

## Automatización de cálculos, referenciando eventos meteorológicos en imágenes satelitales infrarrojas

*Automation of referencing calculations of meteorological events in infrared satellite images.*

Josué de Jesús Trejo-Alonso<sup>1</sup>, Juan Pablo Molina-Aguilar<sup>1\*</sup>

Recibido: 10/03/2019

Aceptado: 27/04/2019

\*Autor de correspondencia

### Resumen

El presente trabajo desarrolló una herramienta informática que permitió referenciar en imágenes satelitales captadas por el satélite GOES-13 la ubicación geográfica de eventos meteorológicos en el territorio de la República Mexicana empleando una rutina en lenguaje R que facilitó hacer el tratamiento digital desde su proyección nativa decodificándola por píxeles mediante una escala digital para evaluar la técnica hidrostimador para el pronóstico de la intensidad de lluvia posibilitando el acoplamiento espacial de información mediante una aplicación Web de fácil acceso limitado a las dimensiones cobertura territorial y características de la imagen al referenciar estaciones meteorológicas o infraestructuras hidráulicas para acoplar temporalmente de los registros terrestres respecto del pronóstico satelital y visualizar la evolución geométrica con la implementación de procesos automatizados para desarrollar cálculos hidrológicos logrando caracterizarlos, analizarlos y comprenderlos dando la posibilidad de establecer pronósticos de mayor certidumbre.

**Palabras clave:** Teledetección, Proyección GEOS, pixel, coordenadas geográficas, hidrostimador, paqueterías.

### Abstract

*The present work developed a computer tool that allowed referencing in satellite images captured by the GOES-13 satellite the geographical location of meteorological events on the Mexican Republic through a R language routine that allowed digital processing from its native projection by decoding it by pixels using a digital scale that allows applying the hydro-estimator technique to forecast the intensity of rain allowing the spatial coupling of information through an easily accessible Web application limited to the territorial coverage dimensions and characteristics of the image making it possible to reference meteorological stations or hydraulic infrastructures to temporarily couple terrestrial records with respect to the satellite forecast and visualize the geometric evolution with the implementation of automated processes to develop hydrological calculations allows to characterize, analyze and understand them giving the possibility of establishing predictions of greater certainty.*

**Keywords:** remote sensing, GEOS projection, pixel, geographical coordinates, hydroestimator, packages.

## 1. INTRODUCCIÓN

Una herramienta útil para llevar a cabo el análisis de fenómenos meteorológicos es a través de mapas, los cuales se definen cuando se realiza la proyección de información en un plano físico o digital (Lapaine y Usery, 2014). En muchos de los casos estas proyecciones de datos se lleva a cabo sobre una esfera o bien un elipsoide y posteriormente se trasfiere a una superficie cuya característica trascendental son sus ángulos, distancias y superficies medidas proporcionales a las dimensiones de la Tierra. Su observación es el objeto de estudio de la teledetección. Inicialmente se aplicó a fotografías aéreas y en el presente considera el proceso de obtención de la imagen, tratamiento y aplicación particular, en donde las plataformas espaciales son las de mayor utilización (Chuvieco, 1995). El auge tecnológico en satélites ha permitido ampliar la obtención de información y recolectarla de manera continua, mediante lecturas de radiación electromagnética a través de sensores. La altura orbital capta una imagen panorámica de una amplia superficie terrestre en una sola toma, al registrar las longitudes de onda de los cuerpos o materias (Rodríguez y Arredondo, 2005). En la actualidad se cuenta con satélites Ambientales Geostacionarios Operacionales conocidos como GOES, desarrollados y operados por la Administración Nacional de la Aeronáutica y del espacio y la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (Goodman *et al.*, 2012). Los satélites orbitan la tierra rotando a la misma velocidad manteniendo una posición fija de observación a una altura de 36,000 km con cero grados de inclinación respecto del ecuador. Estos satélites cubren aproximadamente el 43% de la superficie terrestre (Peredo, 2004). Los sensores instalados en los satélites utilizan una gama de colores que van desde el verde hasta el rojo y el componente infrarrojo (IR) no visible para el ser humano que registran longitudes de onda, del blanco al negro. Con una amplia gama de tonos grises intermedios, adicionándole el color azul se obtiene el verde, el verde se asigna al rojo y el rojo para el infrarrojo, generándose entonces una imagen en falso o verdadero color (Rodríguez y Arredondo, 2005). Una imagen satelital (por ejemplo figura 1) corresponde al registro de energía electromagnética en forma electrónica conformada por pixeles que muestran el brillo de

la superficie terrestre o bien las formaciones nubosas mediante una malla (*raster*). Los valores digitales de los pixeles van de 0 a 255 para una resolución de 8 bits, con lo cual la rasterización contará con un número de filas y de columnas. El número total de pixeles será el producto de dichos renglones y columnas (Ormeño, 2006). Las imágenes satelitales IR del satélite GOES-13 cuentan con la proyección GEOS cuyo argumento es la longitud subsatelital ( $\lambda D$ ) en grados. El uso de la proyección estacionaria normalizada detalla la vista de un satélite localizado sobre el plano del ecuador. Es necesario realizar una transformación en función de la geometría idealizada de la tierra; tomando en cuenta la distancia desde el satélite hasta el centro de la tierra ( $h$ ) que son 42,164 km. Sin embargo dicha idealización se basa en un elipsoide perfecto con ecuador de radio 6378.169 km y un polo de radio 6356.5838 km (CGMS, 1999). La proyección WGS84 define los valores de los parámetros en la proyección. De lo anterior es claro que para utilizar imágenes satelitales en un plano cartesiano es necesario realizar una proyección matemática de la imagen. Por esta razón, el objetivo del presente trabajo es desarrollar una aplicación computacional que permita sistematizar la proyección de imágenes GOES a coordenadas geográficas. Esta aplicación permitirá desarrollar la cartografía de distintos fenómenos meteorológicos, en particular la intensidad de precipitación (a través de la técnica del hidroestimador).

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1 Imágenes satelitales

Las imágenes en formato digital infrarrojo del satélite GOES-13 son captadas con proyección WGS84 y guardadas en formato .PCX sin tratamiento identificándolas con la fecha y hora las cuales registran eventos meteorológicos en una ventana con límites superior  $36.4768^\circ$ , inferior  $14.1118^\circ$ , izquierda  $-122.2590^\circ$  y derecha  $-79.0817^\circ$  constituida por 1280 y 817 pixeles de longitud y latitud respectivamente con valor de brillo en el rango 0 a 255 en concordancia con el nivel digital captado por el sensor.

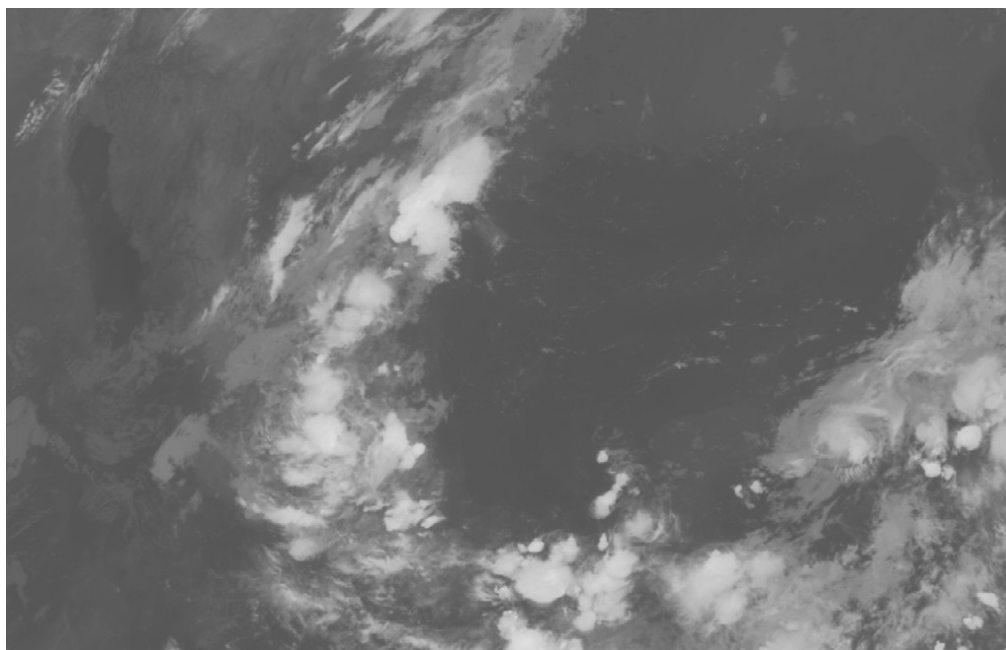


Figura 1. Imagen satelital captada el 26 de septiembre de 2017 a las 03:45 a.m. con nubosidad sobre el estado de Querétaro que originó una intensa tormenta causante de fuertes inundaciones

## 2.2 Técnica del hidroestimador

El tratamiento aplicado a las imágenes GOES se realiza mediante el algoritmo de la técnica del hidroestimador, el cual surgió de observaciones en el centro de las planicies americanas. Se utilizaron mediciones históricas de precipitación registradas en radares superficiales y temperaturas del tope de la nube, captadas en imágenes satelitales del periodo mayo a junio en 1995. El ajuste que se estableció con estas mediciones fue una regresión exponencial mediante un riguroso análisis estadístico

(Scofield y Kuligowski, 2003). Posteriormente se realizaron correcciones numéricas dando lugar al Autoestimador, que considera la humedad, el crecimiento y gradiente de temperatura en el tope de las nubes (Vicente *et al.*, 1998).

En la ecuación (1)  $R$  representa la intensidad de precipitación estimada en mm/h,  $T$  es la temperatura del tope de las nubes en grados °K en función de las condiciones  $T = 418 - B$ ;  $B > 176$  y  $T = 330 - (B/2)$ ;  $B \leq 176$  considerando que  $B$  es el nivel digital del brillo del pixel (adimensional).

$$R = 1.1183 * 10^{11} e^{-0.036382T^{1.2}} \quad (1)$$

## 2.3 Transformación de proyecciones

La relación existente entre las coordenadas de una imagen y las coordenadas geográficas se establece mediante la concatenación de dos funciones  $f, f^{-1}$  y  $g, g^{-1}$  para cada dirección, en las cuales los valores de  $Lon, Lat, x, y$  son números reales, mientras que  $l, c$  son números enteros. Las funciones  $f, f^{-1}$  son no lineales y

definidas por la proyección geográfica, mientras que las funciones de escalamiento  $g, g^{-1}$  son no lineales. Existen dentro de la propia imagen los factores  $CFAC, LFAC$  y las compensaciones  $COFF, LOFF$  los cuales son proporcionados en el registro de navegación de cada imagen. La figura 2 muestra la relación entre las coordenadas geográficas y las coordenadas  $x, y$  de una imagen satelital.

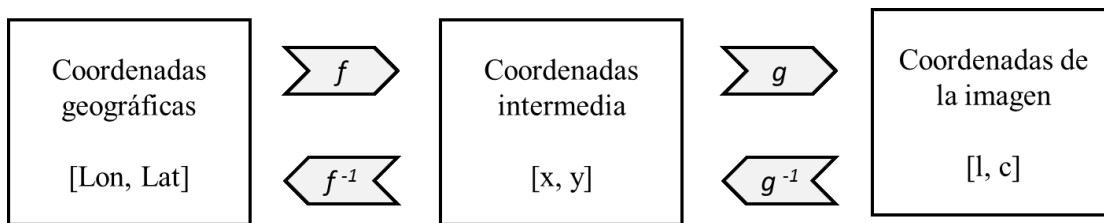


Figura 2. Relación entre coordenadas geográficas y de una imagen satelital

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = f \begin{pmatrix} Lon \\ Lat \end{pmatrix} \tag{2}$$

$$\begin{bmatrix} Lon \\ Lat \end{bmatrix} = f^{-1} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \tag{3}$$

$$\begin{bmatrix} c \\ l \end{bmatrix} = g \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \tag{4}$$

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = f^{-1} \begin{pmatrix} c \\ l \end{pmatrix} \tag{5}$$

Mediante los planos de referencia cartesianos  $e_1, e_2, e_3$  con origen en el centro de la tierra.  $e_3$  representa puntos en la dirección norte, mientras que  $e_1$  representa los puntos con dirección al

meridiano de Greenwich. Por su parte  $s_1, s_2, s_3$  representan la posición del satélite. En concordancia  $s_3$  apunta al norte mientras que  $s_1$  lo hace al centro terrestre (ver figura 3).

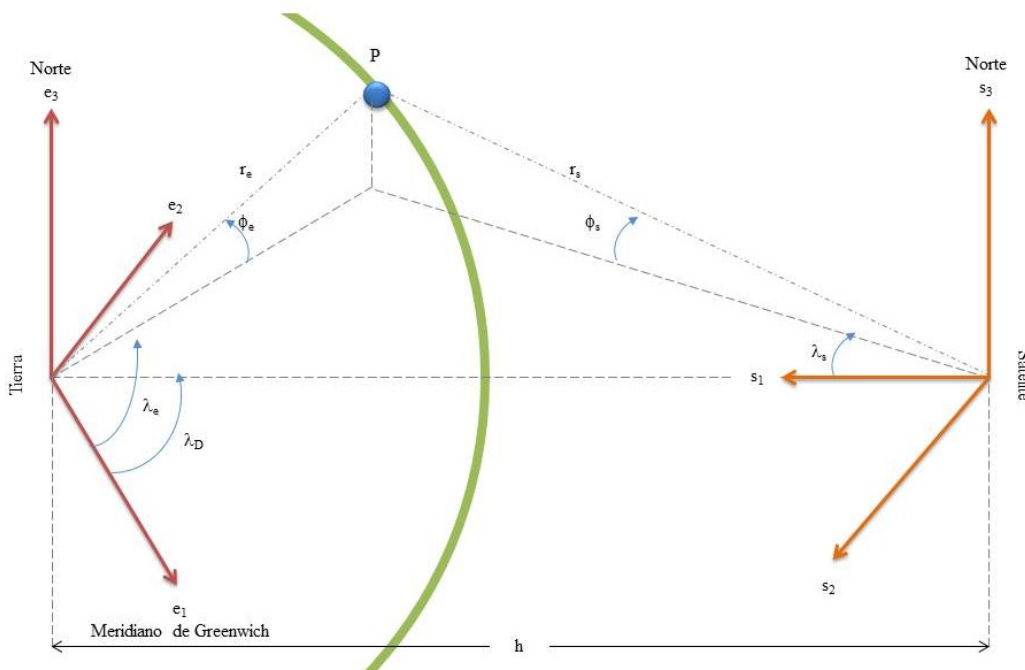


Figura 3. Plano de coordenadas para la proyección GEOS (Adaptado de CGMS, 2013)

Como ya se mencionó la tierra puede representarse mediante un elipsoide rotacional achatado representado por las ecuaciones 6 y 7. En la figura 3  $r_e$  es el vector al punto  $P$  sobre la superficie terrestre, medido desde el centro de la tierra; mientras que  $\lambda_e$  y  $\phi_e$  son la longitud y

latitud geocéntrica respectivamente. Estas variables describen la posición y su transformación a coordenadas geográficas  $Lon, Lat$  y la distancia, se realiza mediante las expresiones 8, 9 y 10.

$$\frac{e_1^2 + e_2^2}{r_{eq}^2} + \frac{e_3^2}{r_{pol}^2} = 1 \quad (6)$$

$$\frac{e_1^2 + e_2^2}{(6378.169)^2} + \frac{e_3^2}{(6356.5838)^2} = 1 \quad (7)$$

$$Lon = \lambda_e \quad (8)$$

$$Lat = \arctan \left[ \left( \frac{r_{eq}^2}{r_{pol}^2} \right) \tan(\phi_e) \right] \quad (9)$$

$$r_e = \frac{r_{pol}}{\sqrt{1 - \left(1 - \frac{r_{pol}^2}{r_{eq}^2}\right) \cos^2(\phi_e)}} \quad (10)$$

El vector de distancia  $r_s$  medido desde el satélite al mismo punto  $P$  sobre la superficie terrestre, se puede expresar utilizando su plano de referencia. Se utilizan sus componentes cartesianos en

función de distancia entre el satélite y el centro de la tierra  $h$  y la longitud subsatelital de referencia  $\lambda_e$ .

$$\hat{r}_s = \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (h - r_e) \cos(\phi_e) \cos(\lambda_e - \lambda_D) \\ -r_e \cos(\phi_e) \sin(\lambda_e - \lambda_D) \\ r_e \sin(\phi_e) \end{bmatrix} \quad (11)$$

Utilizando las ecuaciones (8) a (11) se pueden obtener los ángulos de exploración utilizados por el satélite. De tal manera que se pueden realizar proyecciones en ambos sentidos hacia adelante o bien hacia atrás. En el caso de la primera proyección se requiere de seis variables, dos de

ellas definidas por las ecuaciones (14) y (15). Estas ecuaciones son auxiliares en la definición de las cuatro variables restantes; ecuaciones (16) a (19). Finalmente, con estos resultados se puede aplicar la ecuación (20).

$$\lambda_s = \arctan \left( \frac{r_2}{r_1} \right) \quad (12)$$

$$\phi_s = \arcsin \left[ \frac{r_3}{\sqrt{r_1^2 + r_2^2 + r_3^2}} \right] \quad (13)$$

$$c_{lat} = \arctan(0.993243 \tan(Lat)) \quad (14)$$

$$r_0 = \frac{6356.5838}{\sqrt{1 - 0.00675701 \cos^2(c_{lat})}} \quad (15)$$

$$r_1 = (42164 - r_0) \cos(c_{lat}) \cos(Lon - lon) \quad (16)$$

$$r_2 = -r_0 \cos(c_{lat}) \sin(Lon - lon) \quad (17)$$

$$r_3 = r_0 \sin(c_{lat}) \quad (18)$$

$$r_n = \sqrt{r_1^2 + r_2^2 + r_3^2} \quad (19)$$

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \arctan \left( \frac{-r_2}{r_1} \right) \\ \arctan \left( \frac{-r_3}{r_n} \right) \end{bmatrix} \quad (20)$$

La segunda proyección también requiere de dos variables auxiliares, ecuaciones (21) y (22) que

definen las cuatro restantes, ecuaciones (13) a (26) para poder aplicar la ecuación (27):

$$s_d = \sqrt{(42164 \cos(x) \cos(y))^2 - 1737122264 * (\cos^2(y) + 1.006739501 \sin^2(y))} \quad (21)$$

$$s_n = \frac{42164 \cos(x) \cos(y) - s_d}{\cos^2(y) + 1.006739501 \sin^2(y)} \quad (22)$$

$$s_1 = 42164 - s_n \cos(x) \cos(y) \quad (23)$$

$$s_2 = s_n \sin(x) \cos(y) \quad (24)$$

$$s_3 = -s_n \sin(y) \quad (25)$$

$$s_{xy} = \sqrt{s_1^2 + s_2^2} \quad (26)$$

$$\begin{bmatrix} Lon \\ Lat \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \arctan \left( \frac{s_2}{s_1} \right) + lon \\ \arctan \left( 1.006739501 \frac{s_3}{s_{xy}} \right) \end{bmatrix} \quad (27)$$

### 3. IMPLEMENTACIÓN WEB

R es un programa de licencia libre para estadística computacional y gráficas (R Core Team, 2016). Debido a su popularidad y eficiencia, se ha extendido en aplicaciones a otras áreas de la ciencia. Además, para el desarrollo de la aplicación Web se utilizó el paquete ‘shiny’ (Chang *et al.*, 2016). Todos estos paquetes fueron diseñados especialmente para R y también están protegidos bajo la licencia de

software libre. La figura 4 muestra la pantalla de la aplicación Web que fue programada en R. Este programa transforma latitud y longitud geográfica a posición X y Y de pixel en proyección GEOS de una imagen IR. Como se observa, se ingresan en las primeras dos casillas las coordenadas geográficas del sitio de interés, mientras que en las dos casillas restantes se define el tamaño de la imagen satelital en pixeles. De esta forma se establece la relación de pixeles de posición en la parte superior derecha.

Figura 4. Aplicación Web para transformar latitud y longitud geográfica a posición X y Y de pixel en proyección GEOS de una imagen IR

El código implementado en la transformación de coordenadas se hizo usando los paquetes ‘sp’ (Pebesma y Bivand, 2005; Bivand *et al.*, 2013) y ‘rgdal’ (Bivand *et al.*, 2016) del programa R. Estos paquetes resuelven las ecuaciones presentadas en la sección 2.3. Estos paquetes poseen también un variado conjunto de tareas

para el tratamiento de datos geoespaciales. Se expone a continuación el código escrito en R, con el cual se generó la aplicación que permite transformar de coordenadas Latitud/Longitud, a pixeles de la imagen del satélite, empleando una proyección GEOS.

```
library (shiny)
library (sp)
library (rgdal)
LongLat2XY<-function(Long,Lat,xi,yi)
ui<-fluidpage(
  headerPanel("Bienvenido al programa para transformer Long/Lat a XY"),
  sidebarPanel(
    numericInput("Longitud", label = h3 ("Longitud (ej. -100.2591)"), value = -100.2591),
    hr()
    fluidRow(column(3,verbatimTextOutput("Longitud"))),
    numericInput("Latitud", label = h3 ("Latitud (ej. 28.4718)"), value = 28.4718),
    hr()
  )
)
```

```

fluidRow(column(3,verbatimTextOutput("Latitud"))),
numericInput("xi", label = h3 ("Píxeles en X (ej. 1280)"), value = 1280),
hr()
fluidRow(column(3,verbatimTextOutput("Píxeles en X"))),
numericInput("yi", label = h3 ("Píxeles en Y (ej. 817)"), value = 817),
hr()
fluidRow(column(3,verbatimTextOutput("Píxeles en Y")))
),
mainPanel(
tableOutput (outputId="x")
)
)
Server<-function(input,output)
shinyApp(ui=ui,server=server)

```

Dentro de R la librería ‘shiny’ es la que permite desarrollar esta herramienta, uniendo así el programa de transformación de coordenadas con una interfaz amigable. Así, ‘shiny’ queda definida por dos componentes principales, ‘ui’ y ‘server’.

En el primero de ellos se describen los detalles y el formato de la aplicación, tales como los menús, los botones y las cajas (el usuario introduce la información). El segundo componente detalla la conexión entre el servidor y el programa, y los parámetros de salida, ya sea que se requiera una imagen, una tabla o un solo valor.

Cabe mencionar que la librería ‘shiny’ tiene un servidor con todos los paquetes de R ya cargados, esto para que no exista incompatibilidad entre las funciones programadas y las aplicaciones Web creadas. Además, las aplicaciones tienen un tiempo limitado de uso generando un costo extra si se quiere que el programa tenga un uso ilimitado.

Respecto al código mostrado, primero se construyó una función que realizara la transformación de coordenadas y después conecta dicha función con los datos que ingresa el usuario.

El código está hecho para transformar coordenadas una a una, pero se puede adaptar fácilmente para aceptar una tabla de valores.

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Utilizando los datos de la Red de Monitoreo de precipitaciones extremas del estado de Querétaro (RedCIAQ) [www.redciaq.uaq.mx](http://www.redciaq.uaq.mx) se vinculan todas las posiciones de las Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMA) de esta Red (figura 5). De esta forma, se obtiene para cada estación su respectivo pixel en la imagen satelital GOES como se muestra en la tabla 1.

Una vez identificados los píxeles, se aplica la ecuación 1 para cambiar el formato nativo de la imagen con tonalidades de negro al blanco, por una imagen con una escala de siete colores de intensidad de precipitación pronosticada (a partir del nivel digital del brillo en el pixel). Como ya se comentó, es de interés particular los 34 píxeles que representan las condiciones sobre el estado de Querétaro, sin embargo la técnica del Hidroestimador aplicada a la imagen completa de la república mexicana; permite observar de forma completa y precisa la evolución de las tormentas y fenómenos que afectan todo el territorio mexicano.

Para ejemplificar la versatilidad de este procedimiento, a continuación se muestra la evolución de una tormenta sobre el estado de Querétaro. La tormenta que ocurrió del 24 al 26 de septiembre de 2017, ocasionó una fuerte precipitación con inundaciones considerables y graves daños materiales en la zona metropolitana de la ciudad de Santiago de Querétaro.



En la figura 6 se aprecia el desarrollo de la tormenta durante el día, con horario (a) 23:45, el día 25 con horarios (b) 02:45, (c) 05:45, (d) 08:45, (e) 11:45, (f) 14:45, (g) 17:45, (h) 20:45, (i) 23:45 y el día 26 con horarios (j) 02:45, (k) 05:45, (l) 08:45, (m) 11:45, (n) 14:45, (o) 17:45.

El uso de las paqueterías “shiny”, “sp” y “rgdal” permitieron un manejo eficiente de los parámetros asociados con la resolución de las imágenes satelitales.

De esta forma, la correlación entre las coordenadas geográficas de un sitio de interés y los pixeles correspondiente en la proyección GEOS se establece de manera simple y exacta.

Asimismo, el desarrollo de la aplicación Web contribuye en un manejo amigable de imágenes

GOES, con la característica principal de poder realizar la transformación para distintos tamaños de imágenes. Esta transformación a pixeles se realiza dentro del marco geográfico mencionado, proyectando la longitud y la latitud geocéntrica.

En la tabla 1, se referenciaron las 34 Estaciones Meteorológicas Automáticas que componen la RedCIAQ.

Esta sistematización permite visualizar el desarrollo de un fenómeno sobre una región específica en el territorio nacional. También puede establecerse el acoplamiento de la información superficial respecto de la satelital, monitorear cuencas hidrológicas, vasos en presas, monitorear caudales para generación de energía eléctrica, o conocer la evolución de presas rompepicos.

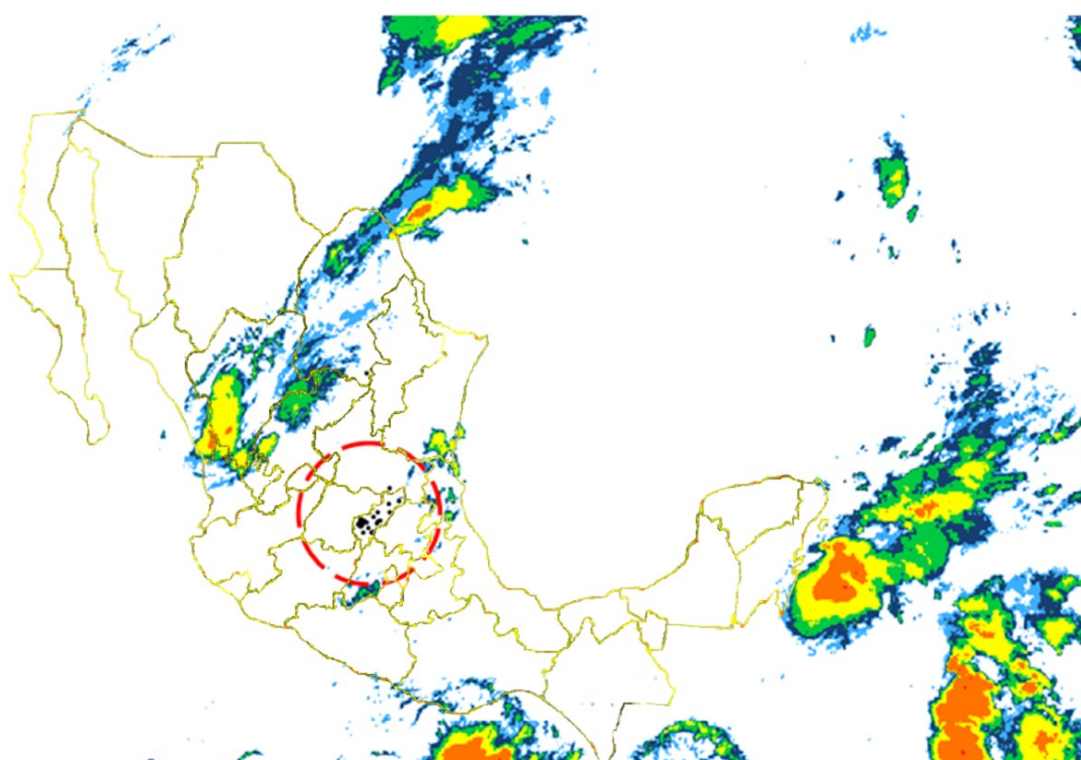
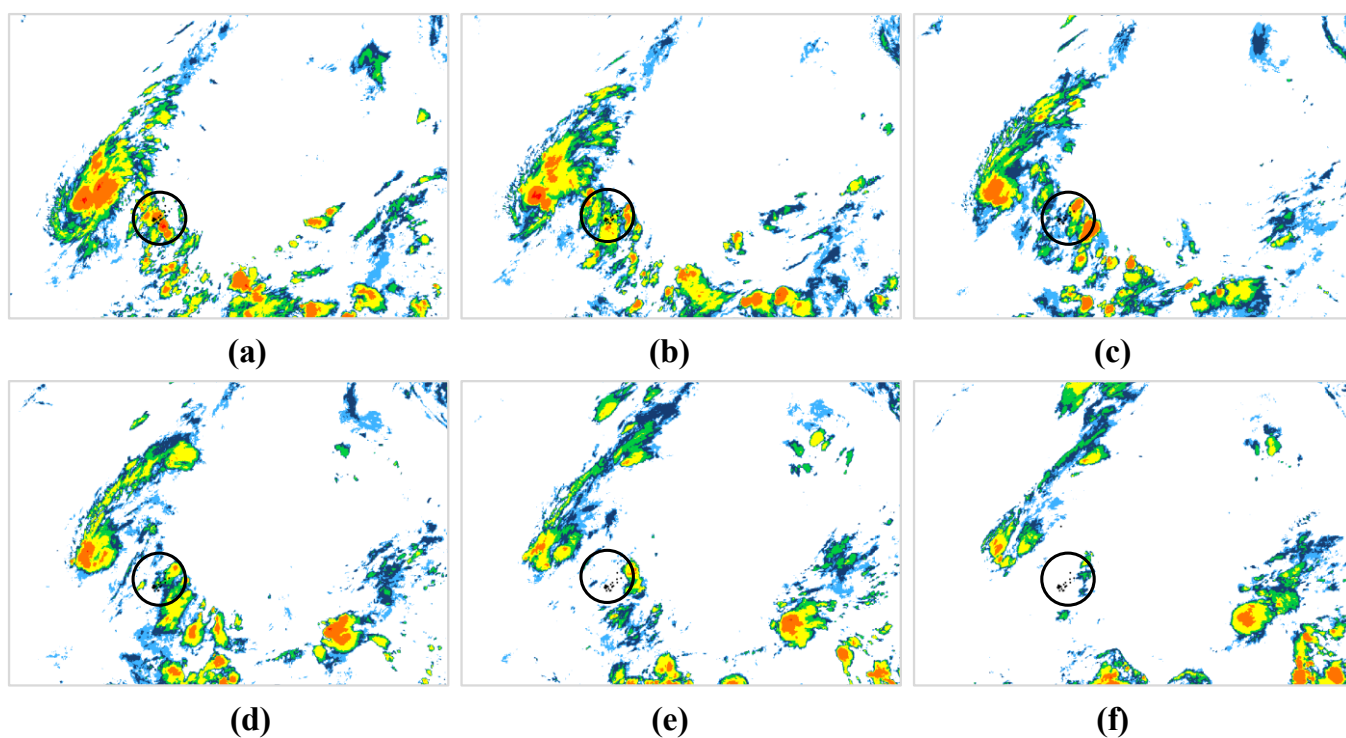


Figura 5. Pixeles que corresponden a las estaciones de la RedCIAQ en la imagen satelital IR con tratamiento en función de la intensidad de lluvia pronosticada

Tabla 1. Ubicación geográfica de las EMA de la RedCIAQ y su pixel en las imágenes satelitales

Nombre	Long	Lat	X	Y	Nombre	Long	Lat	X	Y
Chulavista	-100.47	20.63	419	265	Ezequiel Montes	-99.90	20.67	424	255
Belén	-100.41	20.65	422	266	Huimilpan	-100.27	20.37	466	289
Real del Parque	-100.40	20.61	421	264	Landa Matamoros	-99.32	21.18	430	260
Candiles	-100.40	20.55	421	262	Pedro Escobedo	-100.14	20.50	434	255
Cimatario	-100.38	20.56	422	262	San Joaquín	-100.01	20.38	436	256
Centro Histórico	-100.39	20.59	422	264	San Juan del Rio	-99.97	20.39	440	265
Milenio III	-100.35	20.59	423	264	Tequisquiapan	-99.91	20.61	441	267
San Gil	-100.44	20.70	421	268	Tolimán	-99.93	20.90	441	277
El Refugio	-100.35	20.65	424	266	Viñedos	-100.49	20.61	418	264
COTAS Amazcala	-100.34	20.71	425	268	El Esparrago	-100.01	20.38	434	255
Cerro de Campanas	-100.41	20.59	421	263	Santa Rosa Jáuregui	-100.45	20.74	421	270
Amealco de Bonfil	-100.14	20.19	428	427	Unión de Ejidos	-100.23	20.65	428	266
Pinal de Amoles	-99.63	21.14	454	286	Joaquín Herrera	-99.57	20.92	455	277
Arroyo Seco	-99.69	21.55	455	303	Juriquilla	-100.45	20.72	421	269
Cadereyta Montes	-99.81	20.70	444	268	UAQ Aeropuerto	-100.37	20.62	423	265
Colón	-100.05	20.78	436	272	Pasteur y 57	-100.38	20.58	422	263
Corregidora	-100.43	20.55	441	267	CICATA QRO IPN	-100.37	20.57	422	263



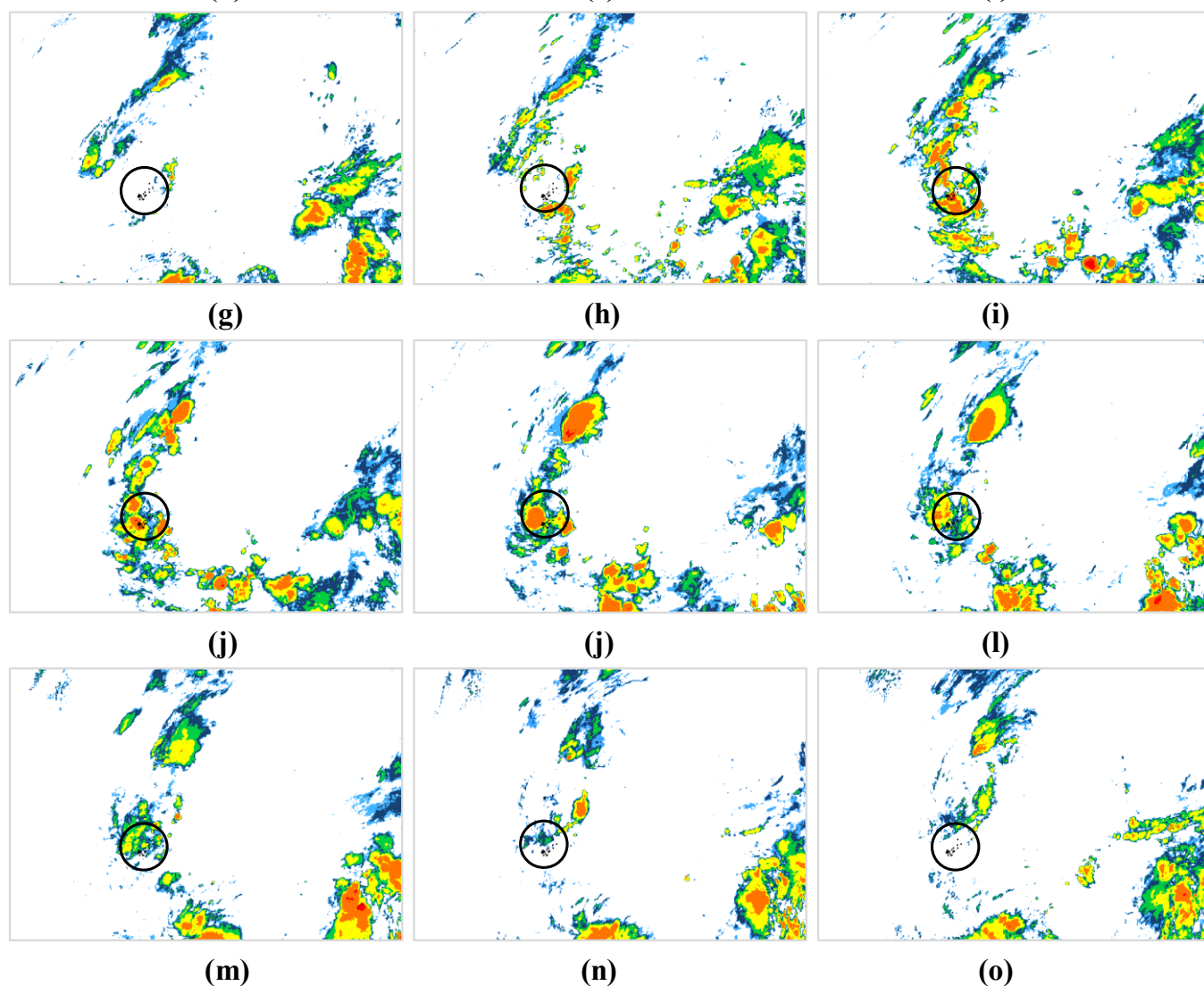


Figura 6. Evolución de la tormenta del 24 al 26 de septiembre de 2017 sobre Querétaro

## 5. CONCLUSIONES

Esta sistematización de cálculos geocéntricos permite a los sectores académicos y de investigación, contar con una herramienta sencilla para el monitoreo y estudio de fenómenos meteorológicos en zonas de interés; siempre y cuando se cuente con imágenes del tipo GOES. Asimismo, esta herramienta permite proyectar imágenes satelitales de cualquier dimensión. Esta herramienta aplicada a la gestión de recursos hídricos, puede ayudar en la operación y mantenimiento de infraestructura hidráulica, así como fundamentar programas de prevención social generando alertas en tiempo real y estableciendo escenarios para la

mitigación de daños producto de precipitaciones extremas e inundaciones. Se pueden incorporar paqueterías a la lectura secuencial de imágenes para generar una estadística descriptiva de su evolución geométrica. También se pueden incorporar modelos de predicción acordes a las características del territorio que se estudia.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Sistema Meteorológico Nacional de México (SMN) por el acceso a las imágenes satelitales digitales, a través de su Departamento de Percepción Remota.

## REFERENCIAS

- Bivand, R., Pebesma, E., Gómez-Rubio, V. (2013). *Applied spatial analysis with R*. Second edition. Springer. NY.
- Bivand, R., Keitt, T., Rowlingson, B. (2016). *rgdal: Bindings for the Geospatial Data Abstraction Library*. R package version 1.1-10.
- Chang, W., Cheng, J., Allaire, J., Xie, Y., McPherson, J. (2016). *Shiny: Web Application Framework for R*. Obtenido de R package version 0.14.1
- Chuvieco, E. (1995). *Fundamentos de teledetección espacial 2da. edición*. Rialp, S.A. Madrid. 449 p.
- CGMS, (1999). Coordination Group for Meteorological Satelites. *LRIT/HRIT Global Specification*. En: [https://www.cgms-info.org/documents/pdf\\_cgms\\_03.pdf](https://www.cgms-info.org/documents/pdf_cgms_03.pdf)
- Goodman, S., Gurka, J., De Maria, M., Scmit, T., Mostek, A., Jedlovec, G., Reynolds, R. (2012). The GOES-R proving ground: acelerating user readiness for the next-generation geostationary environmental satellite system. *Bulletin American Meteorology society*, 1029-1040. Doi: 10.1175/BAMS-D-11-00175.1
- Lapaine, M., Usery, L. (2014). Chap. 9. *Map projections and reference systems*, 1-14. En F. Ormeling, y B. Rysted (eds.). *The World of maps*. Intenational Cartographic Association.
- Ormeño, V. (2006). *Teledetección Fundamental 3a. edición*. Madrid, España. 344 p.
- Pebesma, E., Bivand, R. (2005). *Classes and methods for spatial data in R*. En: <http://cran.r-project.org/doc/Rnews>
- Peredo, A. (2004). *Software para análisis del presupuesto de enlace para comunicaciones vía satélite*. Tesis de Licenciatura, Universidad de las Américas Puebla, Cholula, Puebla, México. En: [catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/lem/peredo\\_a\\_s/](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/peredo_a_s/)
- R Core Team. (2016). *R: A language and environment for statistical computing*. Obtenido de The R Project for Statistical Computing: <https://www.R-project.org/>
- Rodríguez, C., Arredondo, B. (2005). *Manual para el manejo y procesamiento de imágenes satelitales obtenidas del sensor remoto MODIS de la NASA, aplicado en estudios de ingeniería civil*. Trabajo de grado. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá, Colombia. 230 p.
- Scofield, R., Kuligowski, R. (2003). Status and Outlook of Operational Satellite Precipitation Algorithms for Extreme – Precipitation Events. *Weather and Forecasting* (18) 1037-1051. Doi: 10.1175/1520-0434(2003)018<1037:SAOOOS>2.0.CO;2
- Vicente, G., Scofield, R., Menzel, P. (1998). The Operational GOES Infrared Rainfall Estimation Technique. *Bulletin of the American Meteorological Society* (79) 1883-1898. doi: 10.1175/1520-0477(1998)079<1883:TOGIRE>2.0.CO;2