

"2015, Año del Generalísimo José María Morelos y Pavón"

ESTIMACIÓN DE HUMEDAD DE SUELO CON BASE EN IMÁGENES DE SATÉLITE

Proyecto TH1508.1

Informe final

Dr. René Lobato Sánchez

Subcoordinación de Hidrología Superficial

Diciembre de 2015

CONTENIDO

- I. Introducción
- II. Análisis de las plataformas satelitales disponibles para la estimación de humedad del suelo, determinación del tipo de plataforma y su disponibilidad en México para fines operativos
- III. Obtención de datos de humedad del suelo estimada por modelaje y publicada en el GLDAS, comparación con datos observados
- IV. Desarrollo de un esquema de elaboración de la perspectiva de sequía (drought outlook)
 - i. Componentes o elementos necesarios para elaboración de la perspectiva de sequía
 - ii. Elaboración de una propuesta metodológica para la elaboración de la perspectiva de sequía
- V. Conclusiones y recomendaciones
- VI. Referencias

“2015, Año del Generalísimo José María Morelos y Pavón”

ACRÓNIMOS

CFSV2	Climate Forecast System Version 2
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
CONANP	Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas
CPC	Climate Prediction Center
ESA	European Space Agency
IMTA	Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
IRI	International Research Institute for Climate and Society
JPL	Jet Propulsion Laboratory
NAEFS	North American Ensemble Forecasting System
NASA	National Aeronautical and Space Administration
NMME	North American Multi Model Ensemble
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
OMM	Organización Mundial de Meteorología
PRONACOSE	Programa Nacional Contra Sequías
SMN	Servicio Meteorológico Nacional
SMAP	Soil Moisture Active Passive
SMOS	Soil Moisture and Ocean Salinity

I. Introducción

La sequía se puede catalogar como un fenómeno climático severo que conlleva impactos a diversas escalas de la sociedad, regularmente inicia como un período de lluvia escasa que a medida que se vuelva más escasa aún se intensifican sus efectos, sobre todo impactos directos a la actividad productiva a nivel nacional, donde los sectores mayormente afectados son el de la agricultura e hídrico, avanzando hacia todo el ámbito socioeconómico.

Con el objeto de contar con una herramienta de planeación y toma de decisiones, se implementó el Programa Nacional Contra las Sequías, que consiste en la atención, seguimiento, mitigación y prevención al fenómeno recurrente de la sequía en el territorio nacional. El Programa está siendo administrado por el gobierno federal a través de la Comisión Nacional del Agua y se implementa por un grupo de instituciones que incluye a universidades públicas, centros de investigación y organismos de gobierno, además de especialistas nacionales e internacionales en la materia.

La metodología de la estimación del Monitor de Sequías de México (MSM) incluye la información de la condición de humedad del suelo. De una serie de aproximadamente 8 capas de información como son: precipitación, escurrimientos, almacenamientos en cuerpo de agua (presas, lagos y lagunas), temperatura, índice de salud vegetal, humedad de suelo, índice de sequías de Palmer, Índice Estandarizado de Precipitación; la más subjetiva en su determinación es la de humedad de suelo. Fundamentalmente porque existe poca cobertura en redes de observación a nivel nacional que consideren la apropiada instrumentación para la correcta observación de la humedad del suelo. Derivado de esta falta de información oportuna a nivel superficial, resulta conveniente explorar la factibilidad de utilizar a la percepción remota satelital para la estimación de la humedad de suelo.

La variabilidad en la humedad del suelo es principalmente gobernada por diferentes tasas de evaporación y de lluvia. La importancia de estimar la humedad del suelo hasta la zona de raíz es fundamental para mejorar la modelación meteorológica de corto y mediano plazos, modelación hidrológica, monitoreo del crecimiento de plantas, entre otros.

El contenido de agua en el suelo está directamente relacionado con el tiempo y el clima, esto es debido a que la humedad del suelo es factor principal para controlar el intercambio de agua y energía entre la tierra y la atmósfera. La humedad del suelo está ligada a la evaporación por lo tanto ligada al flujo de calor de la tierra a la atmósfera tal que las áreas con alta humedad de suelo no solo elevan la humedad a la atmósfera sin que también reduce la temperatura localmente.

"2015, Año del Generalísimo José María Morelos y Pavón"

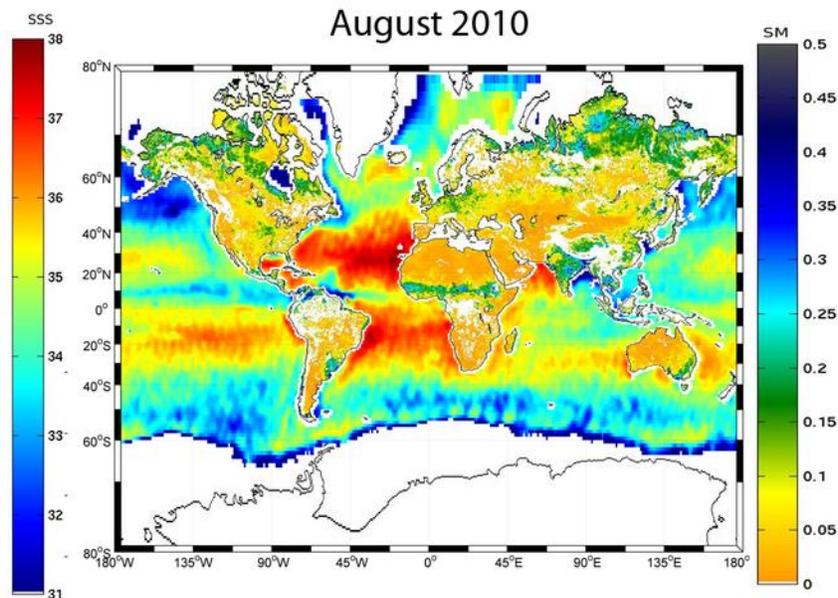


Figura 1. Mapa integrado de humedad de suelo y salinidad. Fuente: European Space Agency:
http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2010/10/First_global_map_of_soil_moisture_and_ocean_salinity

Las plataformas satelitales brindan en la actualidad información muy precisa sobre la estimación de algunas variables que se encuentran en la superficie terrestre. Entre ellos está la humedad y temperatura del suelo, variables muy importantes para aplicaciones tecnológicas de precisión como en la actualidad se requiere, y el caso más directo es el sector agrícola. Un factor asociado es el del monitor de sequías.

Como un proyecto de desarrollo de capacidades dentro del IMTA se consideró; en primer lugar, explorar sobre el uso de las plataformas satelitales y su disponibilidad para fines operativos, considerando la posibilidad de una segunda etapa en donde se propondría la implementación de un sistema de consulta de humedad del suelo para su directa incorporación a la elaboración del Monitor de Sequías de México.

La humedad de suelo se puede definir como el agua contenida en la parte no saturada del suelo (i.e entre la superficie del suelo y el nivel del agua subterránea). La condición de la humedad de suelo es esencial para estudios de cambio climático y para estudios de balances hídricos. La estimación de la humedad del suelo es importante para el manejo de los recursos hídricos y para aplicaciones meteorológicas y agrícolas (Malik et al, 2014; Verhoest et al., 2008)

“2015, Año del Generalísimo José María Morelos y Pavón”

La humedad del suelo ha sido reconocida como una variable fundamental para una variedad de estudios de tipo ambiental, incluyendo aquellos en meteorología, hidrología, agricultura y cambio climático.

En la actualidad las observaciones directas de la humedad del suelo están restringidas a mediciones discretas de lugares específicos donde estas observaciones no representan la distribución espacial, lo anterior es debido a que las características de la humedad y su clasificación en contenido húmedo varían de un punto a otro.

Por otra parte, el desarrollo en tecnología satelital particularmente en la percepción remota ha permitido también el desarrollo de metodologías para la estimación de la humedad del suelo. Un número de investigadores han mostrado que la humedad del suelo puede ser medida mediante técnicas infrarrojas y ópticas de percepción remota, así como percepción activa y pasiva por microondas. La diferencia entre éstas técnicas es la región de la longitud de onda dentro del espectro electromagnético. La fuente de este espectro es medido por el sensor y su parámetro es estimado mediante la relación física entre la respuesta y su contenido de humedad (Wang y Qu, 2009; Njoku et al., 2003).

Dentro de las técnicas más utilizadas, existen cinco que fundamentan su utilidad en el espectro electromagnético donde nuevas tecnologías han ocurrido: Reflectometría en el dominio del tiempo (TDR por sus siglas en inglés), capacitancia, radar con penetración en el suelo (GPR por sus siglas en inglés), radar o microondas remoto activo y microondas pasivo. La Tabla 1 describe en forma general las características de cada una de estas cinco grandes clasificaciones.

Tabla 1. Resumen de técnicas de percepción remota para estimación de humedad del suelo. (Ling y Qu, 2009)

Espectro	Propiedades observadas	ventajas	Limitaciones
Óptico	Reflexión del suelo	Resolución espacial fina, amplia cobertura	Limitada penetración superficial, contaminación por nubes, muchas otras fuentes de ruido
Térmico infrarrojo	Temperatura en superficie	Resolución espacial fina, amplia cobertura física bien entendida	Limitada penetración superficial, contaminación nubosa por condiciones meteorológicas y

“2015, Año del Generalísimo José María Morelos y Pavón”

				vegetación
Microondas	Pasivo	Temperatura de brillantez, propiedades dieléctricas, temperatura del suelo	Poco ruido atmosférico, moderada penetración en la superficie. Física bien entendida.	Baja resolución espacial. Perturbado por la superficie, rugosidad y vegetación.
	activo	Coefficiente de retrodispersión (backscatter). Propiedades dieléctricas	Poco ruido atmosférico. Moderada penetración en la superficie, alta resolución espacial. Física bien entendida.	Barrido limitado por la rugosidad de la superficie y vegetación

Sin embargo, de todas estas técnicas y sus respectivas metodologías para la estimación de la humedad del suelo, solamente un par de ellas son las que pueden estar disponibles para fines operativos. Como se mencionó en párrafos anteriores, una característica principal es la disponibilidad de esta información pues es un insumo, quizás de los más importantes, para la elaboración del Monitor de Sequías que en la actualidad se produce de manera quincenal, pero uno de los planes a mediano plazo es su producción semanal, lo que implica que la disponibilidad de la información casi debe ser a tiempo real y por lo tanto es necesario explorar más sobre las plataformas satelitales.

De la búsqueda que se realizó durante este proyecto, fundamentalmente se identificaron dos plataformas: i) El satélite Soil Moisture Active Passive (SMAP) de reciente puesto en órbita por la NASA y operado por el Jet Propulsion Laboratory (JPL); y ii) el satélite Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS) con puesto en órbita desde 2009, lanzado por la Agencia Espacial Europea, y que con el cual en este proyecto se realizó la primera estimación mensual de humedad de suelo para México.

Existen otras fuentes y metodologías aplicadas a la estimación de humedad de suelo utilizando información satelital. Una plataforma que también se utiliza para éste fin es el Escaneo Radiométrico Avanzado por Microondas de la NASA (AMSR-E) por sus siglas en inglés. El AMSR-E se lanzó en el 2002 a bordo del satélite NASA EOS Aqua para proporcionar mediciones de variables terrestres, oceánicas y atmosféricas para la investigación de los ciclos del agua y de energía (Njoku et al, 2003). Aqua sigue una órbita sun-síncrona que atraviesa la franja ecuatorial aproximadamente a las 1330 LST y completa una cobertura completa cada 2-3 días. AMSR-E mide la temperatura de brillantez (brightness temperature) en seis frecuencias: 6.92, 10.65, 18.7, 23.8 36.5 y 89.0 GHz, con polarizaciones verticales y horizontales en cada frecuencia. Con un ángulo de incidencia fija de 54.8° y una altitud de 705km. Sin embargo, la disponibilidad de las imágenes de satélite, para este proyecto, fue una limitante importante.

II. Análisis de las plataformas satelitales disponibles para la estimación de humedad del suelo.

II.I Satélite SMAP

Una plataforma satelital reciente que fue lanzada al espacio y que a la fecha se encuentra en pruebas finales operativas es el Soil Moisture Active Passive (SMAP) cuyos objetivos fundamentales son los de estimar la humedad del suelo y congelamiento o descongelamiento en las mismas áreas que son muestreadas (Entekhabi et al, 2014). La humedad del suelo se estima mediante una combinación de mediciones de radiómetro y radar. Esta combinación de instrumentos permite obtener una alta precisión y por lo tanto una alta resolución en los mapas globales. El radar envía pulsos de ondas de radio a un punto (spot) sobre la Tierra y registra el eco que se regresa unos cuantos microsegundos después. La potencia y la onda de los ecos se pueden interpretar para indicar el nivel de la humedad del suelo, aún bajo la presencia de niveles moderados de vegetación. Puesto que el radar activamente envía y recibe las señales de radio, esta es la razón por la que se le denomina “Active”. Por otra parte, el radiómetro detecta ondas de radio que son emitidas por el terreno desde esa misma área pequeña. La potencia de la emisión es un indicador de la temperatura del terreno de ese lugar atenuada un poco por la profundidad óptica de la atmósfera. Debido a que el radiómetro “pasivamente” realiza estas mediciones así es como el acrónimo de SMAP se origina.

Con el objeto de contar con una amplia cobertura en la superficie terrestre, la antena gira a 14.6 revoluciones por minuto (una revolución cada 4 segundos). El movimiento orbital del SMAP combinado con el giro de la antena realiza un barrido de un campo de vista angosto que en una serie de “loops” que se sobreponen y crean un barrido más amplio para crear una franja de 1000 km de ancho. Esta cobertura permite al SMAP hacer mapas completos de humedad de suelo sobre la Tierra repetidamente cada 2 a tres días. Los mapas de humedad de suelo serán espaciados a 10 km.

Mediante una colaboración con el Instituto de Ingeniería de la UNAM, el IMTA participa en la calibración del satélite SMAP. En México existen dos sitios experimentales para la calibración del SMAP, uno de ellos ubicado en Villahermosa, Tab., donde se han extraído datos de humedad de suelo de aproximadamente 22 sitios, cercanos entre ellos, con el objeto de contribuir a la calibración de los sensores pues estos datos son compartidos con el JPL/NASA donde en una colaboración más continua se propone que en el año 2016 sea exclusivamente el IMTA quien se encargue de la operación de dicho sitio.

“2015, Año del Generalísimo José María Morelos y Pavón”

Por tal motivo, se realizó una visita de mantenimiento a los sitios donde se mide la humedad del suelo en forma semanal, para ello una persona originaria de esa región se encarga de supervisar y extraer la información de los sitios. Durante la semana del 23 al 26 de junio del presente año se visitaron todos los sitios que se encuentran referidos en la Tabla 2.

Tabla 2. Sitios de muestreo de humedad del suelo para calibración del satélite SMAP.

Nombre del sitio	Coordenadas		Altitud (snmm)
	Lat. (N)	Lon. (W)	
San Francisco No. 1	17° 55' 40.3"	92° 48' 42.4"	3
San Francisco No. 2	17° 55' 44.4"	92° 48' 59.8"	3
Miraflores 1 No. 3	17° 54' 35.2"	92° 46' 0.8"	3
Los Tintos	17° 56' 23"	92° 48' 56.9"	3
Coronel Traconi 1 No. 5	17° 56' 44.9"	92° 49' 43.0"	3
Coronel Traconi 2 No. 6	17° 57' 34.9"	92° 49' 45.8"	3
El Carmen No. 7	17° 56' 34.4"	92° 46' 19.1"	3
Lechugal No. 08	17° 53' 0.0"	92° 49' 43.1"	3
El Dorado No.9	17° 51' 35.8"	92° 50' 14.5"	3
HP No. 15	17° 58' 34.6"	92° 47' 45.0"	3
Miraflores 2 No. 16	17° 53' 34"	92° 45' 51.9"	3
Aquiles Serdán No. 17	17° 49' 32.3"	92° 46' 34.2"	3
El Barrial No. 18	17° 50' 33.4"	92° 43' 55.4"	3
Lomas Vidal No. 20	17° 49' 45.0"	92° 49' 43.0"	3
Mérida No. 22	17° 49' 27.7"	92° 48' 52.9"	3
Zapotillo No. 24	17° 53' 28.4"	92° 47' 40.5"	3
Los Mangos No. 29	17° 55' 50.5"	92° 48' 45.5"	3
Portón Rojo No. 30	17° 56' 1.4"	92° 48' 19.5"	3
Los Cocos No. 31	17° 55' 17.2"	92° 40' 9.0"	3

"2015, Año del Generalísimo José María Morelos y Pavón"

Los Viveros No. 35	17° 55'1.4"	92° 48'19.5"	3
--------------------	-------------	--------------	---

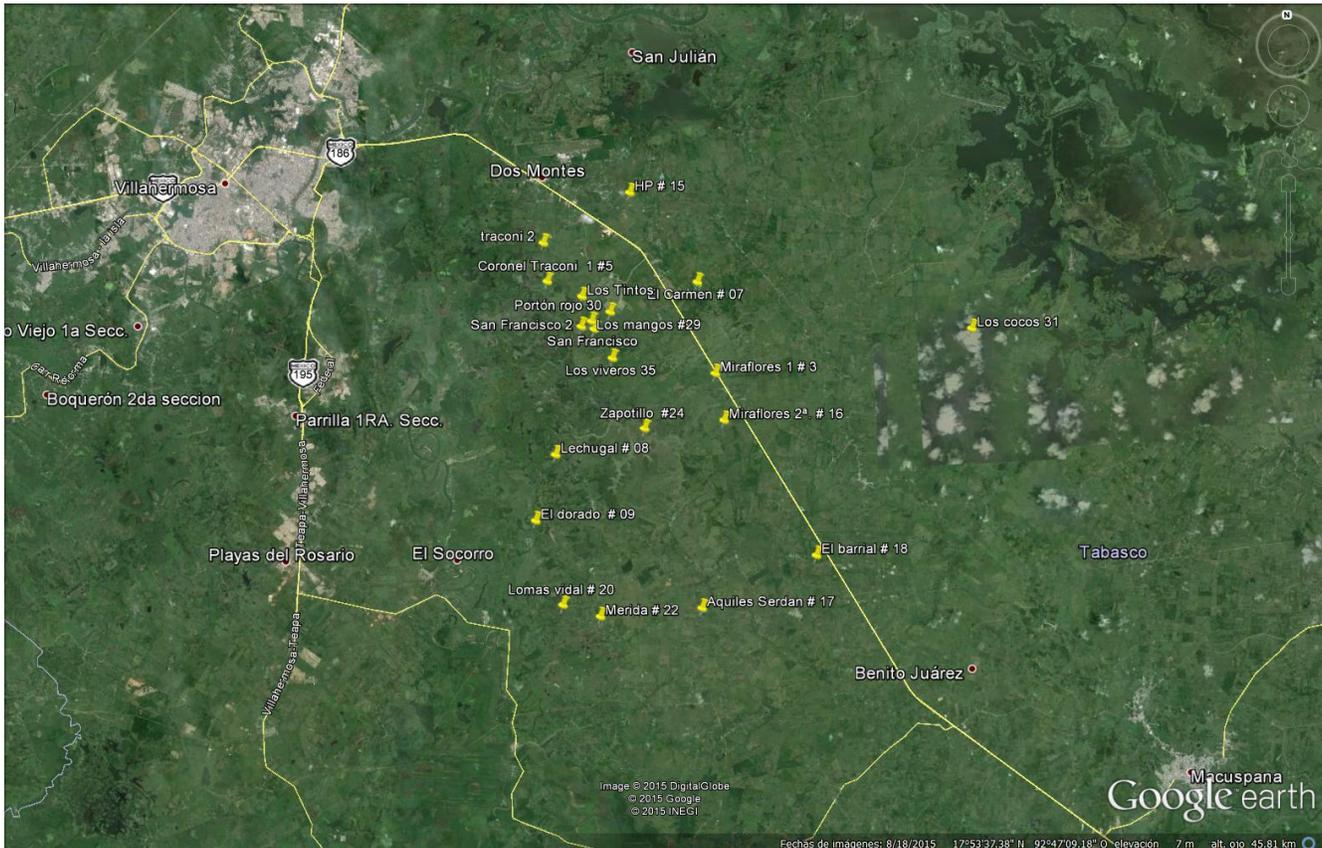


Figura 2. Ubicación de los sitios de muestreo referidos en la Tabla 1.

Los datos han sido enviados al grupo de trabajo de calibración del satélite SMAP, aunque existen resultados muy buenos en la correlación entre lo estimado por el satélite y observado en este sitio experimental. Los datos una vez verificados se podrán disponer y hacer públicos ya sea para investigación u otros usos. A continuación se muestra una gráfica de humedad de suelo para el sitio San Francisco 1, muestra tomada el 28 de noviembre de 2015.

"2015, Año del Generalísimo José María Morelos y Pavón"

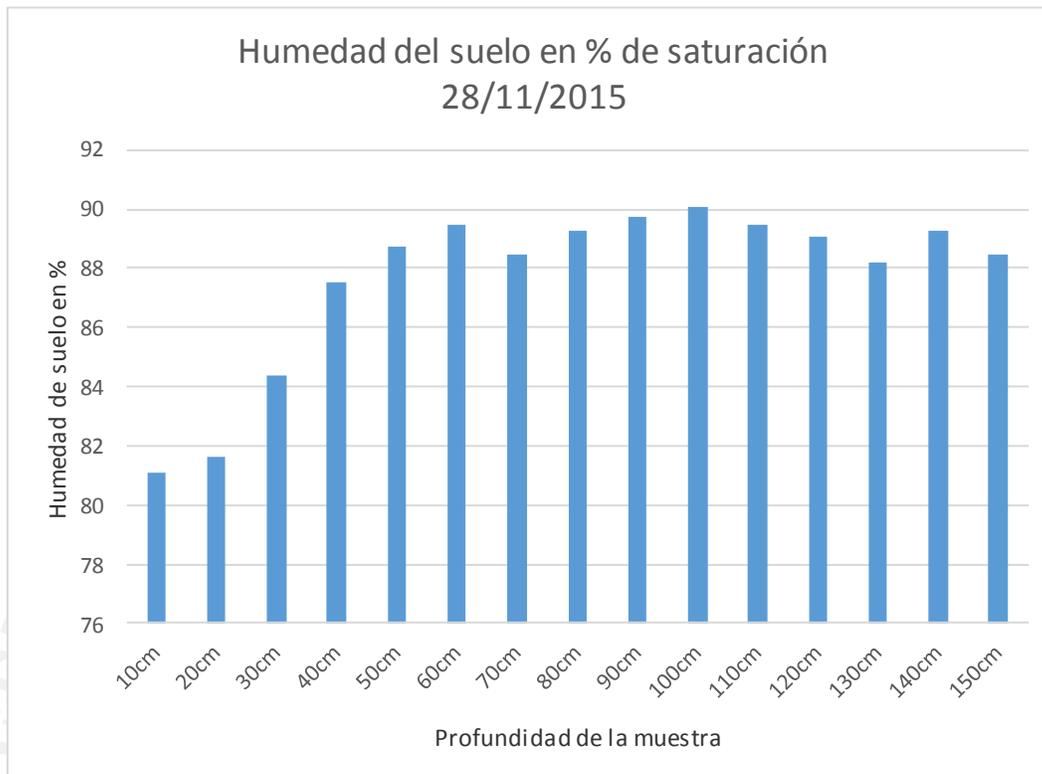


Figura 3. Contenido de humedad del suelo en porcentaje de saturación para el sitio San Francisco 1 registrada el 28 de noviembre del 2015.

II.II Satélite SMOS

Satélite de la Agencia Espacial Europea (ESA por sus siglas en inglés) Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS) es una misión dedicada a realizar observaciones globales de humedad del suelo sobre tierra y salinidad sobre los océanos. Mediante consistentemente mapeando estas dos importantes componentes del ciclo hidrológico, SMOS avanza en el entendimiento de los procesos de intercambio entre la superficie de la tierra y la atmósfera, además de ayudar a mejorar los modelos climáticos y meteorológicos. Fue lanzado al espacio el 2 de noviembre del 2009. El proyecto SMOS cuenta con una página de Internet cuya liga es la siguiente:

http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/SMOS/Introducing_SMOS

Para medir humedad de suelo y salinidad en el océano, el satélite SMOS lleva un radiómetro interferométrico en 2D con síntesis de apertura (MIRAS por sus siglas en inglés) que opera

“2015, Año del Generalísimo José María Morelos y Pavón”

en el rango de las microondas de la banda L con longitud de onda 1.4GHz o 21cm (que captura valores de temperatura de brillantez). Estas imágenes se utilizan para obtener mapas de humedad de suelo cada tres días, alcanzando una precisión de 4% a una resolución espacial de 50Km. En los océanos los mapas del SMOS de salinidad registran valores tan bajos como 0.1 Practical Salinity Units (PSU). En su órbita vuela a una altitud media de 758km y una inclinación de 98.44°. Esta misión es controlada por la Agencia Espacial de Francia con estaciones terrenas en Toulouse, Francia para recibir y transmitir datos, además de utilizar otras estaciones para telecomando en Kiruna, Suecia, Aussaguel (Francia) y Kourou (Guyana Francesa).

El principio de la detección de estas dos variables se basa en el contraste entre las propiedades electromagnéticas del agua líquida y suelo seco, así como agua pura y agua salina.

Previo al uso de esta información se requieren realizar un número de pasos o etapas previas para que estas primeras observaciones tengan la utilidad que se requiere. Dos etapas en el proceso son fundamentales, operación del satélite y recepción de datos; así como procesamiento y almacenamiento. La Agencia Espacial Francesa opera el satélite, mientras que la Agencia Espacial Europea (ESA por sus siglas en inglés) coordina la misión y segmentos de operación en tierra. Una vez que los datos llegan al Segmento en Tierra de Procesamiento de Datos (DPGS por sus siglas en inglés) son calibrados, procesados, almacenados y diseminados a los usuarios. Existen dos procesos paralelos para la distribución de la información dependiendo si son objetivos de investigación o productos operativos a tiempo real. Los datos son disponibles sin cargo alguno para usuarios científicos o de uso no comercial.

Los datos que SMOS puede proporcionar son de los siguientes tipos:

- a) Datos crudos (raw), son datos en su formato original (formato CCSDS) que comprende datos de los instrumentos de observación, mantenimiento de la telemetría tal y como son recibidos por el satélite.
- b) Nivel-0, Datos con información adicional sobre los encabezados, ordenados en forma cronológica.
- c) Nivel-1a, datos reformateados y calibrados en unidades de ingeniería. Estos productos están físicamente consolidados en segmentos basados en el tiempo de polo a polo. Este tipo de datos son llamados “Visibilidades Calibradas”
- d) Nivel-1b, son los datos de salida de la reconstrucción de la imagen de las mediciones del SMOS y consisten en componentes de Fourier de temperatura de brillantez en el marco de referencia de polarización de la antena.

“2015, Año del Generalísimo José María Morelos y Pavón”

- e) Nivel-1c. Puesto que los productos del nivel-1b están arreglados como “snapshots” y no arreglados geográficamente, los productos del nivel-1c son reprocesados y se arreglan geográficamente, lo que es un mapa de barrido (swath) de la temperatura de brillantez.
- f) Nivel-2, los productos están separados en dos tipos y fueron los que se utilizaron en este proyecto:
- Mapas de barrido (swath) de humedad de suelo.
 - Mapas de barrido (swath) de salinidad del océano

Fuente: SMOS: La misión del agua de la ESA. Texto disponible en línea.

Validación de los datos del SMOS

La radiación emitida por la Tierra y observada por los sensores del SMOS es una función de la humedad del suelo y salinidad del océano. Por ello es necesario asegurar que los datos observados sean correctamente convertidos en unidades de humedad y salinidad pues existen otros factores que pueden influir en la calidad de la señal y que es necesario considerar, tanto la profundidad óptica en la atmósfera como la capa límite planetaria contienen elementos que interfieren en cierta medida con la emisión de las correspondientes longitudes de onda.

La señal observada por el SMOS puede ser perturbada por la presencia de una serie de diferentes variables biofísicas y geofísicas diferentes al objetivo primario. Aspectos como condición de vegetación, atenuación atmosférica por humedad, etc., y la temperatura física del suelo y océano también son relevantes. Es por esta razón que grupos especializados constantemente se encuentran calibrando estos valores bajo diferentes condiciones geográficas y topográficas. A raíz de este esfuerzo, el primer mapa global que fue integrado, se realizó en octubre del 2010. Un mapa que por primera ocasión integra humedad de suelo con salinidad oceánica.

Con el objeto de obtener las imágenes de humedad del suelo del SMOS, fue necesario elaborar un protocolo de investigación y enviado a la ESA, una vez aprobado enviaron códigos de acceso y es como se han obtenido las imágenes correspondientes de los barridos efectuados por el satélite a partir del mes de julio del presente año a la fecha. Es necesario mencionar que estas imágenes requieren un procesamiento posterior pues es necesario “empatarlas” pues en sus barridos solamente cubren una porción del territorio nacional. La Figura 4 muestra un ejemplo de imagen del SMOS para humedad del suelo obtenida en el mes de abril donde se puede observar la condición de humedad a partir del color verde con contraste de suelo seco en color amarillo y naranja.

“2015, Año del Generalísimo José María Morelos y Pavón”

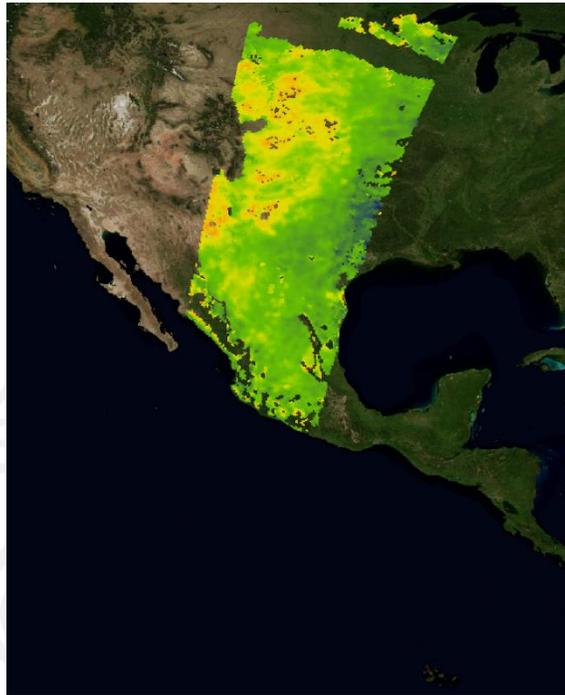


Figura 4. Barrido del satélite SMOS mostrando las mediciones de humedad del suelo, fecha 23 de marzo de 2015

A manera de prueba, como una acción única, quedando pendiente de replicarse con el apoyo de un prestador de servicios. Se emparejaron cuatro barridos del SMOS para completar una imagen para nuestro país (Figura 5). Esta acción se realizó con la ayuda de software especializado para SIG's, se convirtió a formato raster y una vez así se emparejaron las imágenes respectivas. Se utiliza el término emparejar más que juntar para enfatizar el acoplamiento del mismo en forma horizontal en lugar de apilarlas como capas y “layers” que regularmente se utilizan en este tipo de manejo de imágenes. El proceso de empareje requiere de un tiempo razonable de una persona pues esto implica extraer la información de la base de datos en donde la ESA deposita todos y cada uno de los barridos, que posteriormente en un proceso de revisar cada uno de estos barridos hasta determinar cuál de estos pasa por nuestro país, y finalmente hacer el procesamiento del empareje de imágenes.

"2015, Año del Generalísimo José María Morelos y Pavón"

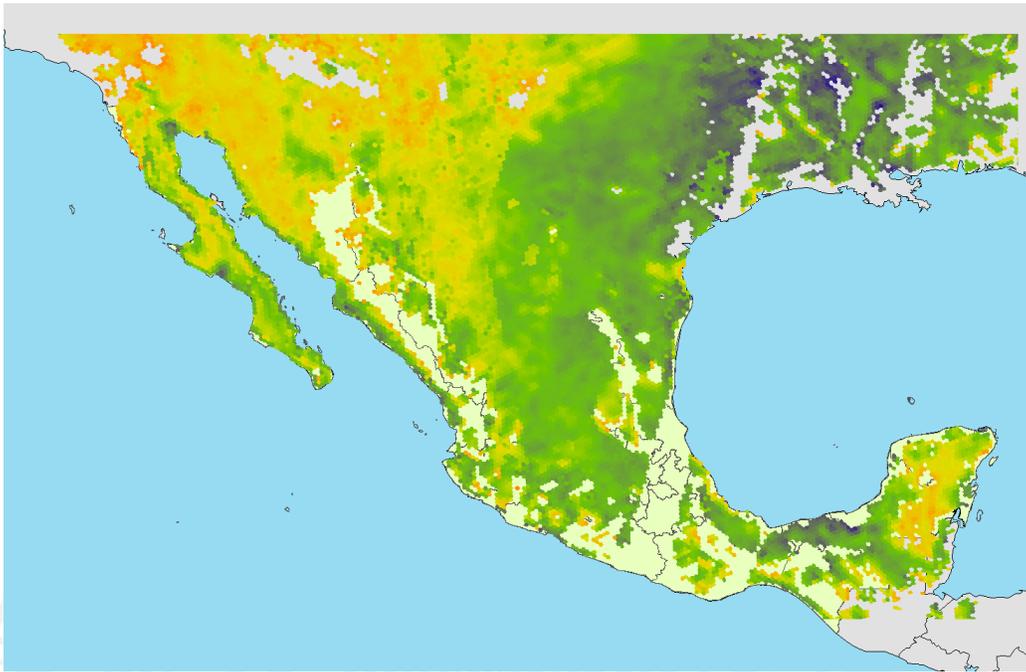


Figura 5. Imagen de humedad de suelo obtenida de los barridos del SMOS (primer intento)

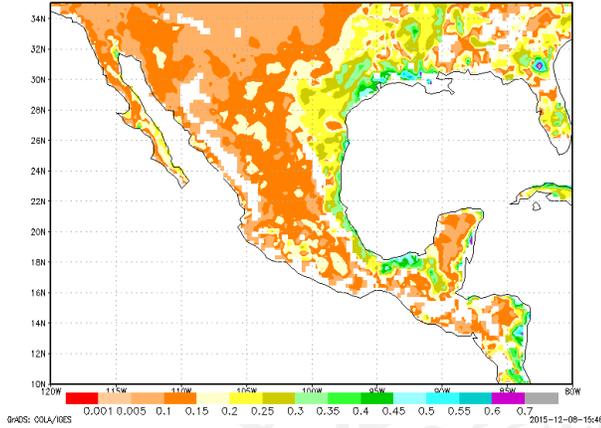
Por otra parte, el Centro Experto de Barcelona (SMOS-BEC por sus siglas en inglés) de la Universidad Politécnica de Catalunya realiza el procesamiento de imágenes para la calibración radiométrica (4)], dentro de los objetivos del BEC está: 1) Contribuir en la mejora de los algoritmos del SMOS en el marco de validación de SMOS y el equipo de recuperación de datos coordinados por la ESA; y 2) Realizar actividades de calibración y validación coordinados por la ESA.

BEC tiene las mismas imágenes que registra el SMOS, únicamente que realiza análisis posteriores, una sección interesante es que ellos realizan empates de imágenes para diferentes períodos de tiempo, desde tres días hasta un mes. De la misma manera que la ESA, el BEC requiere que para disponer de esta información es necesario establecer un protocolo de trabajo, así como solicitar su registro para definir el uso que se le dará a esta información, la justificación se estableció en función de las actividades de investigación que se sigue en el presente proyecto.

A continuación se presentan las imágenes de estimación de humedad media del suelo correspondientes para los meses de enero a noviembre del 2015 en órbita ascendente (Figura 6).

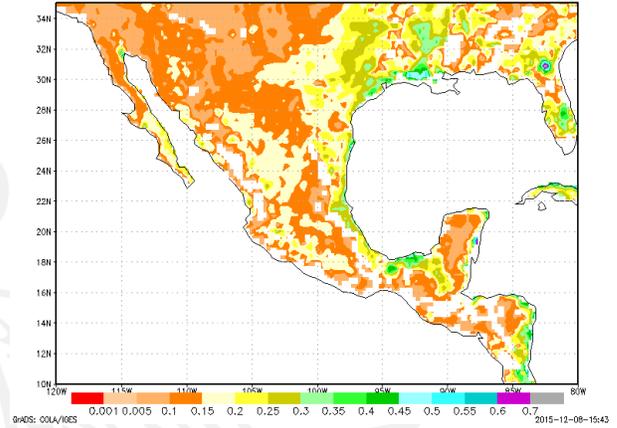
"2015, Año del Generalísimo José María Morelos y Pavón"

SMOS Humedad de Suelo, enero 2015 (m³/m³)



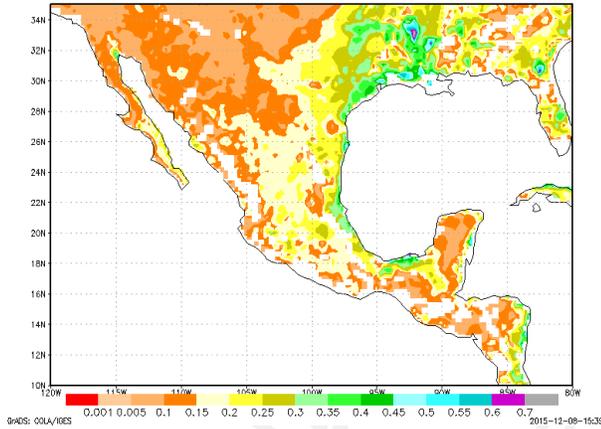
a)

SMOS Humedad de Suelo, febrero 2015 (m³/m³)



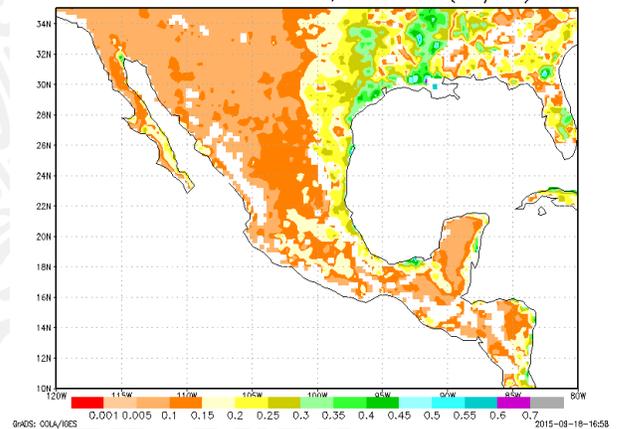
c)

SMOS Humedad de Suelo, marzo 2015 (m³/m³)



b)

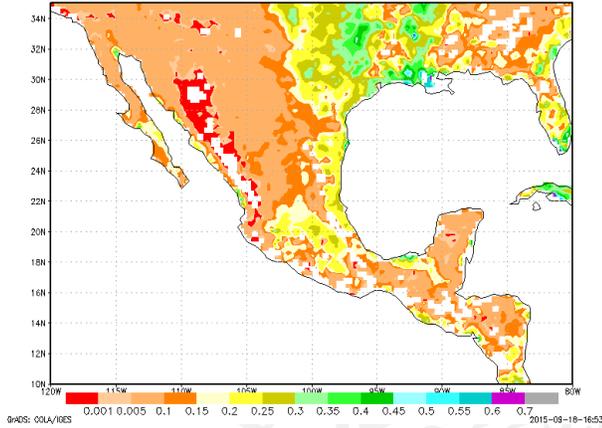
SMOS Humedad de Suelo, abril 2015 (m³/m³)



d)

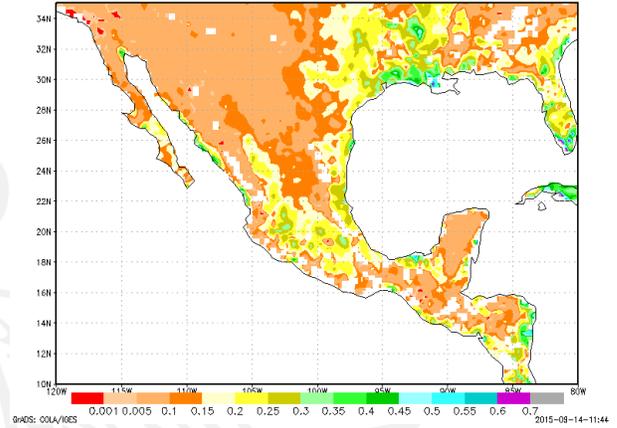
"2015, Año del Generalísimo José María Morelos y Pavón"

SMOS Humedad de Suelo, mayo 2015 (m³/m³)



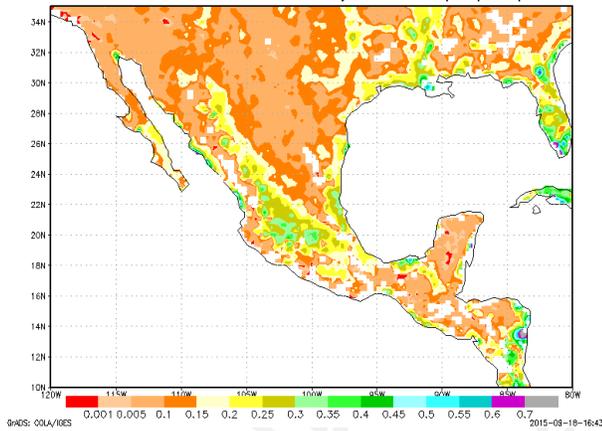
e)

SMOS Humedad de Suelo, junio 2015 (m³/m³)



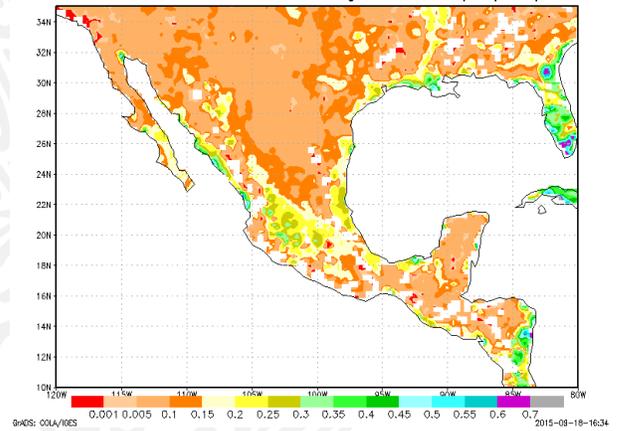
g)

SMOS Humedad de Suelo, julio 2015 (m³/m³)



f)

SMOS Humedad de Suelo, agosto 2015 (m³/m³)



h)

"2015, Año del Generalísimo José María Morelos y Pavón"

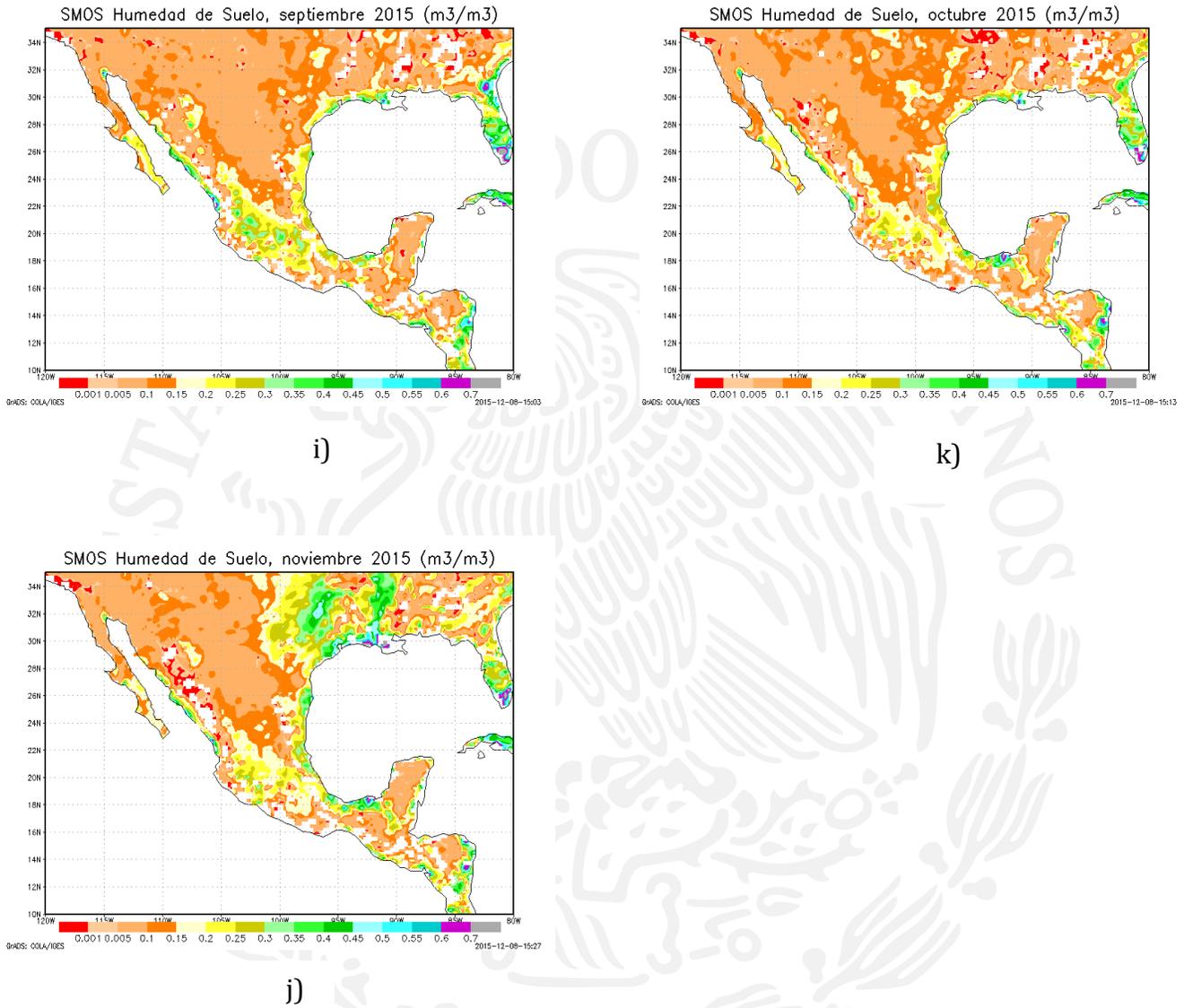


Figura 6. Estimación mensual de humedad del suelo para los meses de: a) enero, b) febrero, c) marzo, d) abril, e) mayo, f) junio, g) julio, h) agosto, i) septiembre, j) octubre y k) noviembre

III. Obtención de datos de humedad del suelo estimada por modelaje y publicada en el GLDAS, comparación con datos observados

La humedad del suelo estimada a través de plataformas satelitales es una realidad, como se mencionó anteriormente, el tema es si estas estimaciones se pueden considerar como un insumo regular para la elaboración del Monitor de Sequías. En el afán de esta búsqueda de avances científicos para fines de estimación de humedad del suelo, existe otra disciplina que utiliza la modelación hidrológica de la que existen metodologías que van desde modelos numéricos muy básicos que consideran solamente la parte conceptual de los procesos físicos sin entrar en la sofisticación matemática para representarlos, tal como el modelo hidrológico Sacramento (Sac-Model) que por muchos años ha sido el modelo operativo utilizado por los Centros de Pronóstico de Ríos (RFC por sus siglas en inglés) de los Estados Unidos de Norteamérica; hasta modelos numéricos complejos donde se integran los procesos que ocurren en el subsuelo-suelo-superficie del terreno-vegetación y atmósfera, algunos hasta incorporan la interacción con los océanos para representar de forma completa el ciclo hidrológico, como ejemplos de éstos son los modelos NOAH y VIC. Incorporados dentro de un esquema operativo Sistema Global de Asimilación de Datos de Superficie (GLDAS por sus siglas en inglés), a continuación se describen sus características principales y con uno de los cuales se realiza una climatología mensual que se considera como la primera en el país de esta variable.

GLDAS es un sistema de asimilación de datos terrestres de tipo global, es administrado por la NASA. En este sitio es donde se dispone de los resultados de los modelos NOAH y VIC. El sistema GLDAS maneja varios modelos de superficie, asimilando productos de satélite y una inmensa cantidad de observaciones en superficie, para generar campos óptimos de estados y flujos de tierra (Rodell et al. 2004).

Existen las versiones GLDAS-1 y GLDAS-2, y de esta última hay 2 componentes 2.0, con el forzamiento de Princeton, (datos de 1948 a 2010) y la 2.1, con forzamiento con modelos y observaciones (datos de 2000 a la fecha). Los productos de la versión 2.1 todavía no están disponibles en línea. GLDAS-1 incluye, entre otros, los modelos de superficie NOAH y VIC. GLDAS-2 no incluye al modelo VIC.

El modelo NOAH es un esfuerzo de investigadores de varias instituciones: **N**ational Centers for Environmental Prediction, **O**regon State University, **A**ir Force y el **H**ydrologic Research Lab, e integra las ecuaciones que gobiernan el medio en el manto suelo-vegetación-nieve (Chen et al. 2013).

"2015, Año del Generalísimo José María Morelos y Pavón"

Por su parte, el VIC es un modelo de **Capacidad de Infiltración Variable** (por sus siglas en inglés), desarrollada y mantenida en la Universidad de Washington (Liang et al. 1994).

La resolución temporal de los productos es de 3 horas, pero también hay productos mensuales, que se obtienen con los promedios de productos tri-horarios. Para el modelo NOAH existen productos en resoluciones espaciales de 1° y 0.25°. Para el modelo VIC, solamente de 1°.

De toda la información disponible de estos modelos, en total son 28 variables para el modelo NOAH y 17 variables para el modelo VIC, las variables seleccionadas para este estudio son la humedad y temperatura del suelo para la capa más superficial del modelo NOAH 2.0, y la capa más parecida a esta en los modelos NOAH 1.0 y VIC, en éste último solamente humedad del suelo. Los modelos de GLDAS-1 han usado diferentes conjuntos de datos para el forzamiento meteorológico, lo que ha provocado discontinuidades en 1993, 1995, y entre 1999 y 2001. Desde mediados del 2001 el forzamiento ha sido consistente e incluye observaciones precisas de precipitación y radiación solar. Este modelo es recomendable para periodos recientes (desde 2002) y con actualización entre 1 y 2 meses del tiempo actual.

Por otra parte, los modelos de GLDAS-2 usan el forzamiento de Princeton desde 1948. Es recomendable mejor para estudios en periodos largos y sin requerimientos exigentes de actualización.

La siguiente figura muestra los periodos cubiertos por la información disponible en línea de los modelos NOAH y VIC. Para los propósitos del presente estudio, se trabajó con la información de promedios mensuales. Se descargaron las mallas mensuales con mejor resolución para los 3 casos.

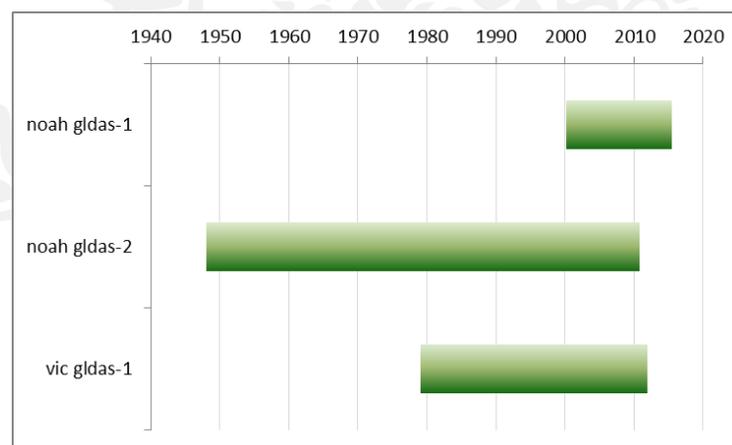


Figura 7 - Periodos cubiertos por modelos NOAH y VIC, con disponibilidad en línea a través del sistema GLDAS.

Con el objeto de construir las climatologías, fue necesario obtener del sitio GLDAS los datos respectivos a mínimo 30 años de datos, cumpliendo con esta restricción, excepto para el caso de los datos de NOAH-GLDAS 1, una limitante a considerar además fue la resolución espacial considerando que entre más fina, mejor. Como se puede observar, los datos de NOAH tienen la diferencia que GLDAS 1 tiene un período corto de 2000 a la fecha, por otra parte, GLDAS 2 aunque tiene datos que van desde 1948, éstos terminan en 2010. La Tabla 3 muestra el número de archivos descargados del sitio así como su resolución espacial y su formato.

Tabla 3 - Mallas descargadas del sitio de GLDAS. Nota en el nombre de archivo, *aaaa* indica el año y *mm* el mes.

Modelo	GLDAS	Resol.	Nombre de archivo	Número
NOAH	1.0	0.25	GLDAS_NOAH025_M.Aaaaamm.001.grb	183
NOAH	2.0	0.25	GLDAS_NOAH025_M.Aaaaamm.020.grb	756
VIC	1.0	1.00	GLDAS_VIC10_M.Aaaaamm.001.grb	386

Se extrajeron las porciones que cubren el sur de los Estados Unidos de América, México y Centroamérica, es decir, en el dominio:

- Longitud de 120°W a 80°W
- Latitud de 5°N a 35°N

La figura 2 muestra el área cubierta con este recorte. Cabe mencionar que los centros de los nodos se localizan en el centro del cuadro que representa. Para mallas con resolución de 0.25° el rango de longitud es de 120.125W a 79.875W y el de latitud es de 4.875N a 35.125N.

“2015, Año del Generalísimo José María Morelos y Pavón”

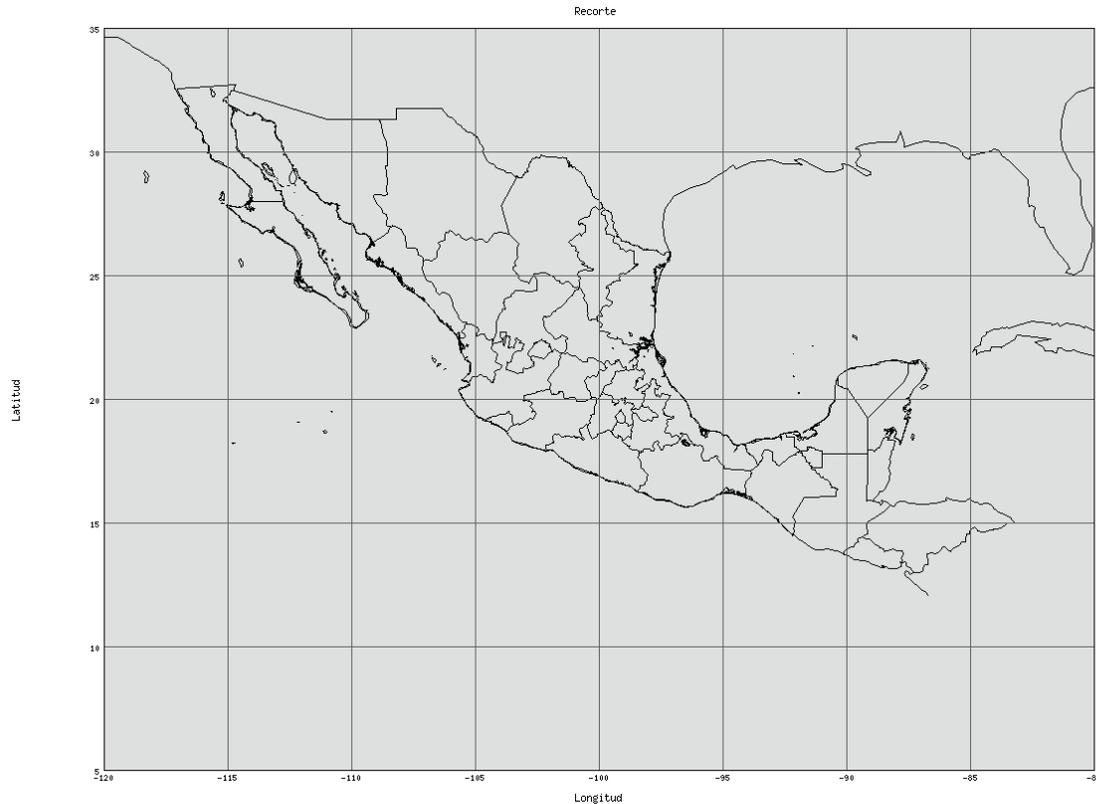


Figura 8 - Cobertura del área de interés. Nota: al momento de realizar la gráfica, no se contaba con información de contorno de algunos países centroamericanos.

Las mallas recortadas se almacenaron en formato de mallas GRD (el que usa Surfer, en modo texto). En los datos origen, las variables solamente tienen valores en tierra firme, y en océanos y mares toma un valor es muy negativo para indicar que no tiene significado o es **No Disponible**. En las mallas recortadas, se asignó el valor de -99999.9 para indicar **No Disponible**.

Tabla 4 - Mallas recortadas Nota: en el nombre de archivo, *aaa* indica el año y *mm* el mes.

Modelo	GLDAS	Resol.	Nombre de archivo	Variable
NOAH	1.0	0.25	n1-025- <i>aaaamm</i> -sm.grd	Humedad
			n1-025- <i>aaaamm</i> -st.grd	Temperatura
NOAH	2.0	0.25	n2-025- <i>aaaamm</i> -sm.grd	Humedad

"2015, Año del Generalísimo José María Morelos y Pavón"

			n2-025- <i>aaaamm</i> -st.grd	Temperatura
VIC	1.0	1.00	v1-100- <i>aaaamm</i> -sm.grd	Humedad

Por cada malla de origen existe la correspondiente recortada, pero un archivo por cada variable. La Figura 9 muestra los mapas de humedad del suelo para enero de 2005 con los tres modelos. Pueden apreciarse algunas diferencias entre los modelos NOAH-1 y NOAH-2, debido a que no corresponden exactamente al mismo nivel de capas, mientras que entre los modelos NOAH-2 y VIC-1 la resolución es importante.

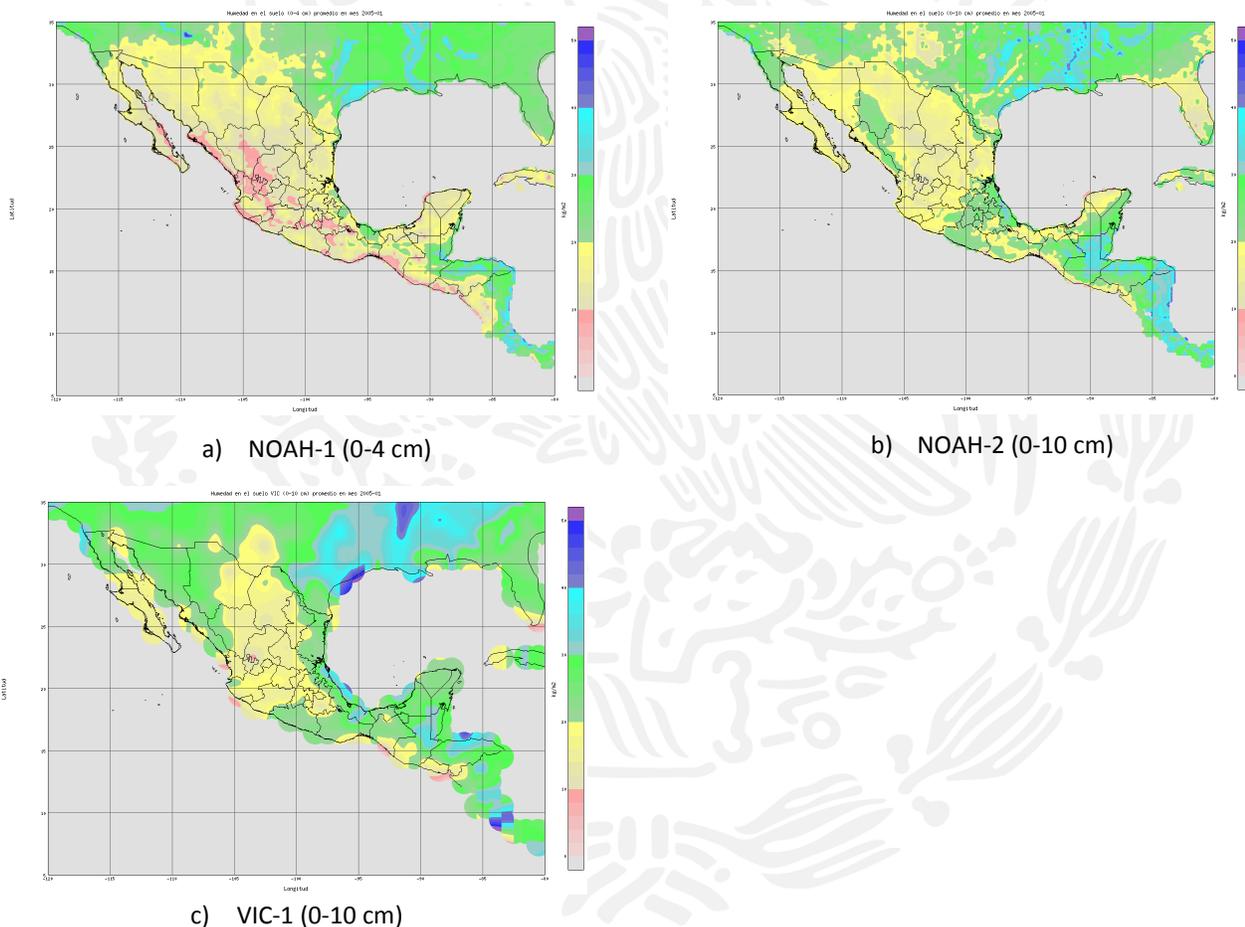


Figura 9 - Mapas de humedad de suelo para enero de 2005.

De los mapas generados con las mismas profundidades NOAH-2 y VIC-1 se aprecian diferencias en la distribución de los valores de humedad de suelo. Este factor obliga a corregir el sesgo del error con observaciones. Desafortunadamente el país no se cuenta con un número

regular de observaciones de humedad de suelo, que es un punto importante para la validación de este tipo de información que generan los modelos y cuya utilidad ha quedado de manifiesto para diversos usos y disciplinas.

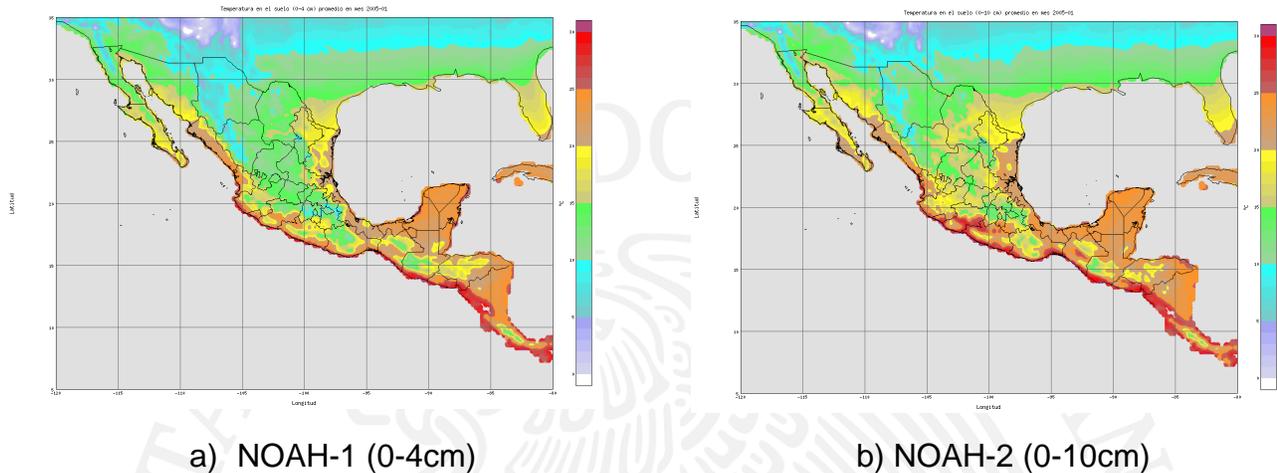


Figura 10 - Mapas de temperatura de suelo para enero de 2005.

Por otra parte, la Figura 10 muestra los mapas de temperatura del suelo para el mismo enero de 2005. El modelo VIC no cuenta con esta variable en sus salidas. Nótese que existe mayor parecido en la distribución de temperatura entre ambos modelos, que la presentada en el caso de humedad. Similar a la atmósfera, la solución numérica para temperatura es más estable, siendo un rasgo muy favorable para evaluación de parámetros que dependen de esta variable, así como también la evolución en el tiempo de ésta para fines de pronóstico.

a. Metodología de ajuste de estimación con valores observados

En México no se cuenta con un amplio historial de información relativa a la humedad y temperatura del suelo y subsuelo. Aunque en el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) se recopila la información de estaciones automáticas en sitios seleccionados por la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP), con base en el convenio CNA/CGSMN-CONANP-01-2013. La gran mayoría estaciones iniciaron su operación en el 2012 y el número de estas estaciones está lejos de ser el número óptimo para una representación espacial que cubra todo el país. La siguiente tabla muestra las estaciones de las que se cuenta información de temperatura y humedad del suelo.

“2015, Año del Generalísimo José María Morelos y Pavón”

Tabla 5 Estaciones EMA-ANP

Clave	Nombre	Longitud	Latitud
AG04	Sierra Fría, Ags.	-102.6086	22.2697
BC16	Constitución de 1857, B.C.	-115.9217	32.0419
BS13	Sierra La Laguna, B.C.S.	-109.9986	23.5553
BS14	Cabo Pulmo, B.C.S.	-109.4244	23.4450
CH48	Cumbres de Majalca, Chih.	-106.4858	28.8031
CH49	Janos, Chih.	-108.4272	30.8389
CL32	Ocampo, Coah.	-102.5250	28.8253
CM11	Los Petenes, Camp.	-90.3739	19.9433
CM12	Calakmul II, Camp.	-89.4619	18.0939
CO06	S. de Manantlán I, Col.	-103.9172	19.4633
CS50	La Encrucijada, Chis.	-92.7553	15.0683
CS54	C. Sumidero, Chis	-93.0950	16.8281
CS58	El Triunfo, Chis.	-92.8081	15.6564
CS60	Volcán Tacana, Chis.	-92.1472	15.0908
CS61	Lagunas de Montebello, Chis	-91.7300	16.1144
CS62	Montes Azules, Chis.	-91.5247	16.8119
DG13	La Michilia, Dgo.	-104.2469	23.3875
DG14	Mapimi, Dgo.	-103.7472	26.6864
GR21	Las Vigas, Gro.	-99.2336	16.7575
GR53	El Veladero, Gro.	-99.9072	16.8842
GT53	Sierra Gorda II, Gto.	-99.8314	21.3208
HI18	El Chico, Hgo.	-98.7161	20.1856
HI19	Los Mármoles, Hgo.	-99.2203	20.8733

"2015, Año del Generalísimo José María Morelos y Pavón"

Clave	Nombre	Longitud	Latitud
JA22	Chamela-Cuixmala, Jal.	-105.0447	19.4983
JA23	S. de Manantlán II, Jal.	-104.1481	19.5542
JA24	Nevado de Colima, Jal.	-103.5906	19.5919
JA25	La Primavera, Jal.	-103.6439	20.7261
MC36	Mariposa Monarca I, Mich	-100.2775	19.6708
MC37	Mariposa Monarca II, Mich.	-100.2900	19.5389
MO05	Sierra de Huautla, Mor.	-98.9361	18.5414
MO06	Lagunas de Zempoala, Mor	-99.3128	19.0533
MX43	Valle de Bravo, Mex.	-100.0847	19.3756
NL10	Cumbres de Monterrey I, N.L.	-100.3897	25.5597
NL11	Cumbres de Monterrey II, N.L.	-100.3083	25.4011
NY07	Marismas Nacionales, Nay.	-105.3306	22.2208
OX28	Benito Juárez, Oax.	-96.7400	17.1642
PU06	La Malinche II, Pue.	-98.0322	19.1408
PU07	Tehuacán, Pue.	-97.6169	18.3139
QO10	Sierra Gorda I, Qro.	-99.1692	21.4989
SL20	Gogorrón, S.L.P.	-100.9400	21.8111
SO22	El Pinacate , Son.	-113.3047	31.6800
TB20	Pantanos de Centla, Tab.	-92.6464	18.4061
TB21	C. Usumacinta, Tab.	-91.2289	17.2897
TL04	La Malinche I, Tlax.	-98.0442	19.2975
VR28	Los Tuxtlas II, Ver.	-94.9311	18.3750

Las observaciones se registran cada 10 minutos y se van almacenando en una base de datos casi en tiempo real. El SMN proporcionó la información disponible hasta agosto del presente

“2015, Año del Generalísimo José María Morelos y Pavón”

año. Ésta viene en hojas de cálculo por estación por trimestre, organizados en carpetas por año. Es evidente a partir de la Figura 11 que la porosidad de la información es un factor importante a considerar cuando se trata de verificar o calibrar modelos, como en este caso.

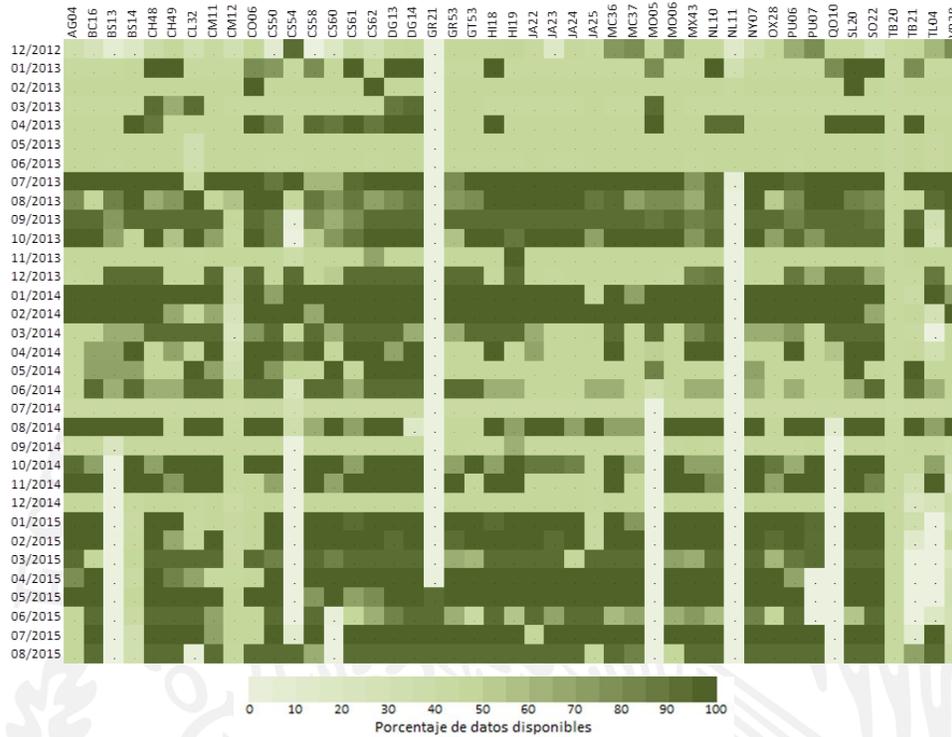


Figura 11 Porosidad de la información de la base de datos EMA-ANP.

En esta figura, se presenta una columna por cada estación, y un renglón por cada mes. La intensidad del color de cada cuadro es proporcional al porcentaje de registros disponibles del total de posibles en cada mes, es decir, los cuadros claros significan poca información (blanco indica sin datos) y los más oscuros indican el 100% de los registros posibles en el mes.

Se realizó una revisión preliminar de la información con el fin de detectar situaciones con observaciones de dudosa calidad. La Figura 12 muestra que existen dos estaciones con patrones fuera de las tendencias esperadas: “Sierra Gorda II, Gto.” (GT53) y “C. Usumacinta, Tab.” (TB21).

"2015, Año del Generalísimo José María Morelos y Pavón"

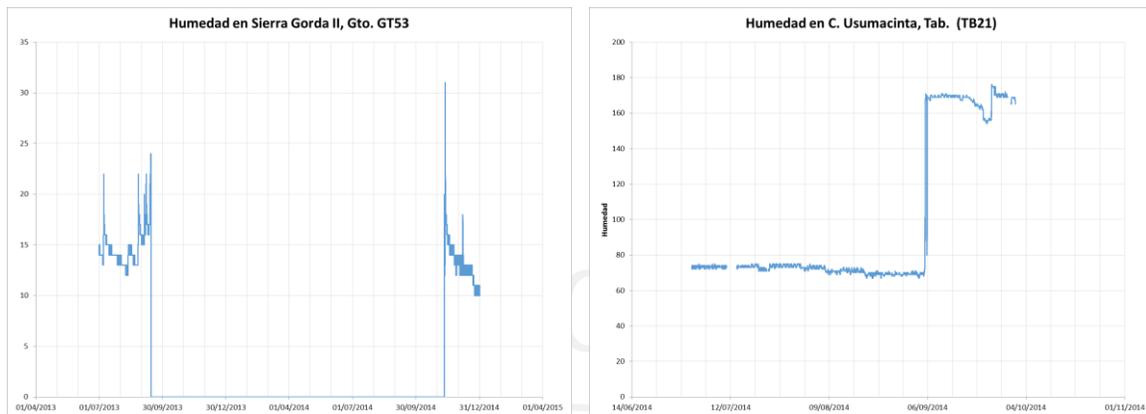


Figura 12 - Series de tiempo de humedad en las estaciones "Sierra Gorda II" y "C. Usumacinta".

En el primer caso, la serie de tiempo marca humedad cero en un periodo importante desde mediados de septiembre de 2013 hasta mediados de noviembre de 2014. Por otra parte, en Usumacinta salta abruptamente del orden de 70 a 170 a principios de septiembre de 2014. De acuerdo con la documentación del proveedor de los sensores de las estaciones (Stevens, 2006), la temperatura está en grados Celsius y la humedad en fracción de agua por volumen (o m^3/m^3). Debido a esto, valores de humedad mayores a 100 (por ciento) no tienen sentido, implicando con esto una falla en el funcionamiento del sensor o posiblemente el software correspondiente, los meses en donde se presenta esta situación se descartaron.

Como el objetivo del presente análisis es la comparación y ajuste de los modelos del GLDAS, en escala mensual, con esta información de las estaciones se procede al cálculo del promedio mensual. Es una práctica común recomendada para variables meteorológicas por la OMM considerar válido un promedio mensual solamente si se cuenta con por lo menos 20 días de información, es decir alrededor de las 2/3 partes del total. Siguiendo la misma regla para el total de registros diarios, se puede determinar el mínimo número de registros para considerar válido el promedio. Por otra parte, se cuenta con las mallas de los productos de los modelos GLDAS, y para la comparación con las observaciones es necesario realizar una interpolación en las ubicaciones de la estaciones, en cada una de las mallas.

Existe una variedad interesante de métodos de interpolación, lo más recomendable es utilizar aquel que cumpla con los requerimientos específicos del usuario; para este proyecto se determinó como primera opción al método de Bessel que ofrece una interpolación suave que pasa por los puntos base (Ferrante, 2012), y con el cual se pueden detectar topes y valles en puntos igualmente espaciados. Para utilizar el método de Bessel de orden 4 en 2 dimensiones, se interpola unidimensionalmente con cuatro columnas vecinas en los cuatro renglones vecinos.

Éste método requiere los 16 valores en los nodos de la malla, y desafortunadamente en nuestro caso no siempre se puede contar con todos, pues los nodos que se encuentran en el océano son "Sin dato". Para ofrecer una alternativa en estos casos, se aplican unas simplificaciones que, en muchos casos, implican extrapolación, y eventualmente pueden salir notablemente de la tendencia, además de presentar resultados que en ocasiones están fuera de toda realidad.

En razón a lo anterior, se optó por utilizar el método de Cressman (Cressman 1959) en las posiciones de cada estación, en cada una de las mallas. Éste método involucra un peso relacionado con la distancia a los puntos de la malla, por lo que es una interpolación "suavizada", pero se evitan las inestabilidades que pueden presentarse con otros métodos polinomiales, como el de Bessel.

Para efectos de verificación, de los modelos disponibles en el GLDAS, el único que tiene periodos en común con los datos de las estaciones EMAS-ANP, es el modelo NOAH-1. De esta información se obtuvo una serie de tiempo, con resolución mensual, de humedad y temperatura del modelo NOAH-1, para la ubicación de cada una de las estaciones, y éstas son comparables directamente con las observaciones.

b. Resultados del ajuste

Las unidades utilizadas en los modelos GLDAS son $[\text{kg m}^{-2}]$, que podrían considerarse prácticamente como $[\text{mm}]$ de agua. Para tener homogeneidad en unidades, se convierten considerando que esos milímetros de agua están localizados en la capa de 0 a 4 cm, es decir en 40 mm. Por lo tanto, dividiendo el valor de humedad en $[\text{kg m}^{-2}]$ entre 40 se obtiene una fracción de agua por volumen o $[\text{m}^3 \text{m}^{-3}]$ en esa capa de 4 cm.

En el caso de temperatura, simplemente se pasa de $[\text{K}]$ a $[\text{°C}]$. Precisamente en la temperatura, se presentó una correlación muy marcada como se aprecia en la siguiente figura. Se encuentra un factor de correlación de 0.8855 ($R^2 = 0.7841$), y el ajuste lineal indica solamente una ligera subestimación en la zona inferior.

La Figura 13 muestra la dispersión entre la comparación de datos observados contra los estimados por el modelo. El ajuste o correlación es muy bueno en el sentido que el modelo resuelve el esquema de la transferencia radiativa bastante bien.

“2015, Año del Generalísimo José María Morelos y Pavón”

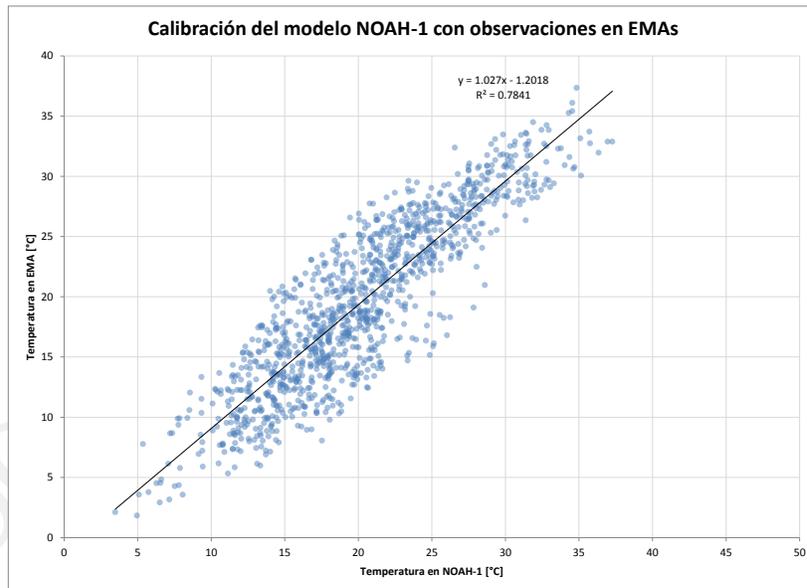


Figura 13 - Calibración de temperatura del modelo NOAH-1 con observaciones.

En el caso de humedad, se presenta una mayor dispersión, y aun así se alcanza un factor de correlación de 0.5677 ($R^2 = 0.3223$), y se aprecia mayormente una subestimación.

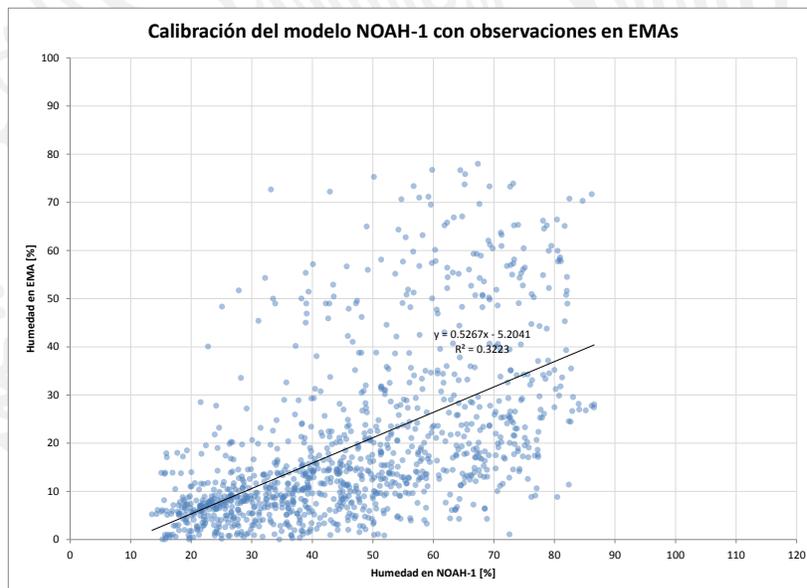


Figura 14 - Calibración de humedad del modelo NOAH-1 con observaciones.

"2015, Año del Generalísimo José María Morelos y Pavón"

Resulta lógico que aplicar una sola regresión para todo el conjunto de datos de humedad de suelo llevaría a estas bajas correlaciones. A simple vista parece que se pueden separar algunas tendencias o grupos de datos para mejorar las correlaciones. Ante esta situación, se revisaron individualmente las estaciones, con el fin de encontrar un patrón. De esta revisión se encontró que había algunas tendencias, según las estaciones que se comparen:

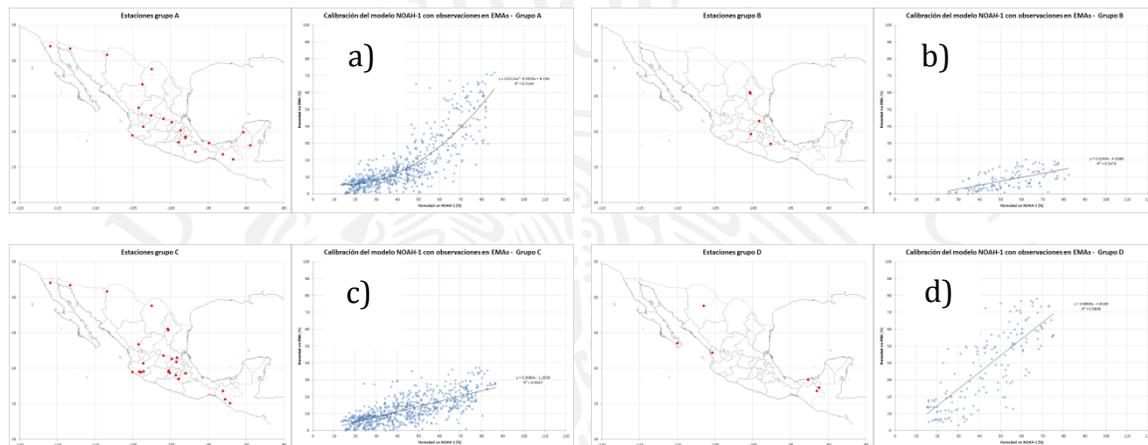


Figura 15 - Patrones de ajustes, por grupos de estaciones; a) parabólica, b) lineal baja, c) lineal media (la zona baja se parece a la parabólica pero no se dispara en la zona alta, d) lineal alta (tiene mucha dispersión pero es la tendencia que se parece más al modelo NOAH-1).

Los casos de la Figura 15 a) y c) son los que tienen más estaciones, y como tienen bastante coincidencia en la zona baja, hay un número considerable de estaciones en común. Se pensaba encontrar que el patrón se podría deber a la zona en que se localizan las estaciones, pero no es tan claro. Debido a esta situación, se optó por encontrar un ajuste local individual para cada estación, y con esto obtener un mapa interpolando en 2 dimensiones.

Para una estación en particular, con un ajuste lineal (con los dos coeficientes) se obtienen mejores resultados, pero se corre el riesgo de provocar humedad cero con estimaciones bajas del modelo NOAH (cuando la regresión corta al eje X con valores positivos), o un valor de humedad aun cuando el modelo NOAH indique humedad cero. La Figura 16 ilustra esta situación, y se trata de la estación CM11 (Los Petenes, Camp.)

“2015, Año del Generalísimo José María Morelos y Pavón”

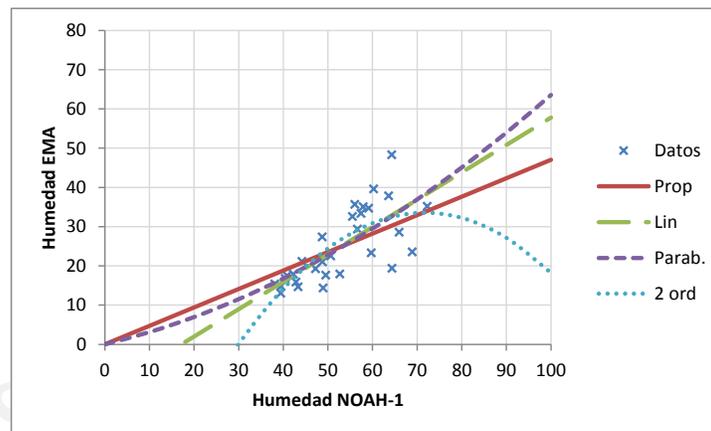


Figura 1 - Tipos de ajuste de humedad por estación.

Se puede observar que el ajuste lineal forzaría a ser cero a las estimaciones menores a 17 del modelo NOAA. El ajuste proporcional, obtenido al aplicar un factor solamente, no es el mejor, pero es consistente y estable. El marcado como “Parab.” es una parábola que pasa por el origen, y aunque con el ajuste a un polinomio de segundo grado mejora la correlación, la forma no siempre resulta físicamente aceptable.

En función del análisis descrito en el párrafo previo, se optó por utilizar el ajuste local del tipo proporcional, se puede obtener un mapa del coeficiente que se puede aplicar en cualquier mes o promedio. Si se cuenta con una malla con datos, el método de interpolación de Cressman resulta estable y es sumamente rápido, Sin embargo, cuando se cuenta con información en distintos puntos que no se encuentran en los nodos de la malla, se requiere un proceso iterativo para obtener estos valores, y entonces así poder interpolarse. El método de Kriging tiene ventajas en este caso pues minimiza la varianza (Rossiter 2007), y es por esto que se utilizó para interpolar en 2 dimensiones y obtener la malla, cuyo mapa se muestra en la Figura 17.

Para obtener este mapa, se incluyeron, además de los coeficientes en cada estación (rombos rojos), varios puntos con el valor unitario (círculos negros) alrededor del territorio nacional, con el fin de indicar que fuera de la zona con los datos comparados la tendencia sea a la unidad, es decir, se dan credibilidad a las estimaciones del modelo.

De esta forma, aplicando este mapa de coeficientes a los resultados del modelo NOAA (GLDAS 1) se obtienen valores cercanos a las observaciones en las estaciones.

"2015, Año del Generalísimo José María Morelos y Pavón"

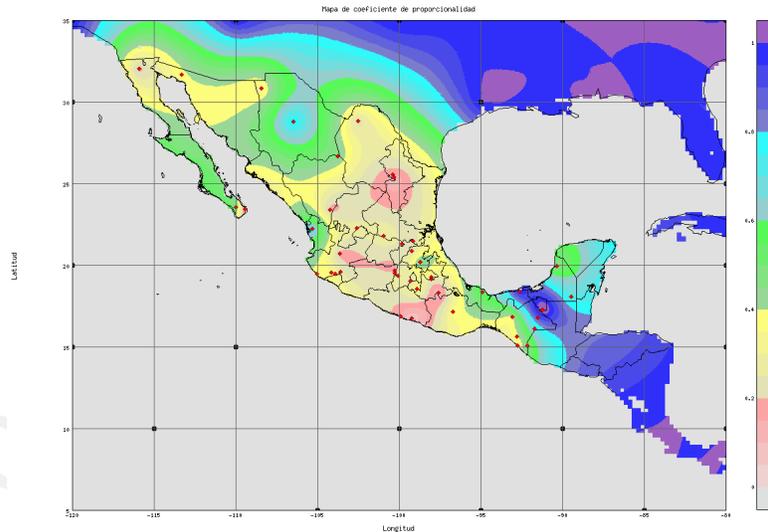


Figura 17 - Mapa de coeficientes para un ajuste proporcional.

Con el fin de verificar el efecto de aplicar este procedimiento, se aplicó el coeficiente de cada estación (obtenido con interpolación del mapa) a los valores extraídos de las mallas del modelo NOAH-1, y se compara también con los valores observados, es decir, se obtuvo una gráfica similar (Figura 18) a la de la figura 14, pero con valores ajustados de los modelos, la correlación aumenta considerablemente.

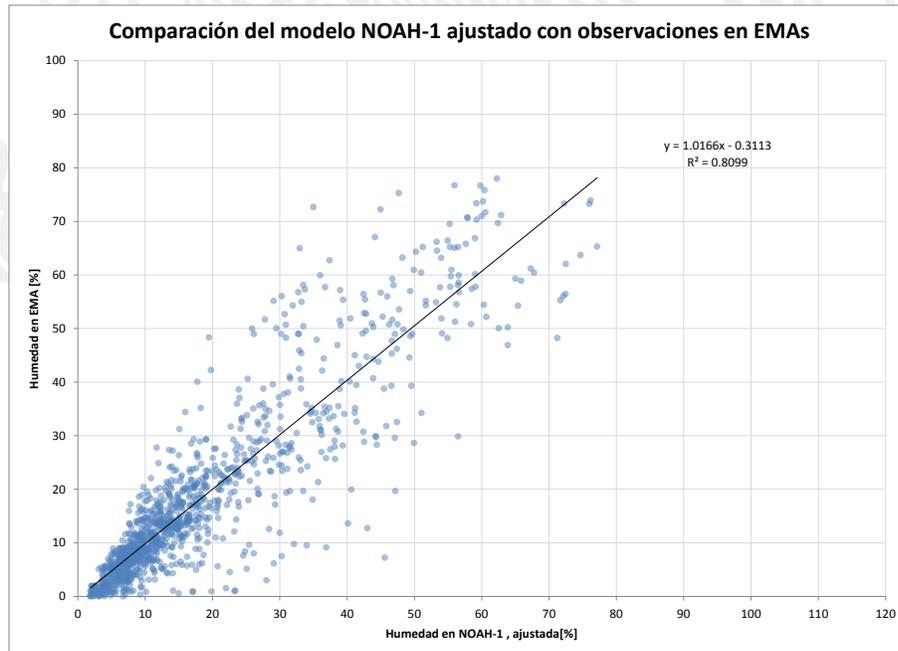


Figura 18 - Comparación del ajuste.

c. Climatología

Se obtuvo una climatología con la información obtenida de los resultados de los modelos GLDAS, que se resume en la Tabla 6. Esta información se encuentra almacenada también en mallas con las mismas características espaciales que las mensuales, y la convención de nombres de archivo se muestra en la misma tabla.

Tabla 6 - Mallas con climatología de los modelos Nota: en el nombre de archivo, *mm* indica el mes.

Modelo	Resol.	Años	Periodo	Variable	Nombre de archivo
NOAH-1	0.25	14/15	2001-2015	Humedad	n1-025- <i>pmm</i> -sm.grd
				Temperatura	n1-025- <i>pmm</i> -st.grd
NOAH-2	0.25	63	1948-2010	Humedad	n2-025- <i>pmm</i> -sm.grd
				Temperatura	n2-025- <i>pmm</i> -st.grd
VIC	1.00	32	1979-2001	Humedad	v1-100- <i>pmm</i> -sm.grd

En la medida que se cuente con información histórica larga es posible elaborar climatologías con un sentido muy objetivo. La OMM recomienda que para realizar climatologías o incluso calcular Normales Climatológicas es necesario contar como mínimo con 30 años de datos continuos. Situación que al menos para México resulta muy complicado, debido a la “porosidad” de los datos, sin considerar también el control de calidad de los mismos. En este sentido, ajustar valores o corregir sesgos de estimaciones numéricas se vuelve un reto, debido fundamentalmente a la falta de datos correctos. Por otra parte, en un sentido estricto las climatologías obtenidas del sistema GLDAS deberían de compararse en el mismo período de tiempo con datos observados, pero el problema es que en México apenas existe una red de estaciones meteorológicas instaladas en Áreas Naturales Protegidas (CONANP) que inició en el año 2011 y cuyo número no va más allá de 45 sitios, como se mostró en la tabla 5.

La Figura 19 muestra la climatología de humedad del suelo para el mes de enero considerando los resultados de los tres diferentes esquemas dentro del sistema GLDAS (NOAH-1, NOA-2 y VIC-1).

"2015, Año del Generalísimo José María Morelos y Pavón"

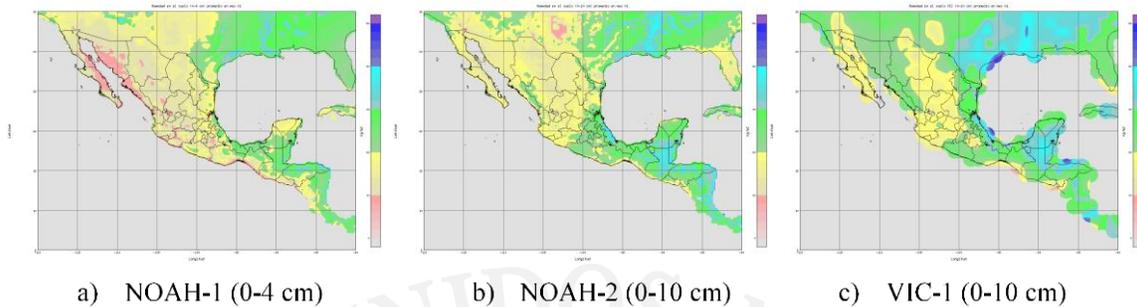


Figura 19 – Climatología para el mes de enero de humedad del suelo

Por otra parte, la Figura 20 muestra la climatología de temperatura con los resultados de los modelos NOAH-1 y NOAH-2. Se puede observar la consistencia en la solución numérica de ambos modelos.

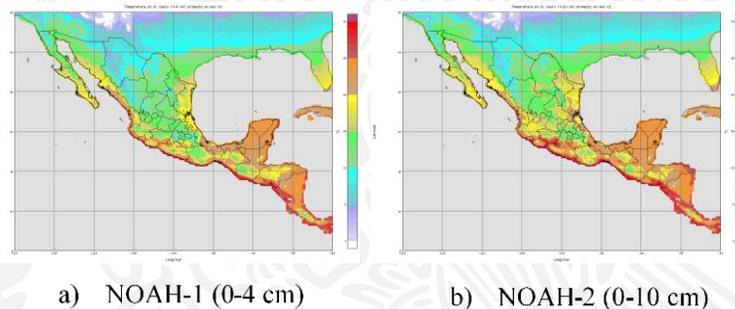


Figura 20 – Climatología para el mes de enero de temperatura del suelo

Aplicando el mapa de coeficientes (Figura 17) a los resultados del modelo NOAH-1 (GLDAS) se obtienen valores cercanos a las observaciones en las estaciones. Se debe mencionar que el mapa de coeficientes es válido para el modelo NOAH-1, y se podría buscar la manera de aplicar estos resultados a los otros modelos NOAH-2 y VIC-1, sin embargo una limitante mayor es la temporalidad debido a que no se dispone de datos de años previos. En un ejercicio posterior, es necesario investigar si existen otras fuentes de información de observaciones de humedad y temperatura del suelo. Al igual que en el caso de los resultados originales de los modelos, esta información se almacenó también en mallas con las mismas características espaciales que las mensuales, y la convención de nombres de archivo se muestra en la Tabla 7 que será la que concentra las climatologías ajustadas o corregidas.

“2015, Año del Generalísimo José María Morelos y Pavón”

Tabla 7 - Mallas con resultados de los modelos corregidos con estaciones. Nota: en el nombre de archivo, *mm* indica el mes.

Modelo	Resol.	Años	Periodo	Variable	Nombre de archivo
NOAH-1	0.25	14/15	2001-2015	Humedad	n1-025- <i>cmm</i> -sm.grd
				Temperatura	n1-025- <i>cmm</i> -st.grd

La Figura 21 muestra, como ejemplo, los mapas de la humedad y temperatura ajustados a valores de las estaciones para el mes de enero. Sus contrapartes originales son las figuras 13-a y 14-a.

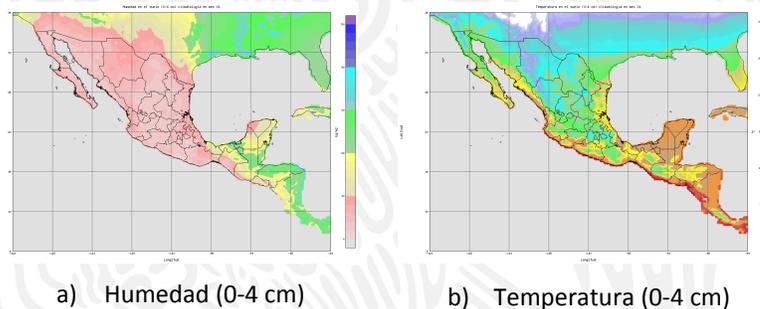


Figura 21 - Mapas de humedad y temperatura de suelo del ajuste al modelo NOAH-1, para enero.

NOTA: Puede notarse que en el caso de humedad, se castiga en general en todo el territorio, a excepción del sureste. En el caso de temperatura el efecto es poco notorio, pues la diferencia máxima entre el corregido y el original es de menos de 2 grados.

A continuación se muestran los mapas de climatologías de tanto humedad del suelo como de temperatura (Figuras 22 y 23).

"2015, Año del Generalísimo José María Morelos y Pavón"

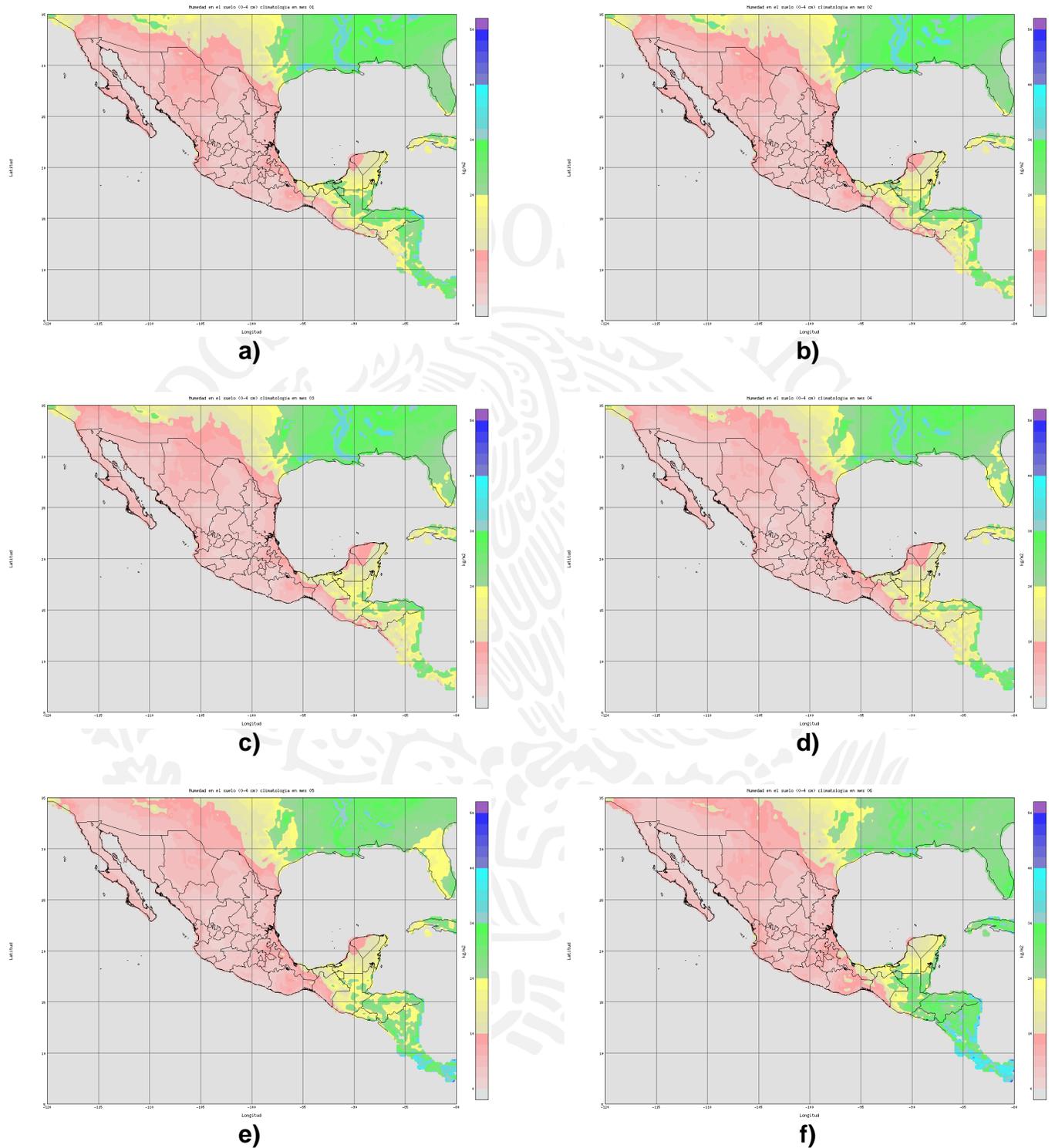


Figura 22 - Mapas mensuales de humedad de suelo para los meses de: a) enero, b) febrero, c) marzo, d) abril, e) mayo y f) junio

"2015, Año del Generalísimo José María Morelos y Pavón"

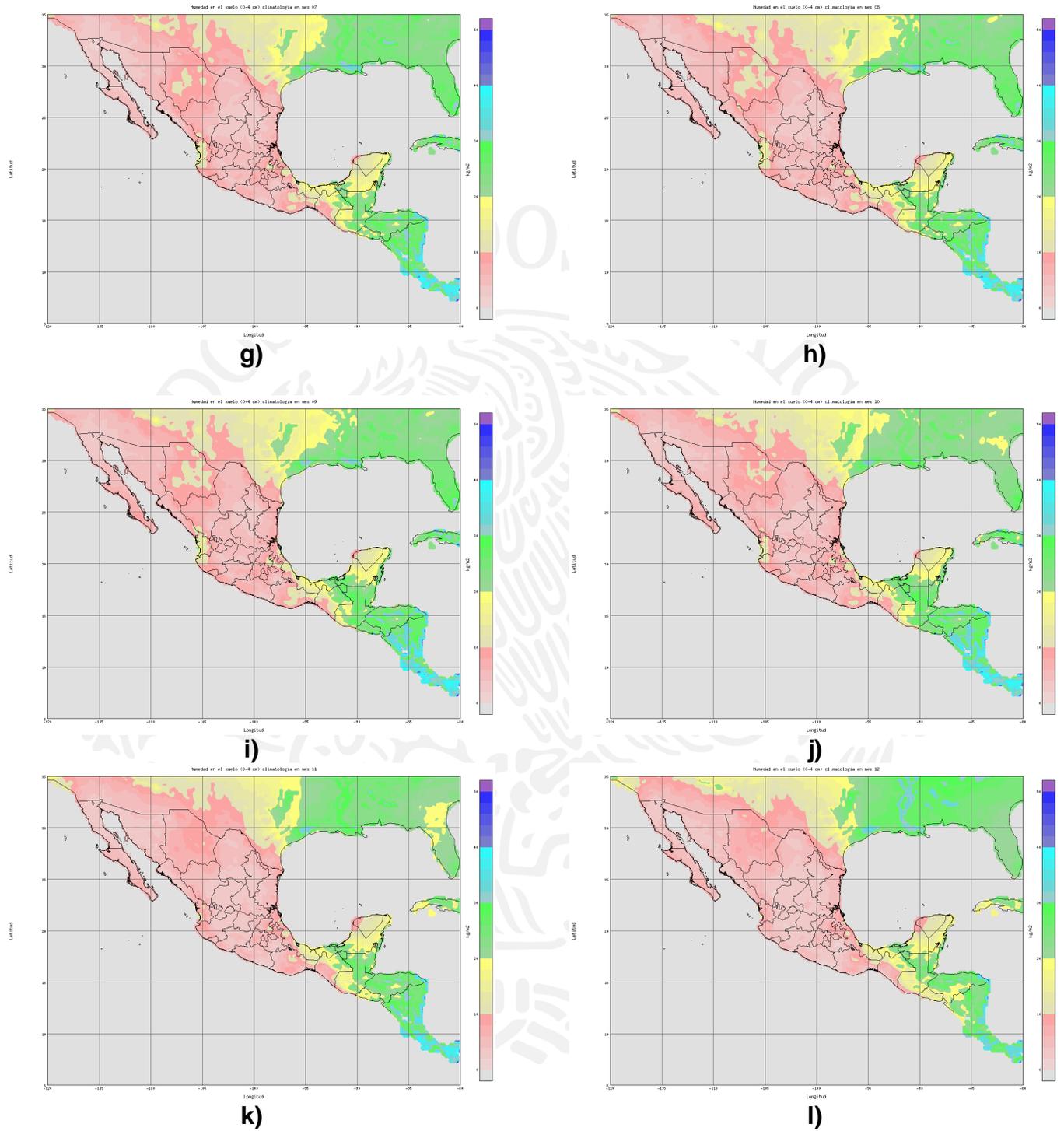


Figura 22 - Mapas mensuales de humedad de suelo para los meses de: g) julio, h) agosto, i) septiembre, j) octubre, k) noviembre y l) diciembre

"2015, Año del Generalísimo José María Morelos y Pavón"

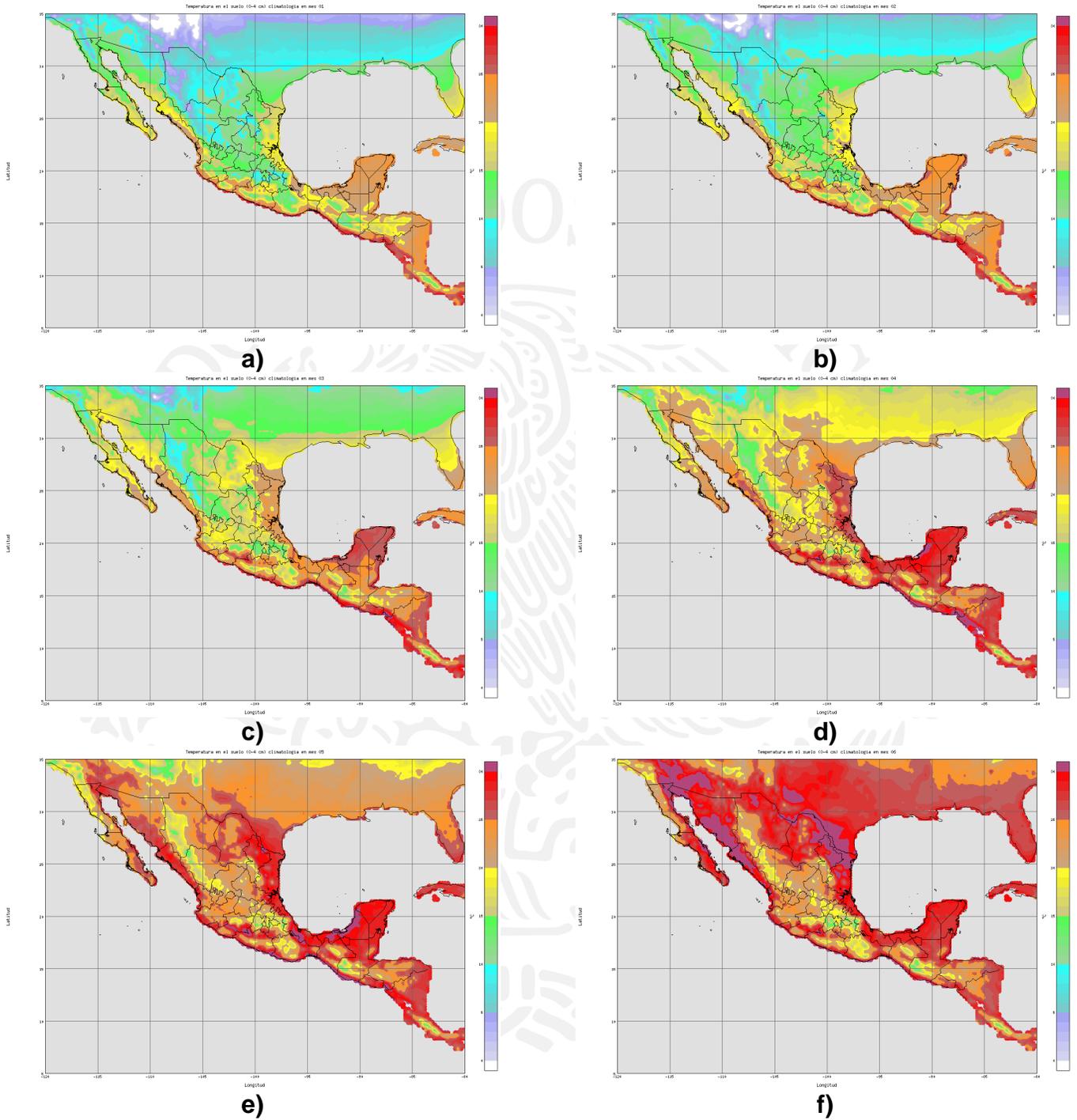


Figura 23 - Mapas mensuales de temperatura de suelo para los meses de: a) enero, b) febrero, c) marzo, d) abril, e) mayo y f) junio

"2015, Año del Generalísimo José María Morelos y Pavón"

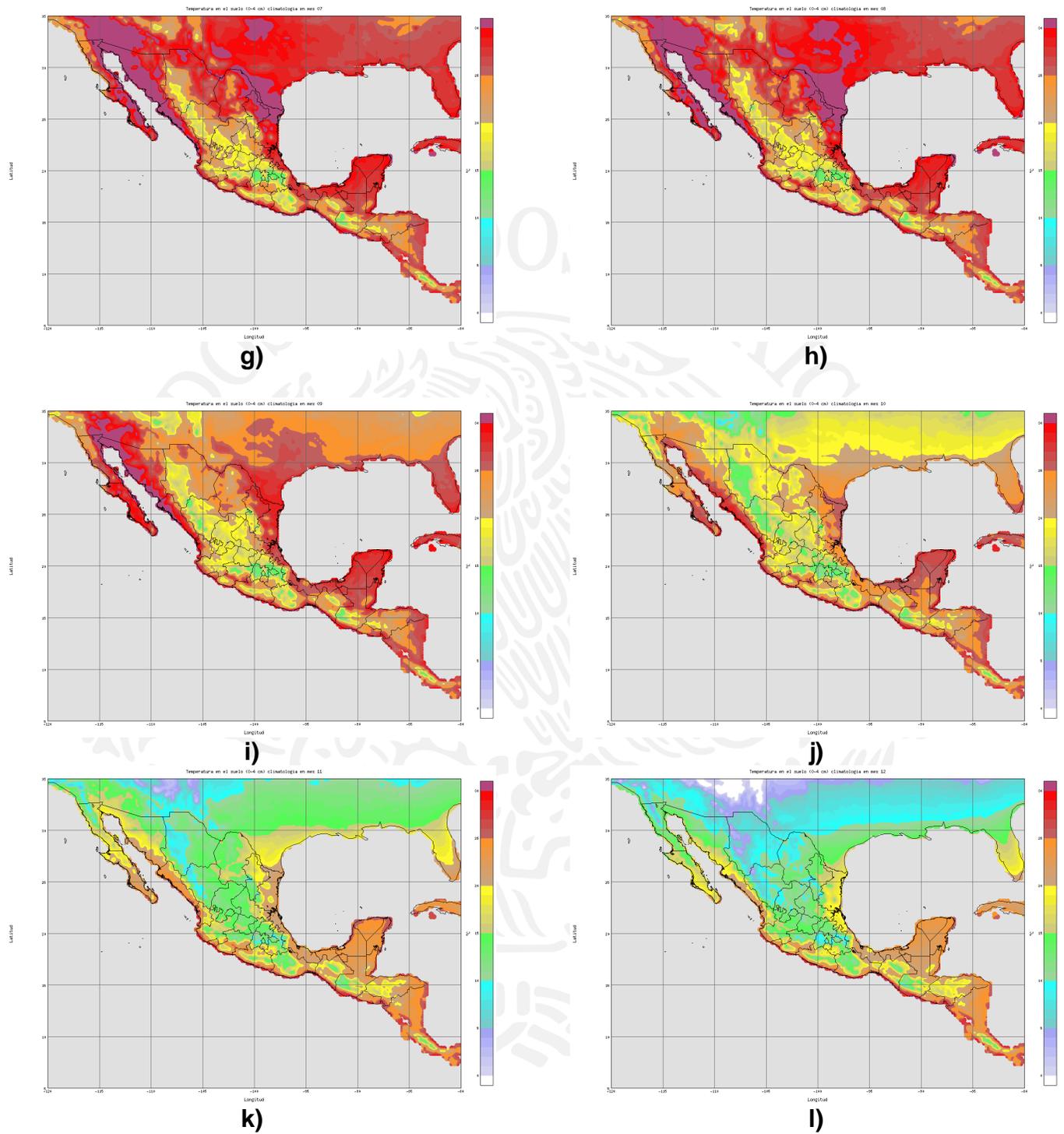


Figura 23 - Mapas mensuales de temperatura de suelo para los meses de: g) julio, h) agosto, i) septiembre, j) octubre, k) noviembre y l) diciembre

IV. Desarrollo de un esquema de elaboración de la perspectiva de sequía (drought outlook)

El contexto de la sequía, dependiendo de su extensión temporal y magnitud, tiene diversas implicaciones en algunos sectores que son preponderantes en la gestión del agua; la agricultura es uno de ellos. El inicio de este proceso se debe a la falta de la precipitación que de forma regular ocurre durante la temporada de lluvias y que se puede manifestar tanto en su magnitud como en su duración. Sin embargo, la complejidad del fenómeno se debe a que si bien inicia como una falta de precipitación dentro de los rangos medios de la región en donde aparezca, cuando esta falta de lluvia se prolonga, entonces se extiende manifestando sus impactos en los sectores agrícolas e hidrológicos en primer instancia y después afectando el entorno socioeconómico.

La sequía es un fenómeno complejo, debido a su lento desenvolvimiento y sus impactos directos en los diversos sectores. Es práctica común que las acciones de mitigación de sus impactos se implementen cuando se tiene el fenómeno en su máxima intensidad, situación que llega a ser contraproducente pues es cuando las inversiones son cuantiosas y solo atienden el desastre pero no lo mitigan y mucho menos se realizan acciones de adaptación.

Generalmente, la forma de cómo se clasifica la evolución de la sequía es a través de cuatro etapas fundamentales: Meteorológica, agrícola, hidrológica y socioeconómica, cada una de ellas tiene un impacto y sus respectivas consecuencias (Wilhite et al, 2007, American Meteorological Society, 1997). Encontrar una sola definición que considere el concepto de sequía es muy complejo debido a las necesidades de cada usuario; no existe una definición universal, pues está sujeta a las características de cada régimen climático y el impacto al sector específico (Whilite et al, 2007), la que más se acerca al proceso de elaboración del MSM es una modificación a la presentada por Frick et al (1990) “Una sequía se define como un período sostenido de baja precipitación tal que el agua disponible de embalses, escurrimientos, acuíferos y fuentes externas no cumplen con las necesidades de los usuarios de la cuenca”. Por otra parte, los impactos por sequías en la actualidad se vuelven muy complejos debido a que se pueden diversificar a otros sectores como son turismo, energía, transporte, salud, ecología y medio ambiente entre otros (Whilite et al, 2007) que en etapas de máxima intensidad alcanzan a tener consecuencias sociales importantes, migración es una de ellas.

Los impactos por sequías se manifiestan en forma directa en la reducción de cosechas, pastizales y producción forestal, aumento del peligro de incendios; reducción en los niveles de embalses, ríos y acuíferos, incremento en la tasa de mortalidad de ganado y vida silvestre; daño a las pesquerías y medio ambiente. Pero en la medida de su intensificación, la reducción

en cultivos, pastizales y producción forestal puede resultar en una reducción del ingreso de agricultores y agro-negocios, desempleo, incremento del crimen, ejecución de hipotecas de préstamos hipotecarios, migración y programas de atención de desastres. Las pérdidas asociadas a impactos indirectos a menudo exceden a los provocados por impactos directos (Whilhite et al, 2007).

Dentro del esquema del PRONACOSE, se define el aspecto de la acción preventiva, en este sentido es necesario contar con las herramientas que permitan “visualizar el futuro”, considerando todas las incertidumbres tanto aquellas que son naturalmente inducidas (procesos altamente no-lineales) como las intervenidas por la acción humana. Si bien científicamente se ha probado que la atmósfera conserva su memoria en no más allá de los primeros 10 días (Lorenz, 1963) en la actualidad se realizan esfuerzos para generar escenarios climáticos que permitan realizar acciones preventivas para eventos que pueden ocurrir en los próximos meses, este es un caso de la implementación de los sistemas de alertamiento, que en este caso es para las sequías, en estas escalas pasamos de la acción determinista a la probabilista.

Es materia constante de discusión científica cómo llamar correctamente al hecho de anticiparse a un evento climático, la sequía en este caso. Un pronóstico se entiende que es un evento que ocurra y generalmente conlleva una acción determinista, regularmente se utiliza para la escala meteorológica; pero para la climática donde la incertidumbre de la ocurrencia de los fenómenos atmosféricos es mayor es la herramienta estadística-probabilista quien mejor nos ayuda a interpretar esta incertidumbre. Un pronóstico climático es complejo en sí mismo, por ello es común llamarlo como escenario climático considerando a un escenario como una de tantas posibilidades que el evento ocurra. Aún más, para una perspectiva de sequía (drought outlook) se depende de este tipo de escenarios.

Por mucho tiempo se pensó que las sequías eran impredecibles debido a su alta aleatoriedad y su poca dependencia en los pronósticos climáticos. Sin embargo, los avances científicos han revertido poco a poco este concepto haciendo que la perspectiva de sequía sea una realidad y que incluso en algunos centros operativos se están realizando investigaciones para avanzar en el estado del conocimiento en esta materia.

Por otra parte, es necesario establecer el marco de referencia o definición de sequía, pues en función de ésta es cómo se definen los insumos o datos de entrada dentro de los sistemas o modelos. Por ejemplo, para una sequía meteorológica es suficiente con implementar un escenario utilizando el Índice Estandarizado de Precipitación mejor conocido como SPI por sus siglas en inglés (McKee et al, 1993), es quizás una de las herramientas más recurridas e

“2015, Año del Generalísimo José María Morelos y Pavón”

implementables pues en la mayoría de los casos por lo general se cuenta con datos históricos de precipitación y futuros de modelos climáticos que se encuentren disponibles, lo demás es solo análisis estadístico. Existen ya esfuerzos de instituciones como el IRI de la Universidad de Columbia en Estados Unidos, que utiliza información del sistema de multimodelos por ensamble para Norteamérica (NMME) o bien una técnica propuesta por el Dr. Bradfield Lyon que consiste en la “persistencia climática” (Lyon et al, 2012) que únicamente con la historia y análisis estadístico-probabilístico puede estimar en el futuro una posible condición climática donde se determine la sequía. A manera de ejemplo se presenta un mapa generado por el IRI sobre el pronóstico de la sequía con NMME definida en la probabilidad de ocurrencia del SPI en el umbral del valor de la media (no es probabilidad de la media porque el valor de ésta es cero).

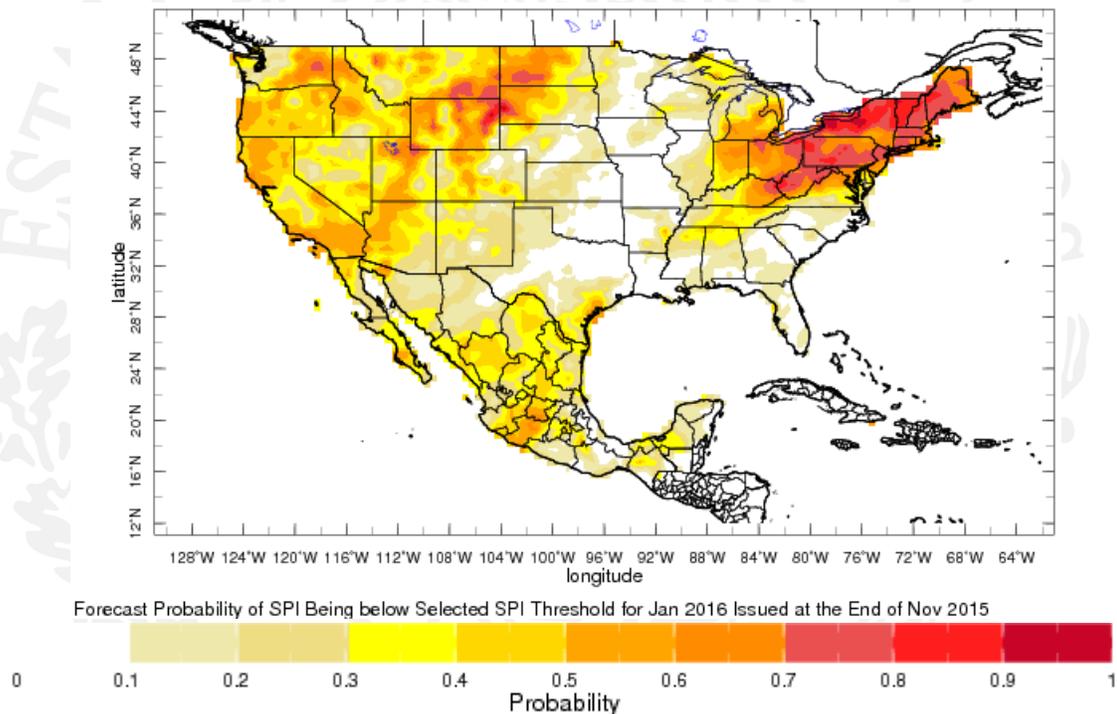
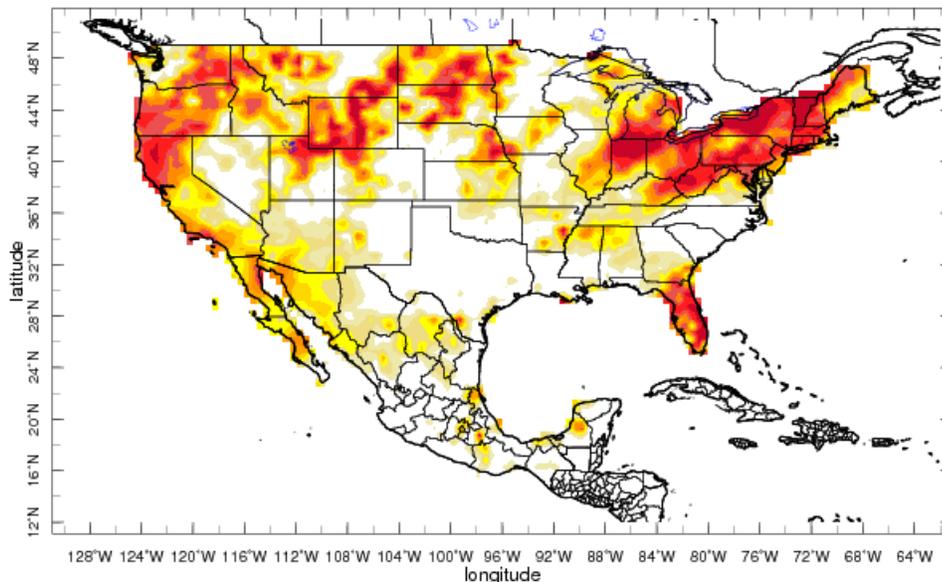


Figura 24 – Pronóstico de probabilidad del SPI con NMME (a tres meses) que se encuentra debajo de un umbral de cero para el mes de enero de 2016 emitido a fine de noviembre de 2015. Fuente (IRI).

Un mapa con estas características puede también generarse con la información de la persistencia climática. Se podrán observar diferencias importantes que aunque se requiere de una evaluación objetiva, al menos con las condiciones climáticas imperantes y las perspectivas climáticas se espera al menos para en norte de México condiciones favorables para la

“2015, Año del Generalísimo José María Morelos y Pavón”

precipitación por lo que el modelo al menos en la perspectiva que mejor representa las condiciones esperadas el elaborado con datos persistencia.



Forecast Probability of SPI Being below Selected SPI Threshold for Dec 2015 Issued at the End of Nov 2015

Figura 25 – Pronóstico de probabilidad del SPI con persistencia (a tres meses) que se encuentra debajo de un umbral de cero para el mes de enero de 2016 emitido a fines de noviembre de 2015. Fuente: IRI.

Sin lugar a dudas, que hay mucho todavía por hacer, si únicamente considerando una variable como es la precipitación en este caso se observan diferencias importantes, entonces incorporar otras variables convierte el proceso de ser no lineal a “altamente no lineal”, haciendo más complejo su entendimiento y por lo tanto su manejo. Esta es una de las razones porque de forma operativa todavía no es completamente confiable implementar un sistema completo y complejo para perspectiva de sequía, pero hay que trabajar en ello.

IV.1 Componentes o elementos necesarios para elaboración de la perspectiva de sequía

El Centro del Pronóstico Climático (CPC por sus siglas en inglés) de la NOAA denomina “drought outlook” y no es meramente un pronóstico. Lo que denominan como “U.S. Monthly Drought Outlook (MDO)” que se puede entender como la perspectiva mensual de sequía para Estados Unidos, se elabora a partir de otros productos de diferentes unidades y extensiones tanto temporales como espaciales; por ejemplo las perspectivas mensuales de precipitación y temperatura, algunos pronósticos de corto y mediano plazo, pronósticos climáticos de 6-10 días

"2015, Año del Generalísimo José María Morelos y Pavón"

y 8-14 días, perspectiva experimental para las semanas 3 y 4, perspectivas de precipitación de NAEFS, modelos dinámicos incluyendo el Sistema de Pronóstico Climático Versión 2 (CFSV2 por sus siglas en inglés) y modelo GFS, climatología, compuestos y correlaciones de El Niño / La Niña y las condiciones iniciales. De la misma manera que la metodología para la elaboración del Monitor de Sequías, resulta importante cómo realizan la combinación de cada una de estas capas de información debiendo ser una ponderación objetiva, otorgando los respectivos pesos dependiendo de la relevancia de cada una de estas capas para llegar a un mapa como el que se muestra en la Figura 26.

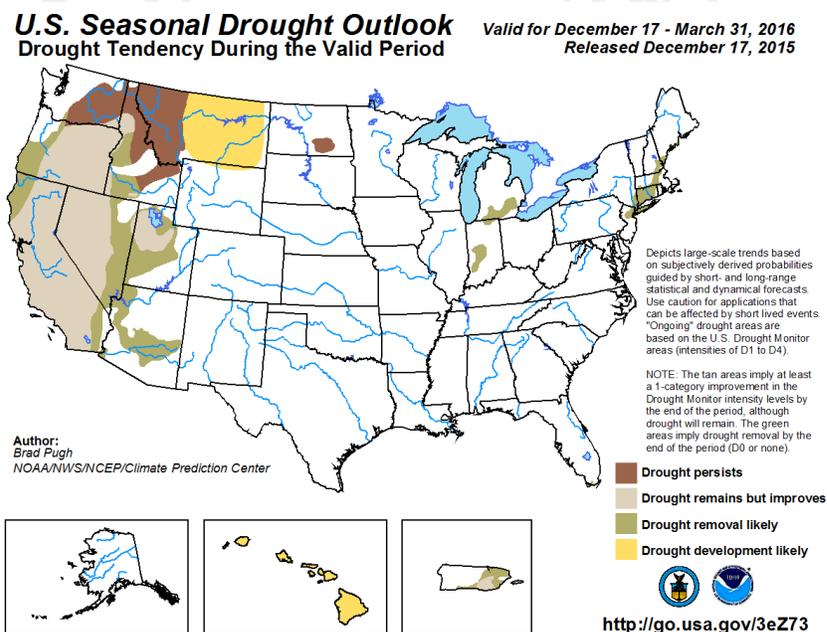


Figura 26 – Mapa de perspectiva estacional de sequía que elabora el CPC/NOAA, la verificación solamente se realiza para los 48 estados. Alaska, Hawaii y Puerto Rico no se incluyen para la verificación derivado por la resolución espacial

El punto medular de la perspectiva climática es la dependencia del Monitor de Sequías pues de ahí es donde se extienden en la escala mensual y estacional. En realidad, se debe contar en primer lugar con el Monitor de Sequías para que con todo el análisis del pronóstico de los modelos se pueda extender hacia donde las condiciones indiquen alguna condición de sequía. De esta forma se liga con las condiciones actuales de sequía que de manera oficial se publica ya sea en la página WEB de CPC/NOAA o del NDMC; mientras que por otra, se extiende la perspectiva de la sequía en función de la información actual y futura. La Figura 27 muestra de manera esquemática el proceso de elaboración de la perspectiva de sequía (drought outlook) como se elabora en el CPC, esta es una interpretación propia en función de toda la información

que en su momento se encontró disponible, un punto importante a considerar es la forma de la ponderación de cada una de las capas de información descritas, esta es la forma en cómo esta información se vuelve objetiva y da margen para una evaluación sobre el nivel de confianza que tiene la perspectiva, ya sea mensual o estacional, para escalas temporales más extendidas, esta metodología perdería su habilidad (skill) para utilizarse como herramienta de pronóstico.

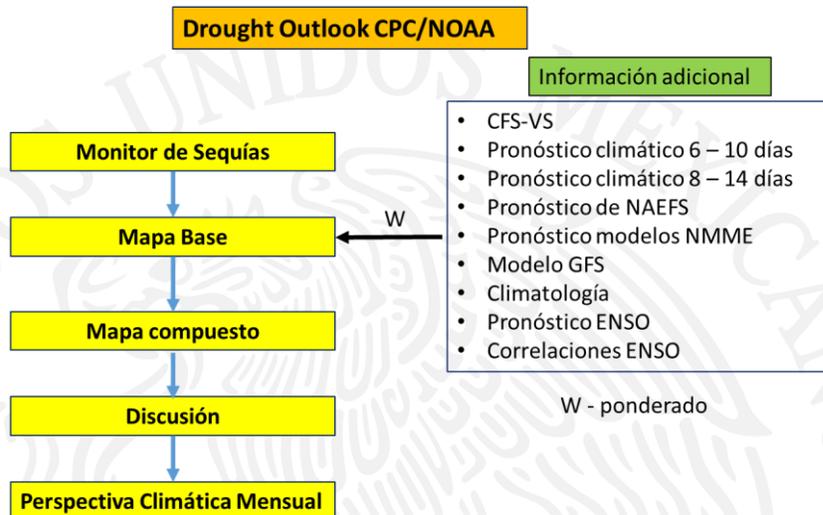


Figura 27- Esquema de elaboración de la perspectiva de sequía por el CPC de la NOAA.
Fuente: Elaboración propia.

IV.II Elaboración de una propuesta metodológica para la elaboración de la perspectiva de sequía

Desde el punto de vista del monitoreo climático, las condiciones de México son diferentes a las que prevalecen en los Estados Unidos de Norteamérica. En la actualidad se cuenta con una red de estaciones climáticas de aproximadamente 380 estaciones con calidad suficiente como para elaborar el Monitor de Sequías de México, siendo éste número insuficiente para realizar una cobertura completa en el país. Recientemente, en un estudio realizado dentro del IMTA para la CONAGUA se determinaron otras 208 estaciones que pueden agregarse a este grupo y con ello se mejora el monitoreo en zonas donde existe poca o nula cobertura, este número de estaciones adicionales puede mejorar el monitoreo de las sequías en México.

La elaboración del MS en México todavía se realiza de forma subjetiva incorporando las capas de la información sin ponderación, haciendo imposible su verificación en primer lugar y muy probablemente su incorporación para la perspectiva climática. Por ello es que resulta necesario implementar un esquema objetivo de elaboración del monitor de sequías para México. Se debe

“2015, Año del Generalísimo José María Morelos y Pavón”

mejorar la elaboración del MS para poder establecer una línea base para implementar la perspectiva de sequía mensual y estacional.

México puede tener acceso a toda la información descrita en la Figura 27, sin embargo hace falta realizar algunos procesos como climatologías que aunque existen algunas, es necesario realizar otras más como una climatología de periodos de sequía mediante el uso del SPI. Además que existe un grupo que operativamente se dedica a la elaboración de la perspectiva de sequía, situación que en México es prácticamente irrealizable bajo las condiciones actuales.

Considerando que el MS se tiene de forma objetiva, el siguiente paso sería entonces definir qué tipo de información es la que se puede incorporar para la perspectiva de sequía. La propuesta es de incorporar las siguientes variables: precipitación (lluvia y convertida a SPI), temperatura, humedad del suelo y condiciones de vegetación como las cuatro variables fundamentales. Una propuesta de esquema de generación de la perspectiva de sequía para México quedaría definida en la Figura 28 como sigue:

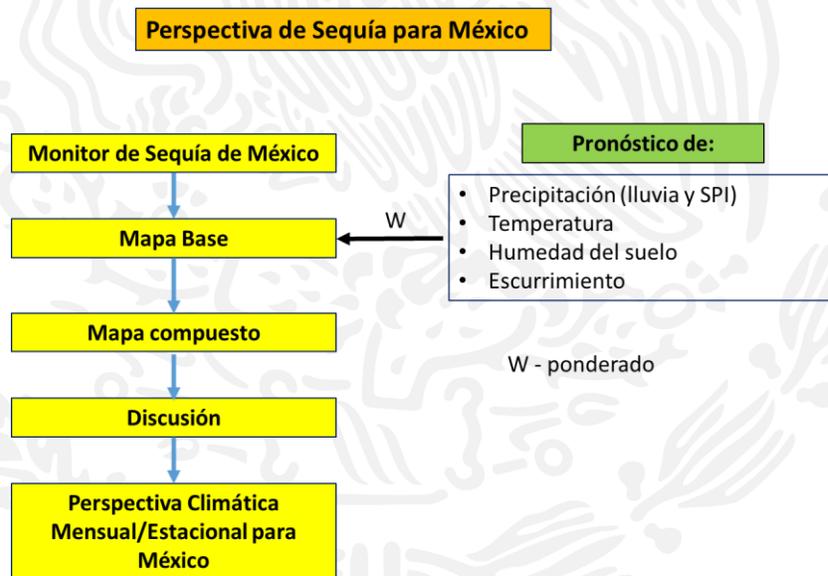


Figura 28 – Esquema de propuesta para elaboración de la perspectiva de sequía (drought outlook) para México. (Elaboración propia)

Una forma alterna de contar con un monitor de sequías puede ser la propuesta del IRI donde únicamente se considera a la sequía meteorológica y el mapa de SPI para diferentes escalas por decir de 1, 3, y seis meses se puede elaborar, aclarando que entre más lejano el rango es mayor la incertidumbre. Se cuenta con información histórica que se puede ligar a las proyecciones climáticas de precipitación, haciendo con ello la conexión con la proyección del tiempo hacia adelante. En cierto sentido sería una metodología parecida a la que se utiliza con información de ya sea el NMME o la persistencia climática, que como se ha mostrado ambas tienen un buen nivel de confianza.

Cuando se requiere vislumbrar impactos por sequía en otros sectores, como es el agrícola e hidrológico, entonces se requiere de información adicional al SPI y es cuando se complica el análisis en función de la disponibilidad de la información como es la condición de vegetación y humedad de suelo cuando menos.

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se han cumplido los objetivos inicialmente propuestos. No obstante que se requiere ahondar en el tema, se ha mostrado la factibilidad de contar con información de humedad del suelo obtenidas mediante sensores remotos satelitales de manera sistemática, considerando así que es posible elaborar mapas de humedad de suelo semanal y mensual.

Por otra parte, considerando medios alternos, el uso de modelos como el NOAH y VIC son una utilidad real que puede implementarse de forma casi directa, aunque se mostró que la humedad del suelo es una variable que requiere mayor investigación científica, sobre todo en la solución dinámica explícita y su interacción con otras variables fundamentales de estado.

Las imágenes del satélite SMOS mencionan que son calibradas pero se requiere de un postprocesamiento para México; retomando las recomendaciones de la Dra. Susan Ustin de la Universidad de California, los puntos de calibración son tan lejanos y esparsamente distribuidos que resulta necesario “recalibrar” con puntos o sitios de muestreo dentro de la región de interés. Esta es una actividad que queda pendiente y que es posible realizar utilizando la misma metodología que se empleó para ajustar los valores de humedad y temperatura del suelo de los modelos NOAH y VIC.

Como una recomendación institucional hacia la CONAGUA, es necesario mejorar las redes de observación. Asimismo, brindar el mantenimiento y calibración de los sensores es fundamental para ofrecer datos de calidad para diversos fines. Con respecto a la humedad del suelo resulta ser un predictor con mayor confianza debido a la “larga memoria” que tiene comparando a la precipitación, por esta razón es necesario incorporar más sensores a las redes de EMAs y

“2015, Año del Generalísimo José María Morelos y Pavón”

ESIMEs pues con las que actualmente se dispone no es posible hacer ajustes o mapeos sobre esta variable a nivel nacional y que sean confiables.

Se requiere sistematizar la elaboración del Monitor de Sequías de México para que la Perspectiva de Sequía sea consistente y objetiva. En este sentido es conveniente establecer la colaboración con el NDMC quienes han ofrecido la colaboración para implementar un Monitor de Sequía completamente objetivo y en la medida del tiempo que sea posible su implementación de forma totalmente operativa.

En la medida que se cuente con un Monitor de Sequías objetivo, entonces se podrá avanzar hacia una Perspectiva de Sequía de la misma calidad.

Una forma alterna de dar seguimiento a las sequías es como lo está realizando el IRI, solamente utilizando el SPI como índice de sequía, pero como ya se ha mostrado, en la medida que se avance con el tiempo, la sequía meteorológica debe ser complementada con otras herramientas de análisis para las siguientes procesos de sequía como es la agrícola e hidrológica.

Es necesario crear métodos objetivos de evaluación de pronósticos y perspectivas, para ello se requiere de un grupo de trabajo sólido que esté trabajando en estas líneas de trabajo a tiempo completo.

EL IMTA no es operativo, por ello se requieren implementar sistemas de monitoreo completamente automatizados y verificables, o bien que sean transferidos a las entes operativas para su aplicación.

VI. REFERENCIAS

- American Meteorological Society, 1997; Meteorological Drought – Policy Statement. Bull. Amer. Meteor. Soc., 78, 847-849.
- Chen, Y., K. Yang, J. Qin, L. Zhao, W. Tang, and M. Han, 2013: Evaluation of AMSR-E retrievals and GLDAS simulations against observations of a soil moisture network on the central Tibetan Plateau, J. Geophys. Res. Atmos., 118, 44664475, doi:10.1002/jgrd.50301.
- Cressman, G. P, 1959: An Operational Objective Analysis System. Mon. Wea. Rev., 87, 367–374.
- Entekhabi, D., y coautores, 2014; SMAP Handbook, Soil Moisture Active Passive. Disponible en: <http://smap.jpl.nasa.gov/mission/description/>
- Ferrante, J. L., 2012: INTERPOLACION & APROXIMACION. Editorial de la Universidad Tecnológica Nacional. Buenos Aires, Argentina.
- Frick, D.M., D. Bode, y J. D. Salas, 1990; Effect of Drought on Urban Water Supplies. I: Drought Analysis, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 116, No. 6, June, pp. 733-753.
- Liang, X., D. P. Lettenmaier, E. F. Wood, and S. J. Burges, 1994: A Simple hydrologically Based Model of Land Surface Water and Energy Fluxes for GSMs, J. Geophys. Res., 99(D7), 14,415-14,428.
- Lorenz, E.N., 1963; Deterministic Nonperiodic Flow, Journal of the Atmospheric Sciences, Volume 20, pp. 130-141.
- Lyon, B., M.A., Bell, M.K., Tippet, A. Kumar, M.P. Hoerling, X. Quan, H. Wang, 2012; Baseline probabilities for the seasonal prediction of meteorological drought, J. Appl. Met. and Clim., Volume 51, pp. 1222-1237, July.
- Malik, M., S., and J.P. Shukla, 2014: Estimation of soil moisture by remote sensing and field methods: A review, International Journal of Remote Sensing & Geoscience, Volume 3, Issue 4, July, pp21-27.
- McKee, T.B., N.J. Doesken y J. Kleist, 1993; The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales, Eight Conference on applied Climatology, 17-22 January, Anaheim, California.

- Njoku E. G., T. J. Jackson, V. Lakshmi, T. K. Chan, and S. V. Nghiem, 2003: “Soil moisture retrieval from AMSR-E,” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 41, pp. 215–229.
- Rodell, M., P.R. Houser, U. Jambor, J. Gottschalck, K. Mitchell, C.-J. Meng, K. Arsenault, B. Cosgrove, J. Radakovich, M. Bosilovich, J.K. Entin, J.P. Walker, D. Lohmann, and D. Toll, 2004: The Global Land Data Assimilation System, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 85(3), 381-394.
- Rossiter, D. G., 2007: Co-kriging with the gstat package of the R environment for statistical computing. Technical Note, International Institute for Geo-information Science & Earth Observation (ITC), Enschede (NL).
- Stevens Water Monitoring Systems, 2006: the Parameters of the Hydra Probe.
- Verhoest, N. E. C., Lievens, H., Wagner, W., Álvarez-Mozos, J., Moran, M. S., y Mattia, F., 2008: On the soil roughness parametrization problem in a soil moisture retrieval of bare surfaces from synthetic apertura radar. *Remote Sens.*, 8, 4213-4248
- Wang, L., y J.J. Qu, 2009: Satellite remote sensing applications for Surface for Surface soil moisture monitoring: a review. *Front. Earth*
- Wilhite, D., M.D. Svovoda y M. Hayes, 2007; Understanding the complex impacts of drought: A key to enhancing drought mitigation and preparedness, *Water resources Management*, 21:763-774.

ALGUNAS LIGAS A SITIOS CONSULTADOS

- 1] <http://www.pronacose.gob.mx/Contenido.aspx?n1=1&n2=0>
- 2] <http://smap.jpl.nasa.gov/mission/description/>
- 3] http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/SMOS/Introducing_SMOS
- 4] <http://www.smos-bec.icm.csic.es/?q=node/05>

RECONOCIMIENTOS:

M.C. Esteban Pardo García quien brindó apoyo en el trabajo de campo desempeñado durante la visita a los sitios de muestreo en Villahermosa, Tabasco.