

Nivel 2: Herramientas de teledetección cuantitativa
Apunte teorico

Francisco Nemiña¹

*Unidad de Educacion y Formacion Masiva
Comisión Nacional de Actividades Espaciales*

2017-1

¹`fnemina@conae.gov.ar`

Índice general

Introducción	v
1. Un viaje del sol a los píxeles	1
1.1. Introducción	1
1.2. Ondas electromagneticas	1
1.3. Radiancia	3
1.4. Reflectancia	4
1.5. Firmas espectrales	5
1.5.1. Vegetacion	6
1.5.2. Suelo	6
1.5.3. Agua	6
1.6. Respuesta espectral	7
1.7. Vector pixel	7

Introducción

Buen día. Este es el apunte del curso SoPI 2 de herramientas de teledetección cuantitativa. La idea es que este apunte reproduzca el material de las clases basado en el curso del segundo cuatrimestre de 2016.

El apunte va a ser lo mas incluso posible pero claramente incompleto por lo tanto es bueno complementarlo con otros libros/guías/papers/etc. Al final de cada capítulo citaremos las fuentes que sean relevantes para el mismo. Sin embargo, citar todas las fuentes es claramente imposible por lo tanto incentivamos a los alumnos a llevar adelante su propia búsqueda y ser crítico de las mismas.

El curso va a trabajar utilizando el concepto de *vector pixel* para estudiar distintas herramientas de teledetección cuantitativa. La forma de tocar estas herramientas es desde un punto de vista introductorio. Intentando siempre motivar el porque se introducen y que aplicacion tienen, pero no siempre demostrando su validez matematica.

A grandes rasgos el curso se divide en dos partes. La primera llamada *transformaciones en el dominio espectral* incluye los capitulos 1 a 4 y toca los conceptos basicos de la teledetección, firmas espectrales, vectores pixeles, correcciones radiometricas y atmosfericas, indices espectrales y transformaciones en el espacio espectral. La segunda llama *clasificaciones supervisadas en la practica* incluye los capitulos 5 a 7 y cubre distintos metodos de clasificacion supervisada con su correspondiente validacion.

Durante el curso que funcione de manera teorico-practica se trabajo con un caso de estudio de la region de Triple Frontera, en Misiones. Al final de cada capitulo se incluira las actividades sugeridas para el mismo mas algunos ejercicios que pueden aportar a la compresion de los conceptos espuestos.

Como concentrarnos en un tema permite simplificar las cosas, en el curso trabajamos en la parte optica del espectro. Es decir, de los $0,4\mu m$ a $14,0\mu m$ incluyendo el visible, infrarrojo cercano, medio y termico. Las imagenes que se utilizaron fueron en su mayoria Landsat 8 del sensor OLI, pero los mismos conceptos pueden aplicarse a imagenes de otras fuentes.

Como cualquier producción de un texto, este no va a estar libre de defectos. Les pedimos por favor que ante cualquier problema escriban a fnemina@conae.gov.ar con los comentarios pertinentes para dar una solución lo mas pronta posible al problema.

Capítulo 1

Un viaje del sol a los píxeles

1.1. Introducción

Este capítulo responde a los contenidos de la primera clase del curso. La idea es brindar un recorrido que parta de la energía proveniente del sol y termine definiendo el concepto de vector píxel. El mismo supone algunos conocimientos básicos sobre física y matemática pero no muchos más que los correspondientes a un graduado universitario. Los conceptos de calor, energía y óptica serán de utilidad.

Además sería buena idea repasar los conceptos de álgebra lineal -muchas veces llamado geometría analítica o cálculo en algunas universidades/carreras- pues los mismos serán de utilidad para todo el curso.

1.2. Ondas electromagnéticas

Comencemos definiendo algunos conceptos importantes. El primero de los mismos será el de energía. Dar una definición concreta de este concepto puede llevar bastante tiempo¹ por lo tanto daremos una definición amplia.

Definición 1.2.1. Diremos que un cuerpo posee una energía E si el cuerpo tiene una capacidad de ejercer un trabajo W .

Observación. En realidad esta es la definición en realidad es más cercana a la de energía libre.

Como dijimos antes estas definiciones no son ciento por ciento correctas. Y en realidad hablar de la energía que posee un cuerpo, en abstracto, no tiene mucho sentido. Sin embargo sí será interesante las formas de un cuerpo de intercambiar energía. Las mismas son básicamente dos

- Trabajo
- Calor

la primera de ellas nos permite intercambiar energía entre cuerpo por medio de fuerzas. La segunda, nos permite enmascarar formas de transferencia de energía para las cuales no conocemos en detalle las fuerzas intervinientes.

Dentro del calor, hay tres nuevas clasificaciones para la transferencia de energía. Convección, cuando hay movimiento de materia, conducción, cuando hay contacto entre los cuerpos pero no movimiento de materia, y radiación, cuando no hay contacto entre los cuerpos.

¹la carrera de física dura 5 años

Ejemplo 1.2.1. Ejemplos de transferencia de calor en la vida cotidiana hay varios y la cocina se presentan varios. Al cocinar un asado, por ejemplo, la energía se transmite por convección a través del aire hacia el asado, de radiación entre el carbón al rojo vivo y conducción, entre las barritas de hierro y el asado.

De las tres la más importante para la teledetección será la transferencia de energía por radiación. En particular de ondas electromagnéticas. La descripción de onda del electromagnetismo es una de las dos que existen en la actualidad para describir a la luz. En esta descripción para describir al campo electromagnético se describe por una onda transversal donde el campo eléctrico y magnético son perpendiculares. Como toda onda que se propaga la misma está descrita por su *amplitud*, su *frecuencia* y su *longitud de onda*.

$$E(x, t) = A \times \cos(2\pi\nu t - 2\pi x/\lambda) \quad (1.1)$$

donde la frecuencia y la longitud de onda se relacionan por la llamada *relación de dispersión*

$$c = \lambda\nu \quad (1.2)$$

siendo $c \sim 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ la velocidad de la luz en el vacío. Definimos entonces

Definición 1.2.2. Hablamos de frecuencia cuando hablamos de la cantidad de oscilaciones que realiza una onda en un determinado periodo de tiempo. Las unidades de la frecuencia en el Sistema Internacional son Hz.

Definición 1.2.3. Hablamos de longitud de onda cuando hablamos de la distancia entre dos máximos para una onda. La unidad de longitud de onda en el Sistema Internacional es m.

Definición 1.2.4. Hablamos de amplitud cuando hablamos del máximo valor que toma el campo eléctrico o magnético en un punto. La unidad dependerá de si hablamos de campo eléctrico o magnético

Esta descripción tiene varias particularidades interesantes que nos resultarán útiles en teledetección.

La primera es que la energía que transfiere la onda será proporcional a su amplitud al cuadrado. Por lo tanto dentro de nuestro trabajo medir la amplitud o medir la energía será esencialmente lo mismo.

Por otro lado, podremos clasificar a las ondas en función de su longitud de onda². A distintas longitudes de onda le corresponderán distintas propiedades según como sea generada y como interactúe con la materia. Es común clasificarlas entonces dentro del llamado espectro electromagnético. En el mismo se agrupan las ondas electromagnéticas según propiedades comunes en rangos de longitudes de onda.

Nosotros en el curso nos centraremos solamente en dos de estos rangos. El visible que se encuentra entre los $0,45\mu\text{m}$, correspondiendo al extremo azul del espectro, y los $0,75\mu\text{m}$ correspondiente al extremo rojo del espectro. Y el infrarrojo, ubicado entre los $0,75\mu\text{m}$ y los $1000\mu\text{m}$ aproximadamente.

Observación. Los nombres de las zonas del espectro electromagnético fueron dados en función de propiedades en la generación o medición de las mismas. El visible por ser la zona donde el ojo humano es capaz de captar luz. El infrarrojo y el ultravioleta más allá del rojo y el violeta respectivamente. Los rayos X por ser desconocido su origen en su momento. Las ondas de radio por ser las que se utilizaron para la radio. Y así cada una.

Durante el curso nos centraremos en la zona que va de los $0,4\mu\text{m}$ a los $2,7\mu\text{m}$. Es decir el visible, el infrarrojo cercano y el infrarrojo de onda media.

²O su frecuencia. Las mismas están ligadas por la relación de dispersión por lo tanto hablar de una o la otra será lo mismo.

Observación. La otra descripción de la radiación electromagnética es la de partícula. En la misma se trabaja con partículas llamadas *fotones* como mediadoras del campo electromagnético. No utilizaremos dicha descripción en este curso pero es interesante si nos interesa conocer como interactúa la luz con la materia más en detalle.

La energía como magnitud a medir en teledetección presentará una serie de problemas que intentaremos solucionar a continuación. Pero es el punto de partida para entender mucho de lo que viene atrás.

1.3. Radiancia

Veamos entonces como solucionar estos problemas. En primer lugar, la cantidad de energía recibida por el sensor³ es proporcional al tiempo en que la recibe. Si tomamos la energía como unidad fundamental para nuestra descripción entonces un sensor con un tiempo de integración mayor nos dará valores del doble. Para sacarnos este problema de encima trabajemos de aquí en adelante con la potencia en lugar de la energía.

Para obtener la *potencia* solo debemos calcular el cociente entre la cantidad de energía recibida en un cierto lapso de tiempo y dicho lapso. Es decir

$$P = \frac{\Delta E}{\Delta t} \quad (1.3)$$

La unidad de potencia en el sistema internacional es el W .

Observación. De aquí en adelante consideraremos siempre un Δ lo suficientemente chico como para que valgan las relaciones. Haciendo honor a la verdad la definición debería tomarse en el límite de Δ muy chico.

La potencia será por ahora una característica de la fuente. Como segunda preocupación es de esperar que si miro un área más grande la potencia que la atraviesa será mayor. Por lo tanto un sensor que mire un área mayor o menor verá cosas distintas. Para sacarnos este segundo problema de encima calcularemos la *densidad de potencia*. En este caso lo que miraremos es cual es la potencia por unidad de área como vemos a continuación

$$p = \frac{P}{A} = E \quad (1.4)$$

en el sistema internacional, la unidad de densidad de potencia es W/m^2 .

Para el caso de una fuente isotrópica⁴ la densidad de potencia decaerá con el cuadrado de la distancia. Es decir que si duplicamos la distancia a la fuente la potencia se verá disminuida a la cuarta parte.

Ejemplo 1.3.1. Veamos un caso concreto. La densidad de potencia del sol en la superficie terrestre será de $1,353 kW/m^2$. Si pudiéramos medir la densidad de potencia en Marte la misma estaría dada por

$$p_{\text{Marte}} = p_{\text{tierra}} \frac{4\pi r_{\text{tierra}}^2}{4\pi r_{\text{Marte}}^2} = 1,353 kW/m^2 \frac{1^2}{1,5^2} = 601 W/m^2$$

tomando las distancias entre la Tierra y el sol en unidades astronómicas.

Observación. La densidad de potencia es un nombre que no suele usarse en teledetección. Hablaremos en general de intensidad o de *irradiancia*.

³Ya sea satelital u de otro origen

⁴Cuya distribución no depende del ángulo

Esta distribucion dependera ademas de que zona del espectro electromagnetico estemos mirando. No sera lo mismo la irradiancia recibida si nuestro sensor mida la cantidad de luz que llega en el visible que la que llega en el infrarrojo.

En el caso del sol, la energia proveniente del mismo esta modelada bastante bien por la curva de radiacion de un cuerpo negro con una temperatura superficial de $5500K$. En dicha curva vemos que el maximo se encuentra cerca de la longitud de onda correspondiente al color amarillo y que decae mas rapidamente hacia el sector del ultravioleta que hacia el infrarrojo.

Observación. Al mirar esta curva es interesante notar porque nos centramos en medir estas zonas del espectro electromagnetico y no otras.

Esta curva estara afectada ademas por el medio interestelar y la atmosfera terrestre dando iluminaciones muy distintas en cada zona. Para sacarnos entonces de arriba el problema de la dependencia espectral definiremos

Definicion 1.3.1. Llamamos irradiancia espectral a la funcion de distribucion de irradiancia segun la longitud de onda. En el sistema internacional la misma se medira en $Wm^{-2}\mu m^{-1}$

Vemos en la siguiente tabla algunos valores de irradiancia espectral que, como se espera, decae a medida que nos vamos hacia la zona del infrarrojo.

TABLA

Finalmente, y mas importante de todo, no todas las fuentes seran isotropas. Para explicar su comportamiento podemos ver como varia la irradiancia en funcion del angulo solido que estemos mirando entorno a la fuente. Al definir la irradiancia espectral por unidad de angulo solido terminamos teniendo una magnitud que es independiente del tiempo de integracion del sensor, el area que estemos sensando, la longitud de onda donde el sensor tome sus mediciones y el angulo que estamos mirando. Dicha magnitud sera la que mas usaremos en teledeteccion.

Definiendola propiamente tenemos

Definicion 1.3.2. La irradiancia espectral es la radiancia espectral por unidad de angulo solido

$$L_\lambda = \frac{p_\lambda}{\Delta\Omega \cos \theta_z} \quad (1.5)$$

En el sistema internacional la irradiancia espectral se mide en $Wm^{-2}\mu m^{-1}sr^{-1}$.

donde θ_z es el angulo zenital⁵.

Observación. Alternativamente podemos definir a la radiancia espectral como L_λ tal que

$$dQ = L_\lambda(\theta, \phi) \cos \theta_z d\Omega dA dt d\lambda \quad (1.6)$$

1.4. Reflectancia

Tenemos una magnitud ya digna de ser medida por un satelite. Sin embargo la radiancia presenta otro problema. Al cambiar la fuente de iluminacion cambiamos la radiancia espectral recibida como se ve en la figura.

Queremos por lo tanto poder independizarnos de la fuente de iluminacion. Para esto diremos que la radiancia reflejada por un cuerpo se relaciona con la irradiancia por una funcion que depende solo de los angulos y el cuerpo en cuestion.

Definicion 1.4.1. Llamamos distribucion de reflectancia bidireccional espectral (BRDF) a la funcion $f(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r)$ tal que la radiancia reflejada y la irradiancia incidente estan relacionadas por

$$f dE = dL \quad (1.7)$$

⁵medido con respecto a la vertical

Esta funcion dependera solamente del cuerpo en cuestion y los angulos de incidencia y reflexion, pero no de la intensidad de la iluminacion. Si suponemos que la intensidad de la iluminacion es constante podemos definir a partir de la misma la *reflectancia direccional* como

$$R = \frac{\pi L}{\cos \theta_i E_0} = \pi f \quad (1.8)$$

Ejemplo 1.4.1. Veamos un ejemplo interesante de reflectancia bidireccional antes de abandonarla por el resto del curso.

Se puede apreciar en la siguiente figura un parque donde el color del cesped varia por franjas. Esto se debe a que la funcion de reflectancia direccional del mismo no es constante. Por lo tanto al pasar una maquina que corta el pasto en un sentido y en el otro termina orientado de forma distintas y viendose de distintos colores.

Si medimos la funcion de reflectancia bidireccional como funcion del angulo obtenemos la siguiente

vemos que la misma es bastante complicada en general pero existe una magnitud remarcable. Para un angulo en particular la reflectancia es mucho mayor que para todos los demas. Dicho angulo se corresponde con el angulo de reflectancia especular para el sol y suele pasar en la mayoria de las superficies. Muchas veces se lo llama efecto de nucleo espectral.

La otra superficie corresponde a un espectralon. Superficie para la cual la funcion de reflectancia direccion depende poco del angulo.

Podemos entonces clasificar a nuestras superficies segun que tan fuertemente dependan del angulo de incidencia. Dos casos extremos se ven en la siguiente figura

En el primero vemos que el angulo de reflexion es igual al angulo de incidencia. Hablamos en este caso de una reflexion especular. En el ultimo vemos que la reflectancia no depende del angulo de incidencia. Hablamos en este caso de una superficie *lambertiana*.

Definicion 1.4.2. Hablaremos de una superficie lambertiana cuando la funcion de reflectancia direccional sea constante. Es decir, que la radiancia reflejada no dependa del angulo. En este caso

$$\rho = \frac{\pi}{\cos \theta_z E_0} \quad (1.9)$$

Durante el resto del curso trabajaremos solamente con reflectancias lambertianas⁶.

1.5. Firmas espectrales

Una vez definida la reflectancia ya podemos empezar a estudiar como es la reflectancia para distintos cuerpos. Para hacer esto introduciremos un concepto nuevo que sera unificador para el trabajo en teledeteccion optica.

Definicion 1.5.1. Llamaremos *firma espectral* a la funcion $f(\lambda)$ que nos dice la reflectancia de una cobertura o cuerpo para cada longitud de onda y la notaremos ρ_λ .

Es importante remarcar que distintos cuerpos tendran distintas firmas espectrales y que las mismas dependeran del comportamiento biofisico y geofisico del mismo. Es decir, cambiando magnitudes como la concentracion de minerales, estructura foliar, contenido de humedad, etc. cambiaremos la firma espectral.

Observación. Ademas de la reflectancia hay otras dos magnitudes que describen el comportamiento de un cuerpo: la emitancia y la transmitancia. No estudiaremos los mismos en este curso.

⁶Es importante conocer que esto es una aproximacion. Si no lo hacemos podemos encontrarnos frente a errores en nuestra interpretacion de las imagenes que no sabemos de donde provienen.

Observación. Nos queda entonces estudiar firmas espectrales para distintas coberturas del suelo teniendo como objetivo conocerlas para luego estudiar lo que le pasa al mismo. Durante el curso, haremos dicho análisis de forma cualitativa. Sin embargo es posible modelar desde primeros principios el comportamiento de una firma espectral y luego, invirtiendo este comportamiento, obtener variables cuantitativas sobre el terreno. Esto excede los objetivos del curso pero pidan y bibliografía les será dada.

1.5.1. Vegetación

Para la firma espectral de la vegetación veremos la variación en 3 zonas del espectro.

Para la parte visible observamos en la figura que a medida que aumenta el contenido de clorofila *a* y *b* la reflectancia se vuelve cada vez menor. Este comportamiento es esperable pues la clorofila absorbe en las longitudes de onda del visible cercanas al rojo y al azul.

Además vemos que la variación en el contenido de clorofila⁷ no afecta a la firma espectral en el resto del espectro por lo tanto si nuestra imagen presenta variaciones solamente en la zona del visible sabremos que se debe a esto.

En segundo lugar vemos que el contenido de agua de la vegetación hace que la reflectancia cambie solo en la zona del infrarrojo medio. A medida que aumenta dicho contenido de agua la reflectancia disminuye y viceversa.

Además, como en el caso anterior, el cambio de contenido de agua no afecta a la zona del infrarrojo cercano y el visible. Por lo tanto si la vegetación se encuentra bajo estrés hídrico veremos el cambio primero en la zona del infrarrojo medio antes que en el infrarrojo cercano.

Finalmente, los cambios en el área foliar de la vegetación se ven reflejados principalmente en la zona del infrarrojo cercano y medio. Aumentando la reflectancia en el infrarrojo cercano a medida que aumenta el área foliar.

Estos comportamientos generales se reproducen para todas las especies de vegetación, cambiando la dependencia con los parámetros pero no la forma funcional.

Finalmente, como vemos en esta imagen. La vegetación que pasa de estar fotosintéticamente activa a estar muerta va cambiando lentamente su firma espectral entre la curva verde y la curva roja. Por lo tanto estudiar como cambia la firma espectral de la vegetación en el tiempo nos hablará de su estado fenológico.

1.5.2. Suelo

En el caso de la firma de suelo nos centraremos en que pasa con el contenido de humedad.

Vemos en este caso que la firma espectral del suelo cambia en todo el espectro a medida que variamos el contenido de humedad. Sin embargo los cambios principales se dan en la zona del infrarrojo cercano.

En particular, las bandas de absorción del agua y los cationes hidroxilos cambian muy fuertemente con el contenido de humedad. Por lo tanto estudiando dichas zonas podemos sacar de forma cuantitativa cuál es el contenido de humedad superficial del suelo.

Observación. Vale hacer la aclaración que todas las magnitudes medidas en teledetección óptica son superficiales. Uno puede hacer inferencias sobre el comportamiento debajo de la superficie, pero no más que eso.

1.5.3. Agua

Para el caso del agua la firma espectral de agua pura será casi cero para todo el espectro. Esto es especialmente cierto para la región del infrarrojo cercano y medio del mismo. Por lo tanto las variaciones en su firma espectral vendrán asociadas a cambios en el contenido de sedimentos y el tipo de los mismos como se ve en la figura.

⁷o pigmentos en general

Vemos que la reflectancia de la misma aumenta a medida que disolvemos mas arcilla hasta el punto de saturacion. Nuevamente, este comportamiento nos permite realizar inferencias sobre la composicion de la solucion de agua en cuestion y el tipo de sedimentos presenten⁸.

Como ultimo ejemplo de firma espectral mostramos al agua en otros estados de agregacion. En particular vemos que tanto para las nubes como para la nieve la reflectancia en la zona del espectro visible es siempre alta.

Para el caso de la nieve podemos distinguir la granularidad de la misma mirando como es la reflectancia en la region del infrarrojo cercano en relacion al visible. Notamos en este caso que a medida que el tamaño del mismo aumenta la reflectancia en el infrarrojo cercano disminuye.

Ademas observar lo que sucede en el infrarrojo medio nos permite separar nubes de nieve en una imagen notando que las nubes tienen siempre una reflectancia mayor que la nieve.

1.6. Respuesta espectral

Por lastima los sensores que uno usara habitualmente no mediran todo el espectro electromagnetico. Tampoco es que esto tenga sentido, como vimos arriba hay zonas de la atmosfera donde la iluminacion solar es cero y por lo tanto la radiancia en dichas zonas sera cero.

En general los sensores mediran una zona acotada del espectro en funcion de cual sea el objetivo de la medicion de interes. En nuestro caso, hablaremos de la respuesta espectral de un sensor segun como pese la radiancia recibida en funcion de la longitud de onda.

Como vemos en el siguiente caso para Landsat 8, la respuesta espectral de un sensor esta definida principalmente por dos cosas. Por un lado el centro de banda que nos dice donde esta midiendo el sensor en el espectro. Por otro el ancho de banda que nos dice cuanto hacia los lados el sensor esta midiendo. Cuanto menor sea el ancho de banda de un sensor, mayor su resolucion espacial y por lo tanto mas sensible a los cambios en una determinada longitud de onda

Observación. En funcion de la cantidad de bandas de las que disponga un sensor para medir en el espectro hablaremos de sensores multiespectrales o hiperespectrales.

Matematicamente podemos describir al sensor como una distribucion de pesos $s_j(\lambda)$ donde lo que calculamos al realizar la medicion es el valor esperado de la firma espectral bajo esa distribucion s_j .

Observación. Hablaremos de resolucion espectral de un sensor cuando queramos hablar de que tan bien separa el mismo zonas del espectro.

De esta manera estamos discretizando a la firma espectral y pasamos de una funcion continua a una serie de valores discretos⁹.

1.7. Vector pixel

Al discretizar de esta forma el espectro conviene introducir una notacion matematica para describir a los pixeles. En el caso de que el satelite tenga una sola banda hablaremos de un pixel como un pixel escalar.

Para el caso de satelites de mas de una banda, hablaremos de un pixel como un *vector pixel* dado por

$$\rho = (\rho_1, \dots, \rho_N) \quad (1.10)$$

donde cada componente corresponde al valor de reflectancia de una banda en concreto.

Como vemos en el siguiente caso para landsat 7 la firma queda discretizada en 7 valores donde cada uno esta dado por el valor esperado de la reflectancia con respecto al filtro de cada sensor.

⁸Hacerlo efectivamente es otro tema.

⁹Lo mismo pasara para la descripcion espacial, temporal y radiometrica. Cada una con su correspondiente resolucion espectral.

Valores mas altos de reflectancia en una zona de la firma espectral se convertiran en valores mas altos de reflectancia en la componente del vector pixel.

Al hacer esto, es importante remarcar que estamos perdiendo datos. Segun la aplicacion de interes dichos datos pueden ser relevantes o no.

Definimos este concepto pues nos permite comenzar a pensar a los valores de los pixeles de otra forma. Como vemos en este ejemplo con solo dos bandas

los pixeles pertenecientes a coberturas similares se agrupan en regiones del espacio que llamaremos espacio espectral.

Ademas, al cambiar una cobertura su firma espectral veremos que el pixel se desplaza dentro de este espacio y en funcion de como es dicho desplazamiento podremos extraer informacion sobre la cobertura como se ven a continuacion.

A medida que pase el curso veremos como a partir del concepto de espacio espectral podremos encontrar nuevas formas de interpretar la informacion y de extraer datos de las imagenes.