma de calor. El IR térmico cubre longitudes de onda de aproximadamente  $3,0 \mu\text{m}$  a  $100 \mu\text{m}$  (Canada Centre for Remote Sensing, 2016).
4. Visible. Se ubica entre  $3.8 \times 10^{-7} - 7.8 \times 10^{-7}$  m. Esta región es solo 1/40 de toda la REM. Se relaciona con lo que el ojo y las cámaras comunes pueden “ver”, también es usado en optometría.
5. Ultravioleta (UV). Se encuentra entre  $10^{-8} - 7 * 10^{-7}$  m. Algunos materiales de la superficie terrestre principalmente rocas y minerales emiten radiación UV visible. Sin embargo, la radiación UV se dispersa en gran parte por la atmósfera terrestre y, por lo tanto, no se utiliza en el campo de la percepción remota. Se usa principalmente en fotoquímica y efectos foto – eléctricos.

6. Rayos – X. Esta región se encuentra entre  $10^{-11} - 10^{-8}$  m. La longitud de onda es del tamaño de un átomo. Se usa en medicina, cristalografía, astrofísica y percepción remota.
7. Rayos Gamma. Esta región tiene una longitud de onda inferior a  $10^{-11}$  m. Puede causar daño a los tejidos e ionización. Se usa para el estudio de estructuras de núcleos, geofísica y exploración minera.

La información anterior fue tomada de (Finkenthal, y otros) y (Canada Centre for Remote Sensing, 2016)

### 1.3 Ventanas atmosféricas

En la atmósfera existen diversos gases, y debido a que estos gases absorben energía electromagnética en regiones muy específicas del espectro, influyen en las zonas donde podemos “observar” para fines de teledetección. Aquellas áreas del espectro que no están severamente influenciadas por la absorción atmosférica y, por tanto, son útiles para sensores remotos, se denominan ventanas atmosféricas (Figura 1.2) (Canada Centre for Remote Sensing, 2016)

Las ventanas atmosféricas están presentes en la parte visible ( $0,4 \mu\text{m} - 0,76 \mu\text{m}$ ) y las regiones infrarrojas del espectro electromagnético. En la parte visible, la transmisión se efectúa principalmente por absorción de ozono y por dispersión molecular. La atmósfera es transparente nuevamente más allá de  $\lambda = 1\text{mm}$ , la región utilizada para la teledetección de microondas (Aggarwal, 2004).

### 1.4 Sensores

Los instrumentos de teledetección son de dos tipos principales: activo y pasivo. Los sensores activos proporcionan su propia fuente de energía para iluminar los objetos que observan. Un sensor activo emite radiación en la dirección del objetivo a investigar. El sensor detecta entonces y mide la radiación que se refleja o retrodispersa desde el objetivo. Los sensores pasivos, por otro lado, detectan la energía natural (radiación) que se emite o refleja por el objeto o escena que se observa. La luz solar reflejada es la fuente de

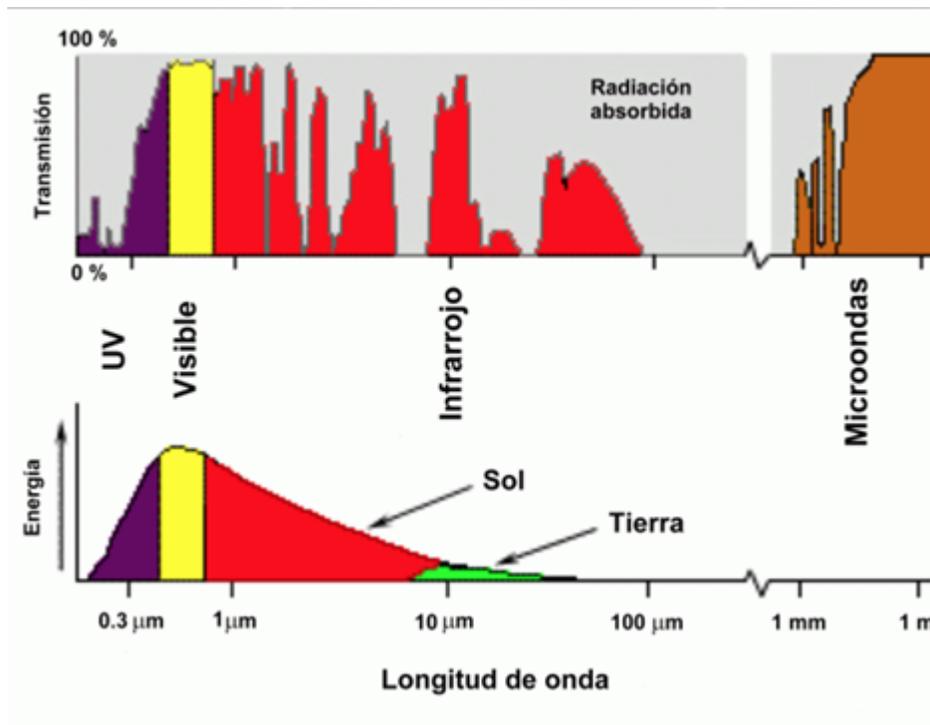


Figura 1.2: Ventanas atmosféricas. La transmisión al 100% significa que existe una ventana atmosférica en esa región. Imagen tomada de Canada Centre for Remote Sensing, 2016.

radiación más común medida por los sensores pasivos (NASA, 2017).

Para el presente trabajo se utilizaron los sensores TIRS y MODIS, a bordo de los satélites Landsat 8 y Aqua, respectivamente. Ambos sensores pasivos

### 1.4.1 Thermal Infrared Sensor

De acuerdo a (Dunbar, 2016):

*“El sensor infrarrojo térmico (TIRS) mide la temperatura de la superficie terrestre en dos bandas térmicas con una nueva tecnología que aplica la física cuántica para detectar el calor.”*

*TIRS utiliza fotodetectores de infrarrojos de pozo cuánticos (QWIPs) para detectar largas longitudes de onda de la luz emitida por la Tierra cuya intensidad depende de la temperatura de la superficie. Estas longitudes de onda, llamadas infrarrojos térmicos, están muy por encima del alcance de la visión humana. Los QWIP son una alternativa nueva y de menor costo a la tecnología convencional de infrarrojos y fueron desarrollados en el Centro de Vuelos Espaciales Goddard de la NASA en Greenbelt, Maryland”*

Las longitudes de onda en las que puede captar información este sensor se muestran en la tabla 1.1

Tabla 1.1: Longitudes de onda captadas por el sensor OLI, resolución de la imagen y la banda en la que se encuentran en el archivo. Tabla tomada de (United States Geological Survey, 2016)

Banda	Longitud de onda ( $\mu\text{m}$ )	Resolución ( $m$ )
Banda 10 – TIR – 1	10.60 – 11.19	100
Banda 11 – TIR – 2	11.50 – 12.51	100

## 1.4.2 MODIS

MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) es un instrumento a bordo de los satélites Terra (originalmente conocidos como EOS AM – 1) y Aqua (Originalmente conocido como EOS PM – 1) (NASA, 2008). MODIS provee una alta sensibilidad radiométrica (12 bit) en 36 bandas espectrales de 0.4 a 14.4  $\mu\text{m}$ . Las primeras 19 bandas están posicionadas en la región del espectro electromagnético situado entre 0.405 nm y 2.155 nm. Las bandas de la 1 a la 7 son útiles para las aplicaciones terrestres; las bandas 8 a la 16 para las observaciones oceánicas y las bandas 17 a 19 para las mediciones atmosféricas (Mas (Coordinador), 2011). Las bandas 20 a la 36, cubren la porción del infrarrojo térmico del espectro de 3,660-14,385 nm (NASA, 2008).

## 1.5 Plataformas satelitales

Para que un sensor recoja y registre energía reflejada o emitida desde un blanco o superficie, debe residir en una plataforma estable retirada del blanco o superficie que se está observando. Las plataformas para sensores remotos pueden estar situadas en el suelo, en un avión o globo (o en alguna otra plataforma dentro de la atmósfera de la Tierra), o en una nave espacial o satélite fuera de la atmósfera terrestre (Canada Centre for Remote Sensing, 2016).

### 1.5.1 Landsat 8

Landsat es una constelación de satélites que sirven para el monitoreo de la Tierra en diferentes aspectos, como la temperatura, la vegetación, derrames de hidrocarburos, entre otras. El programa Landsat comenzó en 1972 con el lanzamiento del primer satélite. En este trabajo en específico se va a utilizar información del satélite Landsat 8 (L8).

De acuerdo con (United States Geological Survey, 2016), L8 ofrece las siguientes características:

1. Continuidad de los datos: L8 es la última de una serie continua de satélites terrestres de detección remota que comenzó en 1972.
2. Misión de Encuesta Global: Los datos de L8 sistemáticamente construyen y refrescan periódicamente un archivo global de imágenes de la masa terrestre de la Tierra, iluminadas por el sol, sustancialmente libres de nubes.
3. Productos de Datos Estándar Gratuitos: Los productos de datos L8 están disponibles gratuitamente a través del Centro de Observación y Ciencia de Recursos Terrestres (EROS) del Servicio Geológico de los EE. UU. (USGS).
4. Calibración radiométrica y geométrica: Los datos de los dos sensores (OLI) y del sensor infrarrojo térmico (TIRS), están calibrados a una incertidumbre superior al 5.0 % en términos de reflectancia de la parte superior de la atmósfera (TOA) o radiancia espectral absoluta, Y tienen

una precisión geodésica absoluta mejor que 65 metros de error circular con un 90 % de confianza (CE 90).

5. Entrega Respuesta: Los sistemas automatizados de procesamiento de solicitudes proporcionan los productos electrónicamente en un plazo de 48 horas desde el pedido (normalmente mucho más rápido).

### 1.5.2 Aqua

Aqua, del latín agua, es un satélite de la NASA nombrado así por la gran cantidad de información que la misión está obteniendo sobre el ciclo del agua de la Tierra, incluyendo evaporación de los océanos, vapor de agua en la atmósfera, nubes, precipitación, humedad de los suelos, hielo marino, hielo terrestre y cubierta de nieve sobre la Tierra y hielo (NASA, 2017). Variables adicionales están siendo medidas por Aqua, las cuales incluyen los flujos de energía radiativa, los aerosoles, la cobertura vegetal de la Tierra, el fitoplankton y la materia orgánica disuelta en los océanos, y las temperaturas del aire, de la Tierra y del agua (NASA, 2017).

La misión Aqua forma parte del Sistema Internacional de Observación de la Tierra (EOS, por sus siglas en inglés) centrado en la NASA. Aqua fue antes nombrado EOS PM, lo que significa su hora de cruce ecuatorial, que es por la tarde (NASA, 2017).

# Capítulo 2

## Temperatura de la superficie terrestre

### 2.1 Conceptos básicos

#### 2.1.1 Radiancia ( $L$ )

La radiancia es el total de energía radiada por unidad de área y por ángulo sólido de medida. Es un término fundamental en teledetección porque, describe lo que mide el sensor. Se cuantifica en watts por metro cuadrado y estéreo – radian  $W/m^2sr$  (Chuvieco, 1990).

#### 2.1.2 Transmitancia ( $\tau$ )

Es la relación entre el flujo incidente y el transmitido por la superficie (Chuvieco, 1990).

#### 2.1.3 Radiancia espectral ( $L_\lambda$ )

De acuerdo a Chuvieco (1990):

*“Por extensión del concepto anterior, indica el total de energía radiada en una determinada longitud de onda por unidad de área, y por ángulo sólido de medida. Por cuanto, el sensor detecta una banda particular del espectro,*

*ésta es la medida más cercana a la observación remota. De igual forma que la radiancia, la emitancia e irradiancia también pueden completarse con el calificativo de espectral (añadiendo el subíndice  $\lambda$ ), para referir a una determinada longitud de onda.”*

#### **2.1.4 Dispersión (Canada Centre for Remote Sensing, 2016)**

La dispersión ocurre cuando partículas o grandes moléculas de gas presentes en la atmósfera interactúan con ella, y causa que la radiación electromagnética sea redirigida de su trayectoria original (Figura 2.1).

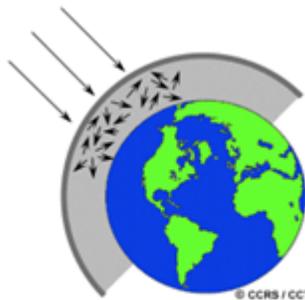


Figura 2.1: Imagen que muestra el fenómeno de dispersión. Imagen tomada de Canada Centre for Remote Sensing, 2016.

#### **2.1.5 Dispersión Rayleigh (Canada Centre for Remote Sensing, 2016)**

La dispersión Rayleigh ocurre cuando las partículas son muy pequeñas en comparación con la longitud de onda de la radiación. Este tipo de dispersión es la que más domina en la atmósfera superior. El fenómeno de que el cielo aparezca azul se debe a este fenómeno.

### 2.1.6 Dispersión Mie (Canada Centre for Remote Sensing, 2016)

La dispersión Mie ocurre cuando el tamaño de las partículas es exactamente igual que la longitud de onda de la radiación. Polvo, polen, humo y agua son causas comunes de la dispersión Mie la cual tiende a afectar mayormente las longitudes de onda más largas que aquellas afectadas por la dispersión Rayleigh.

## 2.2 Emisividad de la superficie terrestre (LSE)

La superficie terrestre está emitiendo calor constantemente y este puede cuantificarse mediante diferentes métodos (Li, y otros, 2013). Existen diferentes tipos de emisividades de la superficie, entre ellas se encuentra: la emisividad espectral, emisividad - e y emisividad - r.

### 2.2.1 Emisividad espectral (Liang, Li, & Wang, 2012)

La emisividad espectral es la proporción de radiación del objeto y la del cuerpo negro isotérmico, está expresada como:

$$\epsilon(\lambda, T) = \frac{M(\lambda, T)}{M_b(\lambda, T)} \quad (2.1)$$

Donde  $M(\lambda, T)$  es la exitancia del objeto en  $Wm^{-2}$ , y  $M_b(\lambda, T)$ , es la exitancia isothermal del cuerpo negro.  $\epsilon(\lambda, T)$  representa la capacidad del objeto para emitir radiación térmica, se determina por la composición del objeto y su estado físico. Para la mayoría de las categorías de superficie terrestre, la emisividad es direccional. En la escala de píxeles de percepción remota, las características heterogéneas y no isotérmicas de los píxeles hacen que la definición anterior sea inaplicable. Como resultado, LSE debe redefinirse en la escala de píxeles de percepción remota.

### 2.2.2 Emisividad – e (Norman & Becker, 1995)

La emisividad – e, es definida como la proporción de la radiación total de la superficie de un objeto natural con la radiación de un cuerpo negro con una distribución idéntica de temperatura. Cuando el pixel tiene N componentes:

$$\epsilon_{e,i}(\theta, \varphi) = \frac{\sum_{k=1}^N a_k \epsilon_{r,i,k}(\theta, \varphi) T_{R,i,k}^n(\theta, \varphi)}{\sum_{k=1}^N a_k T_{R,i,k}^n(\theta, \varphi)} \quad (2.2)$$

Donde  $a_k$  es la proporción del área normalizada del componente K,  $\epsilon_{r,i,k}(\theta, \varphi)$ , es la emisividad de cada componente en la dirección de  $(\theta, \varphi)$ , y  $T_{R,i,k}^n(\theta, \varphi)$ , es la aproximación de la función exponencial de la radiación del cuerpo negro. Así, la emisividad electrónica es una función de las temperaturas de los componentes de un objeto.

### 2.2.3 Emisividad – r (Norman & Becker, 1995)

La emisividad – r puede usarse para expresar la ponderación de área de la emisividad del componente, que no tiene relación con la temperatura del componente. Si un píxel tiene N componentes, entonces:

$$\epsilon_{r,i}(\theta, \varphi) = \sum_{k=1}^N a_k \epsilon_{r,i,k}(\theta, \varphi) \quad (2.3)$$

Los dos tipos anteriores de emisividad no incorporan la contribución resultante de la dispersión múltiple por los componentes. Wan & Dozier (1994), definieron dos tipos de emisividad equivalente de manera similar al método de Norman y Becker:

$$\epsilon_i = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} f(\lambda) [a_i \epsilon_i(\lambda) B(\lambda, T_1) + a_2 \epsilon_2(\lambda) B(\lambda, T_2)] d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} f(\lambda) [B(\lambda, T_1) + B(\lambda, T_2)] d\lambda} \quad (2.4)$$

y

$$\epsilon_i = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} f(\lambda)[a_i\epsilon_i(\lambda) + a_2\epsilon_2(\lambda)]d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} f(\lambda)d\lambda} \quad (2.5)$$

Donde  $\epsilon_i$  es la emisividad equivalente para el canal  $i$ ,  $\lambda_1$  y  $\lambda_2$ , son los límites inferior y superior del canal  $i$ , respectivamente;  $f(\lambda)$  es la función de respuesta para el canal  $i$ ;  $a_i$  es el área proporcional del componente;  $\epsilon_i$  es la emisividad del componente;  $B$  es la función de Planck; y  $T_1$  es la temperatura del componente.

## 2.3 Temperatura de la superficie terrestre

La temperatura es una propiedad fundamental de la superficie de la Tierra que puede determinarse remotamente (Gillespie, 2014). Este es un tema de gran importancia ya que provoca grandes cambios en todos los niveles de la vida. Para entender mejor el concepto de temperatura de la superficie terrestre, a continuación, se describen los conceptos básicos.

### 2.3.1 Temperatura termodinámica o cinética (Norman & Becker, 1995)

La temperatura real de la superficie de un objeto se puede medir con un termómetro de alta precisión poniéndose en contacto con el objeto. La temperatura termodinámica es una cantidad macroscópica que es constante en cualquier grupo de subsistemas que estén en equilibrio termodinámico. Las condiciones para el equilibrio termodinámico en un sistema compuesto de varios subsistemas se pueden obtener maximizando la energía de los pares de entropía en cada subsistema. Para todo el sistema, el equilibrio de cada subsistema se logra cuando la diferenciación de energía en cada par de entropía permanece inalterada:

$$\frac{\partial S}{\partial E} = \frac{1}{T} \quad (2.6)$$

donde  $S$  es la entropía,  $E$ , es la energía en  $J$  y  $T$ , es la temperatura cinética en grados  $K$ . En la ecuación anterior, la diferenciación parcial de  $E$  con respecto de  $S$  principalmente sugiere que otros parámetros permanecen constantes en este estado. Aunque la maximización de entropía total no se utiliza para ilustrar el lado derecho de esta ecuación, esta definición es consistente con la definición de la temperatura absoluta de un gas ideal:

$$PV = NkT \quad (2.7)$$

donde  $P$  es la presión de aire, usualmente en  $kPa$  o  $atm$ ;  $V$  es el volumen, usualmente en  $L$ ;  $N$  es el número de moléculas, en  $mol$ ; y  $k = 1.38 \times 10^{23} J/K$ , la cual es la constante de Boltzmann.  $T$  es la temperatura termodinámica o temperatura absoluta en grados  $K$ . La temperatura termodinámica puede ser explicada como temperatura cinética desde una perspectiva estadística y definida sobre la base de la energía cinética media de las partículas a escala microscópica. La energía cinética media de un sistema de partículas de gas de un solo átomo sin rotación y vibración se expresa como:

$$\frac{1}{2}m \langle v^2 \rangle = \frac{3}{2}kT \quad (2.8)$$

donde  $m$  es el peso de la partícula,  $\langle v^2 \rangle$  es el valor promedio del cuadrado de la velocidad de la partícula, y  $k$  es la constante de Boltzmann. La temperatura definida en la ecuación 2.8, es conocida como la temperatura cinética en movimiento, sin embargo, el término temperatura cinética es comunmente usado.

### 2.3.2 Temperatura de brillo (Liang, Li, & Wang, 2012)

La temperatura de brillo se ha utilizado ampliamente en la medición infrarroja térmica de la Tierra y aplicaciones de percepción remota en la porción

del infrarrojo térmico. Cuando la radiancia de un objeto es igual a la de un cuerpo negro determinado, la temperatura física de este cuerpo negro se define como la temperatura de luminosidad del objeto. La temperatura de brillo tiene las dimensiones de la temperatura, pero carece del significado físico de la temperatura.

### 2.3.3 Temperatura radiométrica (Becker & Li, 1995)

La temperatura radiométrica está definida como  $L_\lambda$ , que es, la radiancia emitida por la superficie. Sea  $\epsilon_\lambda$  la emisividad de la superficie;  $R_\lambda$  que es el valor de radiación medido por un radiómetro, se aproxima entonces como:

$$R_\lambda = L_\lambda + (1 - \epsilon_\lambda)R_{u,\lambda} \quad (2.9)$$

Donde:

$$L_\lambda = \epsilon_\lambda B_\lambda(T) \text{ en } Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$$

$T$  = Temperatura radiométrica de la superficie en grados  $K$

$R_{u,\lambda}$  = Radiación atmosférica hacia abajo en  $Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$

$B_\lambda$  = Función de Planck.

$$B_\lambda(T) = \frac{2hc^2}{\pi\lambda^5(e^{hc/k\lambda T} - 1)} = \frac{C_1}{\lambda^5(e^{C_2/k\lambda T} - 1)} \quad (2.10)$$

Donde:

$$h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ Js}$$

$$c = 2.99793 \times 10^8 \text{ m/s}$$

$$k = 1.3806 \times 10^{-23} \text{ J/K}$$

$$C_2 = hc/k = 14388 \text{ } \mu mK$$

La temperatura radiométrica es la temperatura de un cuerpo negro con la radiancia de  $L_\lambda/\epsilon_\lambda$ , que es:

$$T = B^{-1}[L_\lambda/\epsilon_\lambda] = \frac{C_2}{k \ln \frac{C_1}{\lambda^5(L_\lambda/\epsilon_\lambda)} + 1} \quad (2.11)$$

Donde:

$B^{-1}$  = Función inversa de la función de Planck.

# Capítulo 3

## Pre – procesamiento de imágenes

### 3.1 Pre – procesamiento

Las imágenes satelitales necesitan un pre – procesamiento el cual consta de tres correcciones: geométrica, atmosférica y radiométrica. Estas correcciones se realizan para minimizar las distorsiones y / o errores en una imagen que pudieran dificultar la clasificación exitosa (Khorram et al., 2016).

#### 3.1.1 Corrección geométrica

Esta corrección tiene como propósito eliminar todas las distorsiones debidas a movimiento o velocidad del satélite ya que estas variaciones provocan cambios en las coordenadas de los pixeles. Esta corrección también es llamada georreferenciación.

De acuerdo con Khorram et al., 2016:

*“Las imágenes pueden contener dos tipos de distorsiones geométricas: sistemática y no sistemática. Las distorsiones sistemáticas se deben al movimiento de la plataforma causado por el movimiento hacia adelante de la aeronave o de la nave espacial, las variaciones en la velocidad de exploración de los espejos, las distorsiones panorámicas, las variaciones en la velocidad*

*de la plataforma y las distorsiones debidas a la curvatura de la Tierra. Las distorsiones no sistemáticas suelen ser debidas a malfuncionamiento del sensor o variaciones en la altitud y comportamiento del sensor.”*

Esta corrección también se realiza para ajustar la imagen al terreno y así poder tener datos precisos de lo que existe sobre la superficie en las coordenadas exactas, ya que, esta corrección “estira” la imagen para así poder coincidir con las coordenadas de la superficie (Figura 3.1). Muchos errores de distorsión sistemática se pueden minimizar usando ecuaciones para ajustar las ubicaciones de píxeles sistemáticamente a través de toda la imagen (Khorram et al., 2016).

Puede utilizarse una variedad de modelos de transformación para alinear la imagen objetivo, con la referencia basada en estos puntos de control, incluyendo transformaciones lineales tales como la transformación afín y transformaciones no rígidas tales como splines (Fonseca & Manjunath, 1996; Zitová, 2003).

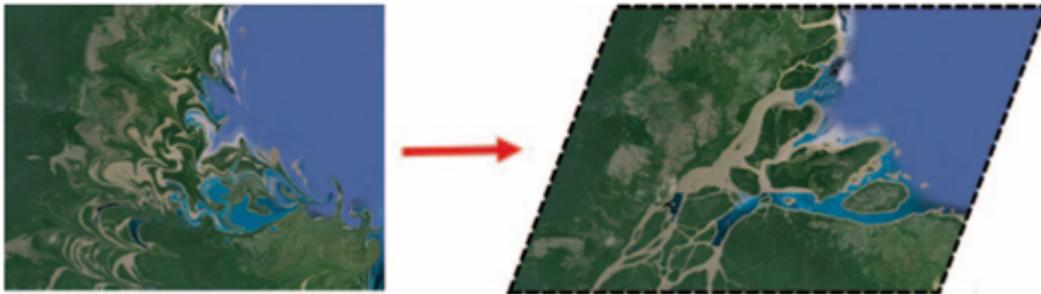


Figura 3.1: Ejemplo de la respuesta y la corrección sistemática de la imagen del mapa del río Amazonas, Brasil. La imagen de la izquierda representa una imagen que muestra una distorsión sistemática debido al movimiento de la plataforma causado por el movimiento hacia adelante del avión o nave espacial. La imagen de la derecha representa las correcciones aplicadas a la imagen. Imagen tomada de (Khorram et al., 2016).

### 3.1.2 Corrección radiométrica

Las distorsiones radiométricas varían entre los diferentes sensores. Normalmente las correcciones de elevación solar y las correcciones de distancia Tierra-Sol se aplican a los datos de satélite para eliminar los efectos de la posición estacional del Sol en relación con la Tierra y para normalizar las variaciones estacionales en la distancia entre la Tierra y el Sol (Khorram et al., 2016).

Esta corrección básicamente consiste en la corrección de los valores de los píxeles que tengan valores erróneos. Los sensores, algunas veces pueden fallar. Las causas pueden incluir la cuantificación de la señal, la falta de información en las líneas y la grabación (Khorram et al., 2016). Las líneas faltantes se pueden corregir reemplazando los valores espectrales de la banda que falta con el promedio de la(s) línea(s) por encima y por debajo de ellos (Figura 3.2) (Khorram et al., 2016).

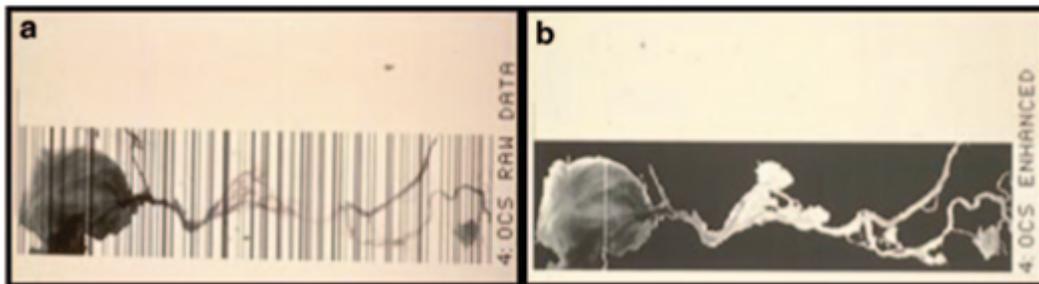


Figura 3.2: Un ejemplo de corrección radiométrica de las líneas de datos caídas en una imagen del escáner de color oceánico (OCS) de San Pablo Bay, CA, y su delta asociado. Imagen tomada de (Khorram, Coastwatch–water quality mapping of the entire San Francisco Bay and delta from Landsat multispectral scanner data, 1982).

### 3.1.3 Corrección atmosférica

Las partículas suspendidas u otros materiales en la atmósfera en el momento de la adquisición de información pueden cambiar los datos (es decir, los valores de píxeles) registrados por los sensores a bordo de satélites (Khorram

et al., 2016). En general, los métodos para eliminar o minimizar los efectos atmosféricos en una imagen pueden clasificarse como de naturaleza absoluta o relativa (Khorram, Nelson, Cakir, & Van der Wiele, Digital image acquisition, preprocessing, and data reduction, in Handbook of Satellite Applications, 2013).

La corrección radiométrica absoluta de la atenuación atmosférica toma en cuenta el ángulo del cenit solar en el momento del paso por el satélite, el espesor óptico total causado por la dispersión molecular, la transmitancia atmosférica para un determinado ángulo de incidencia, la irradiancia espectral en la parte superior de la atmósfera y Las leyes de dispersión de Rayleigh y Mie (Forster, 1984; Khorram et al., 2005; Turner y Spencer, 1972).

La corrección radiométrica relativa de la atenuación atmosférica, normaliza las intensidades entre diferentes bandas dentro de una escena, para eliminar los problemas relacionados con el detector, o corrige las intensidades mediante una comparación con una superficie de referencia estándar en la misma fecha y en la misma escena (Jensen, 2005).

## 3.2 Procesamiento

Las imágenes satelitales multiespectrales que han pasado por el pre - procesamiento están listas para su procesamiento, lo que significa esencialmente que están listas para la clasificación de imágenes (Khorram et al., 2016).

Para realizar esta clasificación se tiene que tomar en cuenta el valor que tiene el pixel ya que sirve para determinar las características del mismo y de esta forma, ir agrupando pixeles con valores cercanos entre sí, para así formar una cubierta. Esta clasificación se usa generalmente para realizar discriminación de diferentes cubiertas, es decir, cubierta vegetal, urbana, de cultivo, entre otras.

Por lo tanto, la clasificación de imágenes es un paso crítico en un proyecto de detección remota porque extrae la información más esencial y significativa de un conjunto de datos multidimensionales que de otro modo sería difícil de interpretar (Khorram et al., 2016).

### 3.3 Post-procesamiento

En el post – procesamiento de imágenes, se realizan diferentes procesos dependiendo de lo que se quiera obtener. Por ejemplo, se pueden aplicar filtros espaciales, para resaltar algunas estructuras lineales, por ejemplo, carreteras.

Toda esta información se utiliza, por ejemplo, para detección de cambios o calcular algunas características de la superficie terrestre, por ejemplo, la temperatura.

Al finalizar el post – procesamiento toda la información se integra en una sola base de datos, la cual puede incluir datos vectoriales y los resultados de la clasificación de la imagen (figura 3.3).

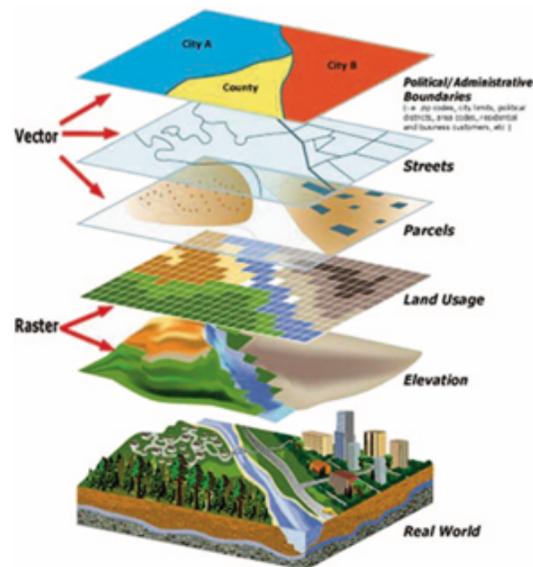


Figura 3.3: La figura muestra la integración de toda la información, vectorial y raster, después del post - procesamiento de la imagen. Imagen tomada de (Khorram et al., 2016) Cortesía de la NOAA

# Capítulo 4

## Temperatura en la superficie del relleno sanitario de Tlalnepantla de Baz

### 4.1 Área de estudio

Un relleno sanitario es una obra de infraestructura que involucra métodos y obras de ingeniería para la disposición final de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial, con el fin de controlar, a través de la compactación e infraestructura adicional, los impactos ambientales (Diario Oficial de la Federación, 2004).

El relleno se encuentra en el municipio de Tlalnepantla de Baz, estado de México, entre las coordenadas geográficas 19.588698 - 19.585225 N, -99.203075 - -99.208787 W, se encuentra en promedio a 2320 msnm (Figura 4.1)

### 4.2 Datos generales

Los rellenos sanitarios son áreas de gran importancia debido a que son una fuente importante de dióxido de carbono ( $CO_2$ ) y de metano ( $CH_4$ ). El  $CH_4$  y el  $CO_2$ , ambos gases de efecto invernadero, contribuyen al calentamiento global. El  $CH_4$ , en particular, es un gas que contribuye en gran medida al calentamiento global el cual tiene efectos 25 veces mayor que el  $CO_2$  (He,

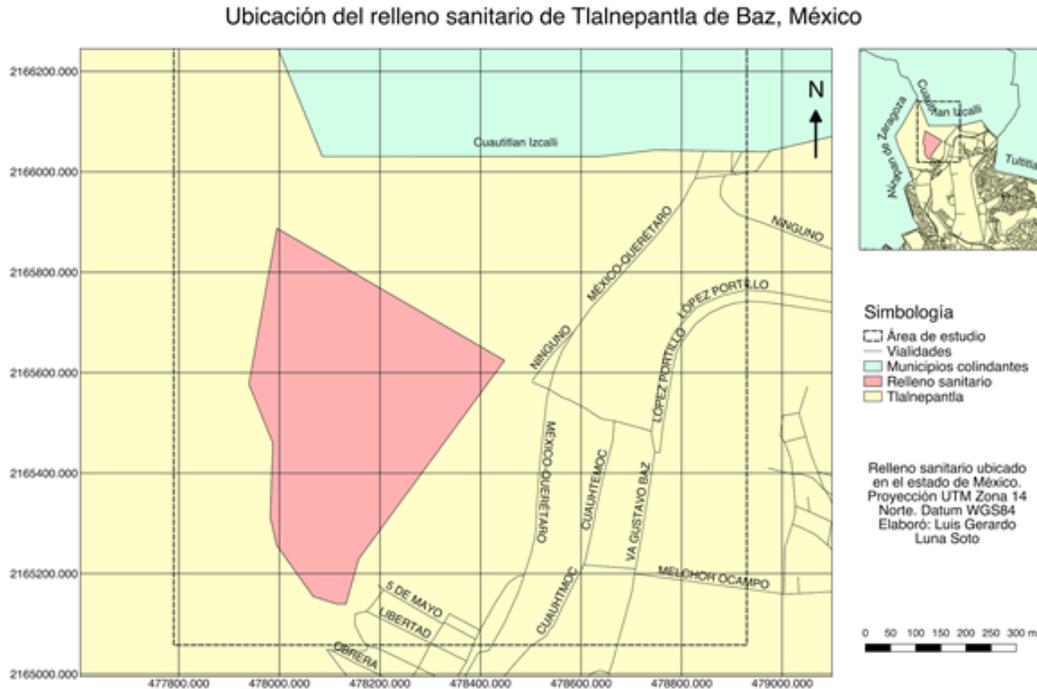


Figura 4.1: Localización del relleno sanitario de Tlalnepantla de Baz.

1997). El aumento de la preocupación por el medio ambiente ha puesto de manifiesto los efectos perjudiciales del  $CH_4$  y el  $CO_2$  de los rellenos sanitarios (Park & Shin, 2001).

El relleno ha operado desde 1998 y se pronostica que termine sus operaciones en el 2024. Durante el año 2016 recibió un promedio de 95 toneladas diarias de residuos. Hasta el momento se han dispuesto cerca de 5 millones de toneladas desde el inicio de operaciones. La superficie que ocupa el predio es de 28.3 ha.

### 4.3 Potencial de generación de biogás

El cálculo del potencial de generación de biogás es una herramienta para tener un estimado de cuánto biogás está produciendo el relleno sanitario. Con base en diversos datos del relleno se puede generar una gráfica con el modelo mexicano de biogás v2.0 (MMB) y ver qué cantidad de biogás escapa a la atmósfera y qué cantidad es captada por los pozos de venteo.

En el año 2011, la empresa Ingeniería para el control de residuos municipales e industriales (INCREMI) realizó un estudio de caracterización de residuos bajo la norma nacional. Un extracto de los resultados se muestra a continuación (Figura 4.2 y 4.3):

SUBPRODUCTO	%PESO	TONELADA
Residuos alimenticios y otros orgánicos biodegradables	23.57	219.19
Papel y cartón	11.93	110.97
Plástico.	20.87	194.05
Textiles	6.41	59.61
Hule y Cuero	0.94	8.70
Residuos de jardinería y fibra dura vegetal	11.31	105.21
Madera y Hueso	7.19	66.87
Vidrio	5.80	5.95
Metales	1.26	11.76
Cenizas, tierra y finos	0.83	7.70
Otros.	9.89	91.97
<b>Total</b>		<b>930</b>

Figura 4.2: Tonelaje por subproducto. Imagen tomada del estudio de INCREMI, 2011

SUBPRODUCTO	Día 1	Día 2	Día 3	PROMEDIO (%)
Envase de cartón encerado.	0.99	0.57	0.90	0.81
Cartón.	3.67	2.02	2.92	2.83
Lata aluminio.	0.19	0.62	0.00	0.28
Lata metálica.	0.89	0.92	1.17	1.00
Papel.	5.45	4.16	9.52	6.39
Higiénico.	0.00	2.90	2.69	1.96
Pañal desechable.	23.67	11.78	16.98	17.14
Hueso.	0.00	0.00	1.24	0.43
Plástico.	22.04	15.85	14.23	17.15
Poliestireno expandido.	1.92	1.81	1.98	1.90
Residuos alimentos.	12.68	10.18	5.90	9.46
Fibra dura vegetal.	0.00	9.99	10.58	7.19
Residuos jardinería.	5.08	5.01	3.29	4.44
Madera.	0.00	13.50	6.83	7.15
Trapo.	7.63	5.78	5.82	6.35
Vidrio de color.	3.67	3.78	5.07	4.19
Vidrio transparente.	0.00	1.86	3.02	1.70
Loza y cerámica.	0.19	0.00	0.00	0.06
Zapatos.	2.36	1.30	2.37	1.99
Hule.	0.00	2.81	0.00	1.00
Otros.	8.75	4.25	4.75	5.77
Residuo fino.	0.81	0.92	0.75	0.83
<b>TOTAL</b>				<b>100.00</b>

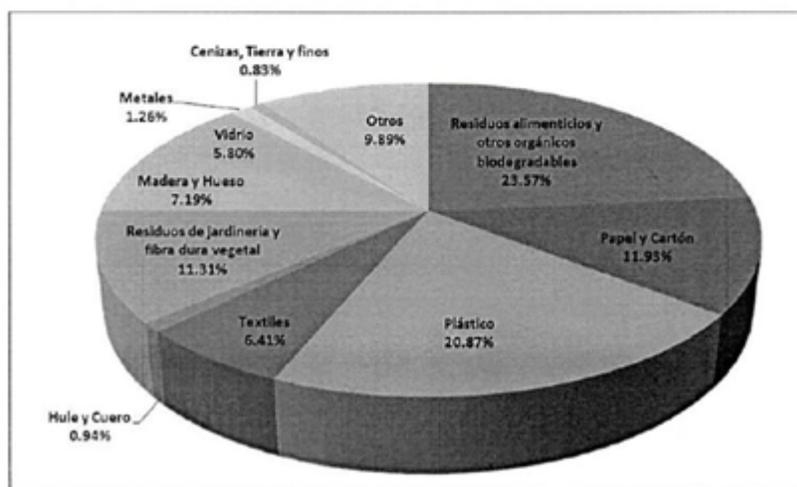


Figura 4.3: La figura superior muestra la composición de los residuos sólidos muestreados en el frente de trabajo; mientras que la figura inferior muestra el promedio de composición de subproductos. Imagen tomada del estudio de INCREMI, 2011

Con base en las bitácoras del ingreso de residuos al relleno, proporcionadas por la empresa, se conformó una tabla que muestra el volumen dispuesto de residuos, desde el año de apertura hasta el 2016.

El comportamiento de los últimos 3 años fue elegido para proyectar la cantidad más probable de desechos que se dispondrán hasta el final de la vida útil del relleno sanitario mediante una regresión lineal (Figura 4.4).

<b>Año</b>	<b>Toneladas dispuestas</b>	
1998	224,386.20	
1999	316,545.13	
2000	290,389.93	
2001	274,069.83	
2002	276,643.45	
2003	366,918.62	
2004	442,640.90	
2005	404,459.13	
2006	398,592.36	
2007	508,640.12	
2008	329,662.70	
2009	314,634.82	
2010	290,651.40	
2011	323,808.00	
2012	327,948.00	
2013	247,318.00	<b>tc %</b>
2014	250,195.00	<b>1.163</b>
2015	246,211.00	<b>-1.592</b>
2016	250,023.00	<b>1.548</b>
<b>tc% promedio</b>		<b>0.373</b>

Figura 4.4: La imagen muestra la disposición por año de residuos sólidos desde el año 1998

Con la regresión lineal que se calculó, se obtuvo una tasa de crecimiento de 0.373, con la cual se puede predecir el comportamiento de los siguientes años.

Otra de las variables que pide el MMB es la cobertura del sitio. Para obtener estos datos se utilizó una imagen satelital y se digitalizaron las zonas de cobertura (Figura 4.5) utilizando los siguientes criterios:

1. Cobertura final. Se digitalizaron las zonas donde el talud se observó

bien conformado y con vegetación sobre ella, ya que esto quiere decir que en esas zonas ya no se realiza ningún trabajo.

2. Cobertura intermedia: Se digitalizaron las áreas donde la cubierta se vió más “fresca”, es decir, que el color se vió más claro que los otros lugares.
3. Sin cobertura. Para este caso solo se digitalizaron las zonas donde se observaron los desechos al aire libre.
4. Cubierta diaria. Para esta área solo se creó el polígono del área vacía entre el área sin cobertura y cobertura intermedia.

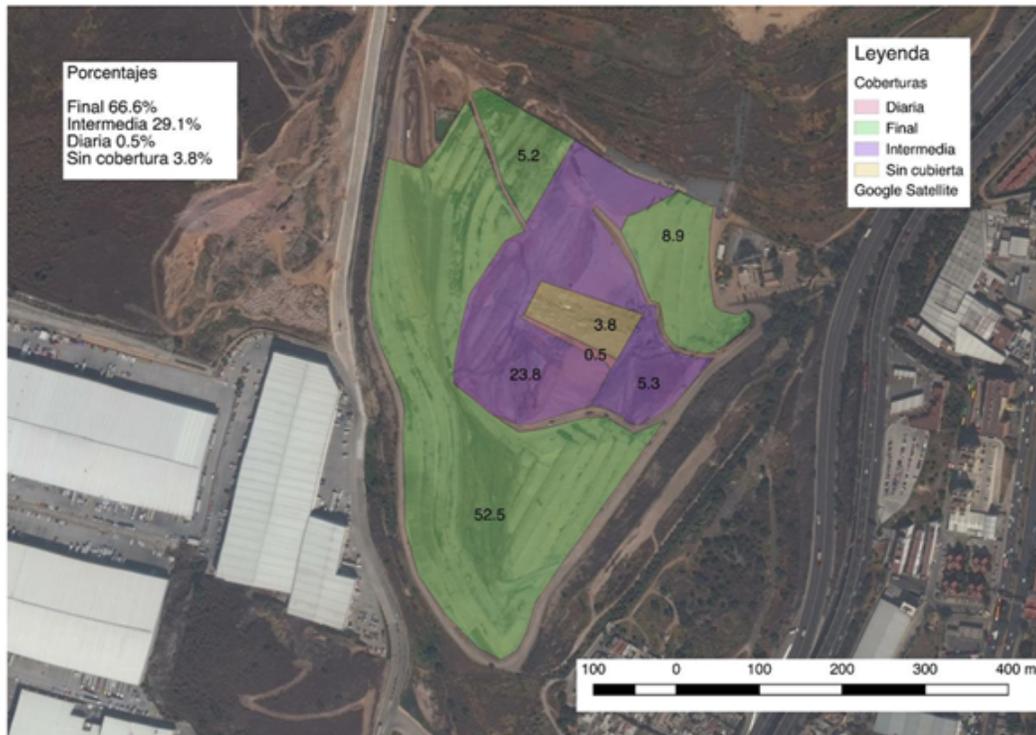


Figura 4.5: Digitalización de las zonas de cobertura.

El MMB requiere información de la altura promedio de residuos. Dado que existe cierta irregularidad, tanto en la base del relleno como en la superficie de la cubierta final, se optó por considerar la mayor cantidad posible

de puntos para determinar un promedio de altura de las celdas. Los puntos considerados corresponden con la ubicación de los pozos de venteo. Para el cálculo de la altura promedio se utilizó la topografía de 1998 y la más actualizada que se tiene, que corresponde al año 2016.

Los puntos considerados fueron 66 y la altura promedio que se obtuvo fue de 24 m.

Otro dato que se requiere para el MMB es la existencia de siniestros en el relleno y qué porcentaje de área fue afectada. En el relleno se presentó un incendio (Figura 4.6) en el mes de marzo de 2013. Este siniestro involucró, según informaciones periodísticas, una superficie aproximada de 2 ha, lo que representa una proporción total de la superficie del 10%.



Figura 4.6: Digitalización de las zonas de cobertura.

Con toda la información generada se ingresa al MMB, en el cual la primera página corresponde a todos los datos generados anteriormente (Figura 4.7).

PROYECCIONES DE LA GENERACION Y RECUPERACION DE BIOGAS DE RELLENOS SANITARIOS		
PAGINA DE ALIMENTACION		
1	Nombre del Sitio:	RELLENO SANITARIO TLALNEPANTLA
2	Ciudad:	CIUDAD DE MÉXICO
3	Estado:	México
4	Región:	Centro/ Interior 3
5	¿Existen datos de caracterización de residuos específicos al relleno sanitario en cuestión?	Si
6	Año de apertura del sitio:	1998
7	Disposición anual del año mas reciente:	250 Mg
8	Año de disposición (arriba):	2016
9	Año de clausura o año de clausura proyectado:	2024
10	Incremento anual estimado de la disposición:	0.4%
11	Profundidad promedio del relleno sanitario:	24 m
12	Prácticas de diseño y manejo del relleno sanitario:	2
13a	¿Ha habido algún incendio en el relleno sanitario?	Si
13b	Si la respuesta de 13a es "Si", indique el área del impacto en % del total:	10%
13c	Si la respuesta de 13a es "Si", indique la severidad del impacto del incendio:	1
14	Año de arranque del sistema de captura (actual/estimado):	1998
15	Porcentaje del área con residuos con sistema de captura:	90%
16	Porcentaje del área con residuos con cubierta final:	67%
17	Porcentaje del área con residuos con cubierta intermedia:	29%
18	Porcentaje del área con residuos con cubierta diaria:	1%
19	Porcentaje del área con residuos sin cobertura:	4%
20	Porcentaje del área de residuos con recubrimiento inferior de arcilla/geomembrana:	100%
21	¿Se compactan los residuos regularmente?	Si
22	¿La disposición de residuos se hace en una área específica?	Si
23a	Existen afloramientos/bortes de lixiviado en la superficie del relleno sanitario?	Si
23b	Si la respuesta de 23a es "Si", ¿esto ocurre solo después de llover?	No
24	Eficiencia de captura estimada:	62%

Figura 4.7: Hoja de alimentación del modelo mexicano del biogás

En la página de disposición y recuperación de biogás (Figura 4.8) se tiene que ingresar el registro de toneladas recibidas por año en el relleno, el modelo automáticamente calcula la eficiencia del sistema de captura con base en lo

ingresado en la hoja de alimentación.


**Modelo Mexicano de Biogás v.2**  
 Fecha: Marzo 2009  
 Desarrollado por SCS Engineers, para la Agencia de Protección al Ambiente de El

**DISPOSICION Y RECUPERACION DE BIOGAS**

Año	Disposición de Residuos Estimada (Toneladas Métricas)	Toneladas Métricas Acumuladas	Eficiencia del Sistema de Captura	Recuperación Actual de Biogás (m <sup>3</sup> /hr a 50% CH <sub>4</sub> )	Recuperación de Biogás Estimada (m <sup>3</sup> /hr a 50% CH <sub>4</sub> )	Línea Base de Recuperación de Biogás (m <sup>3</sup> /hr a 50% CH <sub>4</sub> )
1998	224,386	224,386	62%		0	0
1999	316,545	540,931	62%		138	0
2000	290,390	831,321	62%		319	0
2001	274,070	1,105,391	62%		466	0
2002	276,643	1,382,035	62%		591	0
2003	366,919	1,748,953	62%		706	0
2004	442,641	2,191,594	62%		867	0
2005	404,459	2,596,053	62%		1,061	0
2006	398,592	2,994,646	62%		1,214	0
2007	508,640	3,503,286	62%		1,352	0
2008	329,663	3,832,948	62%		1,547	0
2009	314,635	4,147,583	62%		1,616	0
2010	290,651	4,438,235	62%		1,672	0
2011	323,808	4,762,043	62%		1,711	0
2012	327,948	5,089,991	62%		1,770	0
2013	247,318	5,337,309	62%		1,829	0
2014	250,195	5,587,504	62%		1,836	0
2015	246,211	5,833,715	62%		1,846	0
2016	250,023	6,083,738	62%		1,856	0
2017	251,000	6,334,738	62%		1,869	0
2018	251,900	6,586,638	62%		1,884	0
2019	252,800	6,839,438	62%		1,901	0
2020	253,700	7,093,138	62%		1,918	0
2021	254,600	7,347,738	62%		1,936	0
2022	255,500	7,603,238	62%		1,955	0
2023	256,500	7,859,738	62%		1,974	0
2024	257,500	8,117,238	62%		1,994	0

Figura 4.8: Hoja de disposición y recuperación de biogás

Los criterios que toma para calcular la eficiencia del sistema de captura se muestran en la figura 4.9

	<b>Cálculos de Eficiencia de Captura</b>	
Profundidad de Residuos	<b>100%</b>	Descuento progresivo si la profundidad < 10 m (5% por cada metro)
Área de cobertura del sistema de captura	<b>90%</b>	Ajuste del factor de cobertura del sistema
Cobertura superior y su cobertura	<b>77%</b>	Cobertura final = 90%; Intermedia = 80%; Diaria = 75%; sin cobertura = 50%
Recubrimiento inferior y su cobertura	<b>77%</b>	El descuento es 5% x el % de área sin recubrimiento inferior
Compactación de los residuos	<b>77%</b>	El descuento es de 3% si no hay compactación
Área de disposición designada	<b>77%</b>	El descuento es 5% si no existe área de disposición designada
Lixiviado	<b>62%</b>	El descuento es hasta de 40% dependiendo del clima y la frecuencia de los afloramientos
<b>Eficiencia de Captura Calculada</b>	<b>62%</b>	

Figura 4.9: Criterios utilizados para el cálculo de la eficiencia del sistema de captura

En la página de caracterización de residuos (Figura 4.10) se ingresan los resultados del estudio de la empresa INCREMI. Si no se cuenta con dicha información, el modelo calcula los porcentajes con base en estudios que se hicieron en diferentes estados de la República Mexicana.



**Methane to Markets**

Modelo Mexicano de Biogás v.2  
 Fecha: Marzo 2009  
 Desarrollado por SCS Engineers, para la Agencia

TABLA DE CARACTERIZACION DE RESIDUOS EN LOS DIFERENTES ESTADOS DE MEXICO Y ES			
Categoría de Residuo	Datos Específicos al Sitio	México	USA
Comida	23.6%	38.5%	13.4%
Papel y Cartón	11.9%	15.5%	23.8%
Poda (jardines)	4.5%	7.1%	4.8%
Madera	6.8%	0.0%	10.1%
Caucho, Piel, Huesos y Paja	0.9%	0.4%	2.8%
Textiles	6.4%	0.4%	4.4%
Papel Higiénico	3.2%	0.0%	
Otros Orgánicos	0.0%	9.8%	0.9%
Pañales (asume 20% orgánico / 80% inorgánico)	2.0%	0.0%	
Metales	1.3%	28.2%	6.3%
Construcción y Demolición	0.0%	0.0%	12.8%
Vidrio y Cerámica	5.8%	0.0%	5.4%
Plásticos	20.9%	0.0%	12.7%
Otros Inorgánicos	12.8%	0.0%	2.7%
Porcentaje de degradación muy rápida (1)	24.0%	48.3%	14.3%
Porcentaje de degradación moderadamente rápida (2)	7.7%	7.1%	4.8%
Porcentaje de degradación moderadamente lenta (3)	18.3%	16.0%	28.2%
Porcentaje de degradación muy lenta (4)	7.7%	0.4%	12.9%
Total Orgánicos	57.7%	71.8%	60.2%
Total Inorgánicos	42.3%	28.2%	39.8%
Porcentaje de degradación muy rápida (1)	70%	70%	70%
Porcentaje de degradación moderadamente rápida (2)	40%	40%	45%
Porcentaje de degradación moderadamente lenta (3)	7%	7%	7%
Porcentaje de degradación muy lenta (4)	12%	12%	16%
Residuos en Estados Unidos - % de orgánicos secos			44%
Lo de degradación rápida calculado	69	69	
Lo de degradación moderadamente rápida calculado	138	138	
Lo de degradación moderadamente lenta calculado	214	214	
Lo de degradación lenta calculado	202	202	

Figura 4.10: Criterios utilizados para el cálculo de la eficiencia del sistema de captura

Finalmente, se obtiene una gráfica (Figura 4.11) donde se representa la generación y recuperación de biogás.

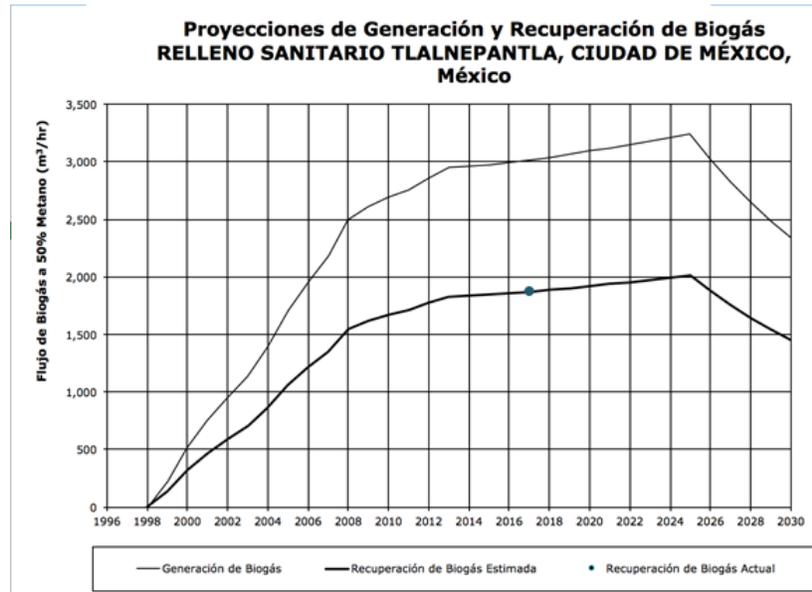


Figura 4.11: Gráfica donde se muestra los resultados finales del modelo mexicano del biogás

Gracias al análisis del MMB se demuestra que la producción de metano ocasiona variaciones de temperaturas en el relleno sanitario, estas pueden ser estudiadas con la ayuda del procesamiento de imágenes satelitales comparando los resultados con las temperaturas in-situ, esto para observar el grado de certidumbre de los datos satelitales con lo cual se puede eludir la toma de temperatura in-situ y calcularla con imágenes satelitales para futuros estudios.

## 4.4 Procesamiento de imágenes

Para el procesamiento de las imágenes se realizan los siguientes pasos:

### 4.4.1 Radiancia en la parte superior de la atmósfera

Los datos del sensor TIRS se pueden convertir a radiancia en la parte superior de la atmósfera usando los factores de escala de luminosidad proporcionados en el archivo de metadatos (USGS, 2016). La ecuación de transformación es la siguiente:

$$L_{\lambda} = M_L Q_{cal} + A_L \quad (4.1)$$

Donde:

$L_{\lambda}$  : Radiancia espectral en la parte superior de la atmósfera ( $W/(m^2 * srad * \mu m)$ )

$M_L$  : Factor de reescalado multiplicativo específico de banda de los metadatos (RADIANCE\_MULT\_BAND\_X, donde x es el número de banda)

$A_L$  : Factor de reescalado aditivo específico de banda de los metadatos (RADIANCE\_ADD\_BAND\_X, donde x es el número de banda)

$Q_{cal}$  : Valores de píxeles de producto estándar (DN) cuantificados y calibrados

### 4.4.2 Temperatura de brillo en el satélite

Los datos del sensor TIRS pueden ser transformados de radiancia espectral a temperatura de brillo usando las constantes que se encuentran en el archivo de metadatos (USGS, 2016).

$$T = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_{\lambda}} + 1\right)} \quad (4.2)$$

Donde:

T : Temperatura de brillo en el satélite (K)  $L_{\lambda}$  : Radiancia espectral en la parte superior de la atmósfera ( $Watts/(m^2 * srad * \mu m)$ )

$K_1$  : Constante de conversión térmica específica de banda de los metadatos (K1.CONSTANT\_BAND\_X, donde x es el número de banda térmica)

$K_2$  : Constante de conversión térmica específica de banda de los metadatos (K2.CONSTANT\_BAND\_X, donde x es el número de banda térmica)

### 4.4.3 Temperatura de la superficie terrestre (Algoritmo Split Window)

La técnica de Split Window usa dos bandas TIR típicamente ubicadas en la ventana atmosférica entre 10 y 12  $\mu\text{m}$  (Jiménez-Muñoz, Sobrino, Skokovic, Mattar, & Cristóbal, 2014). Los fundamentos de esta técnica es que la atenuación de la radiancia por la absorción atmosférica es proporcional a la diferencia de radiancia de mediciones simultáneas en dos longitudes de onda diferentes, cada una de ellas siendo sujetas a diferentes cantidades de absorción atmosférica (McMillin, 1975). El algoritmo usado en este trabajo fue tomado de Jiménez-Muñoz et. al. en Sobrino et. al., 1996. El algoritmo es el siguiente:

$$T_s = T_i + C_1(T_i - T_j) + C_2(T_i - T_j)^2 + C_0 + (C_3 + C_4w)(1 - \epsilon) + (C_5 + C_6w)\Delta\epsilon$$

Donde:

$T_i$  y  $T_j$  : Temperatura de brillo en el sensor de las bandas i y j (en kelvins)

$\epsilon$  es la emisividad media  $\epsilon = 0.5(\epsilon_i + \epsilon_j)$

$\Delta\epsilon$  : diferencia de emisividad  $\delta\epsilon = \epsilon_i - \epsilon_j$

$w$  : Contenido total de vapor de agua en la atmósfera (en  $\text{gcm}^{-2}$ )

$C_0 - C_6$  : Coeficientes del algoritmo los cuales son determinados por simulación.

En la tabla 4.1 se muestran los valores de los coeficientes del algoritmo; fue tomada de Jiménez-Muñoz et. al.

Tabla 4.1: Valor de coeficientes de algoritmo split window.

Coeficiente	Valor
$C_0$	-0.268
$C_1$	1.378
$C_2$	0.183
$C_3$	54.30
$C_4$	-2.238
$C_5$	-129.20
$C_6$	16.40

El valor de vapor de agua se obtiene de imágenes satelitales MODIS, que con un procesamiento matemático se convierte el valor del pixel, el cual está dado con base en una escala, a vapor de agua. La expresión matemática que se usó para la transformación a vapor de agua fue la siguiente:

$$W = \frac{A}{42.333} \quad (4.3)$$

donde:

$A$  : Cada pixel de la imagen.

El valor de la emisividad se tomó de Yu, Guo, & Wu, 2014, teniendo los siguientes coeficientes:  $\epsilon_{10} = 0.9668$  y  $\epsilon_{11} = 0.9747$ .

# Capítulo 5

## Resultados y conclusiones

### 5.1 Resultados

Teniendo todos los datos conocidos, se procesaron las imágenes del día 3 de agosto de 2017, ya que en ese día se realizó la visita al relleno para tomar lecturas de temperatura in situ. La figura 5.1 muestra los resultados obtenidos.

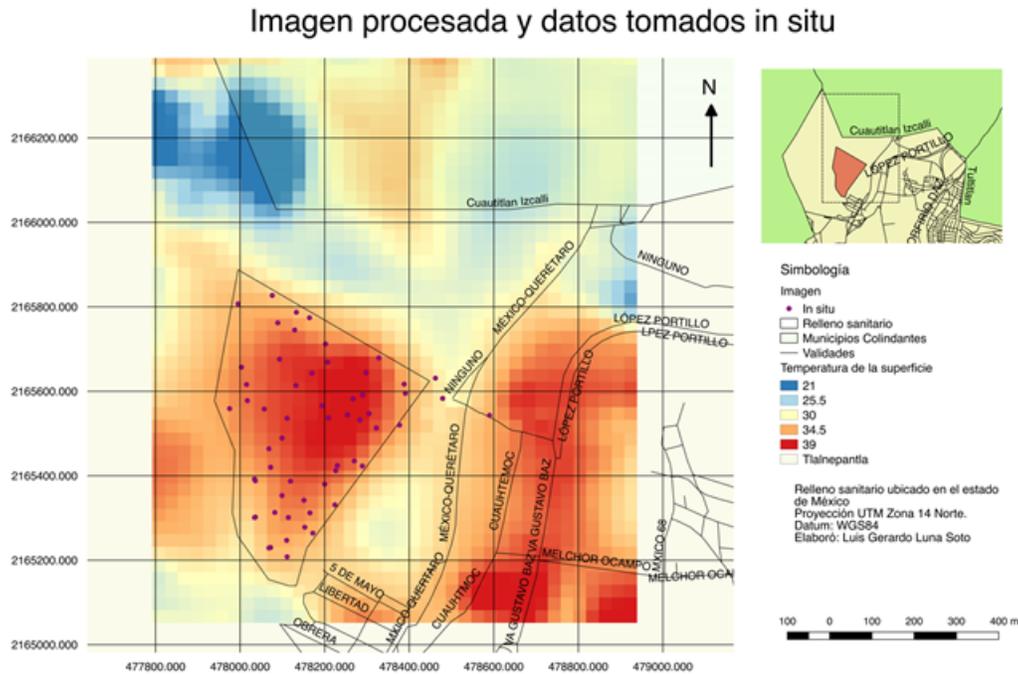


Figura 5.1: Imagen obtenida después de aplicar el algoritmo Split Window. Temperatura mostrada en grados centígrados.

En la imagen se observan diferentes zonas de alta temperatura. De la zona de estudio mostrada en el mapa de localización, el relleno sanitario se encuentra en la parte inferior izquierda. En la imagen procesada, se observa en la zona del relleno sanitario, una gran mancha de calor, la cual oscila entre los 38° y 39° centígrados.

El mismo día de paso del satélite, se tomaron temperaturas in situ comenzando a las 14 horas y finalizando a las 17 horas.

El paso del satélite fue a las 15:59 horas.

La información obtenida se observa en la figura 5.2.

X	Y	Satélite	In situ	Hora
478099.0	2165353.0	36.1	42.4	14:02:00
478119.0	2165387.0	36.7	43.5	14:03:00
478072.0	2165420.0	36.1	42.2	14:06:00
478034.0	2165392.0	34.1	43.6	14:09:00
478172.0	2165264.0	35.7	43.5	14:15:00
478153.0	2165278.0	34.5	43.1	14:18:00
478165.0	2165312.0	34.1	40.8	14:20:00
478151.0	2165342.0	36.2	40.6	14:22:00
478200.0	2165380.0	36.0	42.2	14:24:00
478226.0	2165412.0	37.6	44.7	14:27:00
478230.0	2165424.0	37.5	41.6	14:30:00
478224.0	2165331.0	34.4	43.9	14:33:00
478289.0	2165423.0	35.3	43.2	14:36:00
478270.0	2165435.0	33.6	38.2	14:39:00
478328.0	2165679.0	37.6	40.3	15:19:00
478298.0	2165644.0	39.5	48.8	15:23:00
478133.0	2165787.0	33.5	36.2	15:32:00
478164.0	2165774.0	34.3	35.9	15:35:00
478129.0	2165745.0	36.4	34.2	15:38:00
478089.0	2165762.0	35.3	35.6	15:41:00
478076.0	2165827.0	33.3	35.5	15:44:00
477995.0	2165807.0	33.6	33.5	15:47:00
478003.0	2165657.0	36.0	30.4	15:51:00
478015.0	2165616.0	36.2	36.1	15:52:00
478017.0	2165578.0	36.2	33.7	15:55:00
477975.0	2165559.0	35.2	38.4	15:57:00
478036.0	2165388.0	34.8	32.2	16:03:00
478034.0	2165301.0	32.5	31.1	16:06:00
478068.0	2165229.0	33.6	34.6	16:11:00
478068.0	2165464.0	36.6	33.2	16:20:00
478099.0	2165489.0	37.7	38.0	16:22:00
478111.0	2165536.0	37.9	34.3	16:24:00
478057.0	2165558.0	36.8	39.4	16:27:00
478093.0	2165676.0	37.8	35.3	16:33:00
478132.0	2165614.0	38.0	39.2	16:36:00
478170.0	2165643.0	38.6	42.1	16:38:00
478207.0	2165669.0	38.3	43.9	16:41:00
478202.0	2165712.0	36.8	42.6	16:44:00
478194.0	2165566.0	38.9	36.4	16:48:00
478209.0	2165537.0	39.0	35.7	16:50:00
478254.0	2165544.0	39.7	38.0	16:53:00
478267.0	2165582.0	39.9	35.2	16:56:00
478290.0	2165591.0	39.5	30.7	16:57:00
478283.0	2165532.0	38.7	33.5	17:00:00
478305.0	2165547.0	37.9	32.8	17:02:00
478322.0	2165513.0	37.3	29.5	17:03:00

Figura 5.2: Datos obtenidos in situ y de satélite

En la figura anterior se puede observar que, aproximadamente, 20 minutos antes y después (15:36 a 16:33) del paso del satélite la las lecturas in situ y del satélite, son muy similares.

Entre las 15:36 y 16:33 se tuvieron diferencias de temperatura en promedio de  $2.1 \pm 1.41$  °C. Estos datos se pueden tomar como válidos ya que el algoritmo que se aplicó en la imagen da una certidumbre de  $\pm 5$ °C con respecto a lo registrado in situ.

En la toma de temperaturas in situ se pueden observar temperaturas altas en las primeras horas de la muestra, ya que fueron tomadas cerca del mediodía. A medida que pasa el tiempo la temperatura va disminuyendo debido a la radiación, ya que entre mas tiempo pasa, menor es ésta.

En la figura 5.2 se puede observar que existe una mayor temperatura entre las 15:07 y 15:36 horas, esta lectura de temperatura se da tanto como en la imagen como en las muestras in situ. Esta muestra fue tomada en uno de los pozos que se encuentra en una de las celdas activas del relleno sanitario, donde todo el  $CH_4$  esta siendo liberado a la atmósfera. Los desechos que se encuentran en esa celda, están produciendo metano en grandes cantidades y en consecuencia, se tiene un aumento de temperatura en esa zona.

Entre las 15:36 y 16:33 la temperatura de las dos muestras es similar. Utilizando solo los datos comprendidos entre ese periodo se aprecia que las variaciones de temperatura son pequeñas. La variación más representativa que se tuvo fue de 5.6 °C. Analizando estos datos (figura 5.3), se puede apreciar que la desviación estándar es 1.52 °C. Lo que significa que los datos son consistentes entre la imagen y la muestra.

Satélite	In situ
33.5	36.2
34.3	35.9
36.4	34.2
35.3	35.6
33.3	35.5
33.6	33.5
36.0	30.4
36.2	36.1
36.2	33.7
35.2	38.4
34.8	32.2
32.5	31.1
33.6	34.6
36.6	33.2
37.7	38.0
37.9	34.3
36.8	39.4
37.8	35.3
38.0	39.2

Figura 5.3: Temperatura tomada entre las 15:36 y 16:33 horas

La concordancia de los datos se verificó aplicando la prueba de chi cuadrada. Se aplicó la siguiente fórmula:

$$\chi^2 = \frac{(n - 1)s^2}{\sigma^2} \quad (5.1)$$

Donde:

$n$  = Número de datos

$s^2$  = Varianza del tratamiento

$\sigma^2$  = Varianza del testigo

Utilizando una significancia de 0.05 y teniendo como hipótesis las siguientes:

$H_0$ : Los datos de la imagen concuerdan con los datos tomados en campo

$H_A$ : Los datos de la imagen no concuerdan con los datos tomados en campo

El número total de datos fueron 46. Conociendo el número de datos se tiene que los grados de libertad corresponden a 45.

Tomando como tratamiento los datos de la imagen y como testigo las lecturas en campo, se tiene que la varianza del tratamiento y del testigo fue 3.82 y 21.44, respectivamente.

Se sabe que el valor de  $\chi^2$  con una significancia de 0.05 y 45 grados de libertad es:  $\chi^2(0.05, 45) = 61.656$ .

Regla de decisión:

Si  $\chi^2 \leq 61.656$  no se rechaza  $H_0$

Si  $\chi^2 > 61.656$  se rechaza  $H_0$

Calculando  $\chi^2$ :

$$\chi^2 = \frac{(46 - 1)(3.82)}{21.44} = 8.02$$

Como 8.02 es menor que 61.656 no se rechaza  $H_0$  y se concluye con un nivel de significancia de 0.05 que los datos de la imagen concuerdan con los datos tomados en campo.

En el anexo A se pueden observar los valores de chi-cuadrada para diferentes grados de libertad.

## 5.2 Conclusiones

La percepción remota es una ciencia que está tomando mucha importancia actualmente y se contemplan nuevos lanzamientos de satélites, para la observación del planeta. Esta ciencia tiene diversas aplicaciones, una de ellas como se vio, es para monitorear el cálculo de la temperatura de la superficie terrestre, específicamente para un relleno sanitario.

Para realizar este cálculo se tuvo en cuenta el modelo mexicano del biogás, ya que los resultados de este modelo indican si existe flujo teórico de metano y qué porcentaje de este es recuperado. Los resultados del modelo indicaron que sí existía un flujo de metano.

Para tener una mayor certidumbre en los datos del modelo mexicano de biogás, se tienen que ingresar los datos al modelo, de manera más exacta. Dentro del presente trabajo, algunos datos fueron aproximaciones, por ejemplo, las áreas de cobertura, fueron establecidas mediante una imagen satelital, a partir de criterios visuales. Otra aproximación fue, la zona afectada por incendios, para obtener esta información se investigó en noticias de la zona acerca de los incendios, y se obtuvo un área de afectación aproximada. En los años en los que hubo un incremento de recepción de desechos, se tuvo un dato aproximado, tomando en consideración, los últimos años de recepción de desechos.

Después de tener el resultado del modelo, se realizaron los estudios de campo y se comenzaron a investigar, los diferentes algoritmos usados para calcular la temperatura de la superficie. Entre los algoritmos que se encontraron, se decidió utilizar el Split window, propuesto por Jiménez-Muñoz y colaboradores, ya que las variables que requería se podían obtener. El algoritmo usado para este trabajo arrojó resultados acordes con la realidad, ya que de acuerdo a los resultados obtenidos del algoritmo se tuvieron temperaturas entre los 32 y 38 °C y temperaturas in situ entre 30 y 39 °C.

Los resultados obtenidos in situ y mediante técnicas de percepción remota muestran una complejidad al ser comparados, debido a que los resultados de la imagen fueron de un instante, y los datos tomados in situ fueron tomados a lo largo del día. Sin embargo, cuando los datos se graficaron, se tiene una similitud entre en los datos que se encuentran en un rango de  $\pm 20$  minutos de la hora de paso del satélite la hora de la toma de los datos in situ.

Para confirmar la consistencia de los datos se aplicó la prueba de chi cuadrada con la cual se aceptó la hipótesis nula la cual dice que los datos de la imagen concuerdan con los datos tomados en campo.

Con los resultados obtenidos se puede concluir que las imágenes satelitales son de gran ayuda para calcular la temperatura de la superficie de un re-

llo sanitario, ya que los resultados concuerdan bastante con las muestras obtenidas en campo.

Como se pudo observar con los resultados el incremento de la temperatura en los rellenos sanitarios esta relacionado con la producción de metano. Es de gran importancia el monitoreo de la producción de metano ya que se pueden producir cosas buenas como malas, por ejemplo, si no se monitorea pueden producirse grandes incendios o puede ser captado para la generación de energía, tal como se observó con el modelo mexicano del biogás

Las imágenes satelitales son un gran recurso para el estudio del planeta ya que captan información de manera rápida y de grandes extensiones. El algoritmo que se usó en este trabajo tiene diferentes aplicaciones, una de ellas y las más importante en estos tiempos es el cambio climático.

# Bibliografía

Aggarwal, S. (2004). Principles of remote sensing. India: Indian Institute of Remote Sensing, Dehra Dun.

Becker, F., & Li, Z.-L. (1995). Surface temperature and emissivity at various scales: Definition, measurement and related problems. *Remote Sens. Rev.*, 12, 225e253.

Canada Centre for Remote Sensing. (2016). Fundamentals of remote sensing. Canada: Canada.

Canada Centre for Remote Sensing. (2016). Fundamentals of remote sensing. Canada: Canada.

Crockett, C. (18 de 05 de 2016). What is the electromagnetic spectrum? Recuperado el 27 de 04 de 2017, de EarthSky: <http://earthsky.org/?p=134588>

Chuvieco, E. (1990). Fundamentos de teledetección espacial (segunda edición ed.). Madrid, España: RIALP, S. A.

Diario Oficial de la Federación. (20 de 10 de 2004). Norma oficial mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003, especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial. México.

Dunbar, B. (28 de 04 de 2016). Landsat 8 Instruments. (R. Garner, Productor) Recuperado el 27 de 04 de 2017, de NASA: <https://www.nasa.gov/content/landsat-8-instruments>

Finkenthal, D., Greco, B., Halsey, R., Pena, L., Rodecker, S., Simms, B., Schissel, D. P. (s.f.). Introduction to the electromagnetic Spectrum. General Atomics. General Atomics. Obtenido de Fusion education.

Fonseca, L., & Manjunath, B. (1996). Registration techniques for multi-sensory remotely sensed imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 62, 1049–1056.

Forster, B. (1984). Derivation of atmospheric correction procedures for

Landsat MSS with particular reference to urban data. *International Journal of Remote Sensing*, 5, 799–817.

Gerace, A. D. (2013). Increased potential to monitor water quality in the near-shore environment with Landsat's next-generation satellite. *Journal of Applied Remote Sensing*.

He, C. e. (1997). A catalytic/sorption hybrid process for landfill gas cleanup. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 36, 4100–4107.

Jensen, J. (2005). *Introductory Digital Image Processing* (3ra. edición ed.). Pearson Prentice Hall.

Jiménez-Muñoz, J. C., Sobrino, J. A., Skokovic, D., Mattar, C., & Cristóbal, J. (2014). Land Surface Temperature Retrieval Methods From Landsat-8 Thermal Infrared Sensor Data. *IEEE GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING LETTERS*, 11, 1840-1843.

Khorram, S. (1982). Coastwatch–water quality mapping of the entire San Francisco Bay and delta from Landsat multispectral scanner data. *Space Sciences Laboratory*.

Khorram, S., Nelson, S., Cakir, H., & Van der Wiele, C. (2013). Digital image acquisition, preprocessing, and data reduction, in *Handbook of Satellite Applications* (2da. edición ed.). New York, New York, USA: Springer-Verlag.

Khorram, S., Nelson, S., Cakir, H., Hester, D., & Cheshire, H. (2005). Cost effective assessment of land use practices influencing erosion and sediment yield. *Reporte técnico*, North Carolina Water Resources research Institute, Center for Earth Observation.

Khorram, S., Van Der Wiele, C. F., Koch, F. H., Nelson, S. A., & Potts, M. D. (2016). *Principles of Applied Remote Sensing*. Springer.

Li, Z. L., Tang, B. H., Wu, H., Ren, H., Yan, G., Wan, Z., & Sobrino, J. A. (2013). Satellite-derived land surface temperature: Current status and perspectives. *Remote Sensing of Environment*, 131, 14-37.

Liang, S., Li, X., & Wang, J. (2012). *Advanced remote sensing. Terrestrial information extraction and applications*. (S. Liang, X. Li, & J. Wang, Edits.) Academic Press.

McKillup, S., & Dyar, M. D. (2010). *Geostatistics explained: an introductory guide for earth scientists*. Cambridge University Press.

McMillin, L. (1975). Estimation of sea surface temperatures from two infrared window measurements with different absorption. *80(36)*, 5113-5117.

Mas (Coordinador), J.-F. (2011). *Aplicaciones del sensor MODIS para el monitoreo del territorio*. México.

NASA. (2008). MODIS. Obtenido de NASA: <https://modis.gsfc.nasa.gov/about/>

NASA. (09 de 2017). Aqua. Project science. Recuperado el 09 de 2017, de NASA: <https://aqua.nasa.gov>

NASA. (23 de 02 de 2017). Remote sensors. Recuperado el 03 de 05 de 2017, de Earthdata: <https://earthdata.nasa.gov/user-resources/remote-sensors>

Norman, J. M., & Becker, F. (1995). Terminology in thermal infrared remote sensing of natural surfaces. *Remote Sens. Rev.*, 12, 159 - 1731.

Park, J. W., & Shin, H. C. (2001). Surface emission of landfill gas from solid waste landfill. *Atmospheric Environment*, 35(20), 3445-3451.

Rees, W. G. (2013). *Physical principles of remote sensing*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.

Schowengerdt, R. A. (2006). *Remote sensing: models and methods for image processing*. Tucson, Arizo, USA: Academic Press.

Sobrino, J. A., Li, Z.-L., Stoll, M. P., & Fecker, F. (1996). Multi-channel and multi-angle algorithms for estimating sea and land surface temperature with ATSR data. *Int. J. Remote Sens.*, 17(11), 2089-2114.

Turner, R., & Spencer, M. (1972). Atmospheric model for correction of spacecraft data. *Proceedings of the Eighth Annual Symposium on Remote Sensing of Environment* (págs. 895–934). MI: ERIM.

United States Geological Survey. (2016). *Landsat 8 (L8)*. United States Geological Survey, Department of the Interior. Dakota: USGS.

USGS. (29 de 11 de 2016). Landsat missions. Recuperado el 11 de 5 de 2017, de Using the USGS Landsat 8 Product: <https://landsat.usgs.gov/using-usgs-landsat-8-product>

Wan, Z. N., & Dozier, J. (1994). Spectral emissivity measurements of land-surface materials and related radiative transfer simulations. *Adv. Space Res.*, 14, 91-94.

Yu, X., Guo, X., & Wu, Z. (2014). Land Surface Temperature Retrieval from Landsat 8 TIRS—Comparison between Radiative Transfer Equation-Based Method, Split Window Algorithm and Single Channel Method. *Remote Sensing*, 6(10), 9829-9852.

Zitová, B. a. (2003). Image registration methods: a survey. *Image and Vision Computing*, 21, 977–1000.



# Anexo A

## Valores de chi-cuadrada

Degrees of freedom	$\alpha = 0.05$	Degrees of freedom	$\alpha = 0.05$	Degrees of freedom	$\alpha = 0.05$
1	3.841	41	56.942	81	103.010
2	5.991	42	58.124	82	104.139
3	7.815	43	59.304	83	105.267
4	9.488	44	60.481	84	106.395
5	11.070	45	61.656	85	107.522
6	12.592	46	62.830	86	108.648
7	14.067	47	64.001	87	109.773
8	15.507	48	65.171	88	110.898
9	16.919	49	66.339	89	112.022
10	18.307	50	67.505	90	113.145
11	19.675	51	68.669	91	114.268
12	21.026	52	69.832	92	115.390
13	22.362	53	70.993	93	116.511
14	23.685	54	72.153	94	117.632
15	24.996	55	73.311	95	118.752
16	26.296	56	74.468	96	119.871
17	27.587	57	75.624	97	120.990
18	28.869	58	76.778	98	122.108
19	30.114	59	77.931	99	123.225
20	31.401	60	79.082	100	124.342
21	32.671	61	80.232	101	125.458
22	33.924	62	81.381	102	126.574
23	35.172	63	82.529	103	127.689
24	36.415	64	83.675	104	128.804
25	37.652	65	84.821	105	129.918
26	38.885	66	85.965	106	131.031
27	40.113	67	87.108	107	132.144
28	41.337	68	88.250	108	133.257
29	42.557	69	89.391	109	134.369
30	43.773	70	90.531	110	135.480
31	44.985	71	91.670	111	136.591
32	46.194	72	92.808	112	137.701
33	47.400	73	93.945	113	138.811
34	48.602	74	95.081	114	139.921
35	49.802	75	96.217	115	141.030
36	50.998	76	97.351	116	142.138
37	52.192	77	98.484	117	143.246
38	53.384	78	99.617	118	144.354
39	54.572	79	100.749	119	145.461
40	55.758	80	101.879	120	146.567

Figura A.1: Valores de chi cuadrada para diferentes grados de libertad. Imagen tomada de McKillup & Dyar (2010)