

Aplicación de las salidas del modelo GFS/NCEP en la predicción agrometeorológica

Ismabel María Domínguez–Hurtado ⁽¹⁾, Aldo Saturnino Moya–Álvarez ⁽¹⁾ y Alejandro Estrada–Moreno ⁽²⁾.

¹Centro Meteorológico Provincial de Villa Clara, Cuba; correo electrónico: ismabel.dominguez@vcl.insmet.cu

⁽²⁾ Universitat Rovira i Virgili, España; estalejandro@gmail.com

Recibido: septiembre 2015	Aceptado: septiembre 2016
---------------------------	---------------------------

Resumen

Se describe una metodología para la vigilancia agrometeorológica mediante la integración de la salida del modelo GFS/NCEP, los registros pluviométricos y los datos de las estaciones meteorológicas de superficie. Como criterios se establecieron que los índices agrometeorológicos empleados fuesen de uso nacional y que las variables a partir de las cuales se calculan los mismos se deriven directa o indirectamente de las observaciones meteorológicas. Fueron seleccionados para la vigilancia fitosanitaria, el pronóstico de las condiciones de riesgo de Moho azul mediante el índice de peligrosidad modificado (IPM) y pronóstico de las condiciones para la aparición y desarrollo del tizón tardío de la papa; para la vigilancia biometeorológica, los índices de confort para ganado vacuno y aviar. Además se vigiló el peligro meteorológico para la ocurrencia de incendios en la vegetación, los bosques y los cultivos. Se obtiene un sistema totalmente automatizado para la captación, procesamiento y distribución de la información.

Palabras clave: modelos numéricos, reducción de escala, vigilancia agrometeorológica

Abstract

Application of the model outputs GFS/NCEP in agrometeorological prediction

A methodology for monitoring by integrating the GFS output / NCEP, rainfall records and data from surface meteorological stations is described. The criteria were established that agrometeorological indices used were domestic use and variables from which are calculated the same arising directly or indirectly from meteorological observations. They were selected for plant monitoring, forecasting conditions Blue mold risk by dangerous modified index (WPI) and prognosis of the conditions for the emergence and development of late blight; biometeorology for surveillance, comfort indices for cattle and poultry livestock. Besides the weather risk for the occurrence of fires in vegetation, forests and crops were monitored. A fully automated system for collecting, processing and distributing information is obtained.

Key words: agrometeorological surveillance, downscaling techniques, numerical models

1. Introducción

Los esfuerzos científicos para cubrir la creciente demanda de alimentos de la población, evitando el continuo deterioro del ambiente, precisan de un método que reconozca lo complejo del mundo real. Esta complejidad surge tanto de consideraciones de naturaleza físico-químico-biológicas, como también de factores socioeconómicos, culturales y políticos. Un método que incrementa la comprensión de los conceptos básicos y que al mismo tiempo organiza este conocimiento dentro de un marco dinámico y cuantitativo, es comúnmente conocido como Análisis de Sistemas o Investigación de Sistemas (*System Analysis* o *System Research*). Una parte de esta metodología, la cual es consecuencia de los avances tecnológicos de la computación y la ciencia de la informática, son las herramientas de apoyo para la integración del conocimiento adquirido en el ámbito disciplinario. Estas herramientas incluyen los modelos de simulación del crecimiento de las plantas y los procesos del suelo, los modelos de sistemas sociales y económicos, los Sistemas de Información Geográfica (SIG), y los sistemas de manejo de base de datos (Hernández *et al.*, 2009).

Muchas de las técnicas de predicción agrometeorológica se fundan en la relación estadística que existe entre las variables dependientes que han de ser estimadas (rendimiento de la cosecha, fecha de floración, etc.) y las variables agrometeorológicas independientes (precipitación, temperatura), o las variables deducidas (índice de humedad del suelo, influencia de la humedad atmosférica). Las variables independientes o elementos predictores pueden con frecuencia ser elegidas fácilmente por experiencia agrometeorológica o por intuición. Cuando diferentes variables están interrelacionadas las variables dominantes pueden ser elegidas mediante el análisis de regresión multivariante. Se trata necesariamente de un planteamiento práctico que lleva a predicciones plenamente satisfactorias, pero que requiere una importante aportación empírica. Esto también implica una fundamental carencia de comprensión del impacto total que todos los factores ambientales ejercen de manera compleja en los factores del cultivo que han de estimarse. Por consiguiente, no se da explicación alguna de causa o efecto; dicha explicación sigue siendo objeto de más trabajos de investigación. El método requiere únicamente conocer los factores persistentes más importantes que afectan al estado del cultivo en lugar de las predicciones a largo plazo de su situación, de las que actualmente no se puede disponer con suficiente detalle y precisión (Solano, 2003).

No debe olvidarse que en todos los casos se trata de organismos vivos. El método no puede ser transferido de una región a otra, ya que las variables agrometeorológicas son homogéneas en el espacio únicamente en zonas limitadas que tengan el mismo tipo de suelo, topografía, clima, prácticas de cultivo, etc. Por consiguiente, las relaciones de predicción (ecuaciones lineales o cuadráticas) varían de una región a otra. Para hacer frente a esta inconsecuencia de variación, sería preciso poseer un perfecto conocimiento de las interrelaciones físico – biológicas. Esto a su vez requeriría la observación de otros elementos ambientales (por ejemplo, el CO₂, el flujo de calor y de vapor de agua), quizás con una precisión de medida superior a la hoy conocida. En todo caso, los recursos económicos, financieros o humanos impedirán la realización de estas observaciones para que puedan servir de datos asimilables, de modo que las técnicas de predicción empírico - estadísticas continuarán siendo de gran utilidad.

Los principios en que se fundan dichas predicciones agrometeorológicas pueden ser postulados de la siguiente manera (Robertson, 1974 citado por Solano, 2003):

- a) Las condiciones actuales de los cultivos pueden ser evaluadas a partir de los datos del tiempo pasado para determinar hasta cierto punto su capacidad de producción;
- b) La humedad del suelo puede ser estimada a partir de los datos del tiempo pasado y es una de las variables ambientales más importantes para determinar la calidad y cantidad de las cosechas;
- c) Las condiciones meteorológicas presentes tienen la tendencia de persistir en el futuro durante cierto número de días y, por consiguiente, tienden en sentido estadístico hacia la normal, con una probabilidad de distribución conocida;
- d) La distribución de probabilidad de los elementos meteorológicos más importantes puede ser utilizada para determinar los probables cambios futuros con respecto a las condiciones actuales del cultivo, así como su capacidad potencial de producción;
- e) Los elementos meteorológicos, especialmente la temperatura y radiación, son conservativos en lo que respecta a su distribución en gran escala, de modo que los registros meteorológicos, incluso los correspondientes a un número limitado de estaciones de observación, pueden ser utilizados para estimar los rendimientos y producción en un área relativamente grande.

La utilidad de las ecuaciones estadísticas representativas de las relaciones cultivo - tiempo meteorológico ha sido ya demostrada, especialmente con respecto a las cuatro aplicaciones siguientes (Baier, 1977 citado por Solano, 2003):

- a) evaluación del rendimiento previsto de las cosechas en amplias regiones;
- b) análisis agroclimático de la producción de los cultivos;
- c) evaluación de las reacciones del cultivo ante los elementos meteorológicos;
- d) evaluación del impacto ejercido por las variabilidades climáticas naturales o causadas por el hombre, en el rendimiento de los

cultivos. Las técnicas utilizadas para estimar las cosechas han sido y continúan siendo vitales para la predicción mundial de recursos alimentarios. El éxito de su aplicación muestra la utilidad que tienen en otros aspectos de la predicción agrometeorológica (Figura 1).

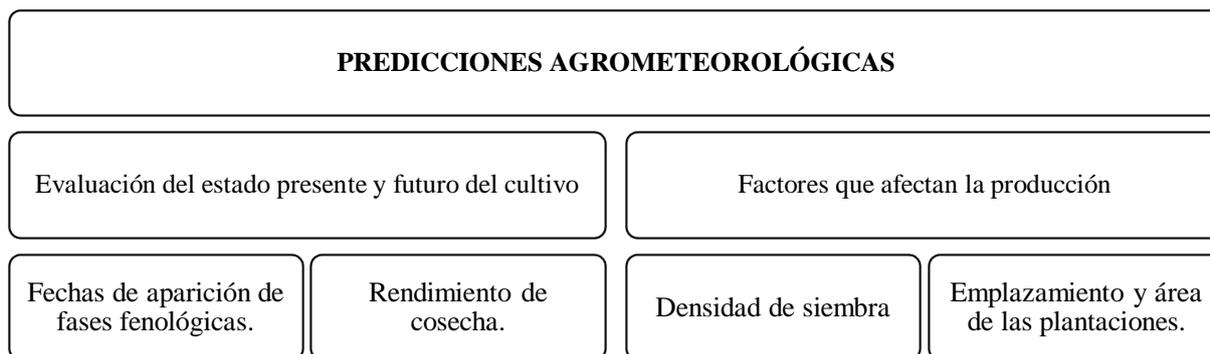


Fig.1. Variantes de predicciones agrometeorológicas

La incorporación de los métodos dinámicos en la predicción meteorológica regional/local tiene grandes repercusiones socioeconómicas, especialmente en el sector agropecuario y abre la posibilidad de su incorporación en las aplicaciones agrometeorológicas. En muchos casos, las demandas se centran en informaciones destinadas a escalas geográficas más reducidas y plazos más extendidos (climáticos). Así, en los últimos años se han incorporado el uso de las salidas de los modelos numéricos globales en el servicio agrometeorológico operativo (Oliveira, 2007).

De acuerdo con (Wang, 1967) citado por (Solano, 2003), la predicción agrometeorológica podría ser quizás denominada ‘predicción de los cultivos sin predicción meteorológica’ ya que utiliza los datos meteorológicos reales pasados y presentes (y no sus valores extrapolados en el futuro) para predecir la evolución futura del cultivo. Este método se basa en dos principios: a) la continuación de la actual inercia del cultivo (por ejemplo, estado general de salud y buena situación) y su medio ambiente (es decir, el clima general de la zona en que se desarrolla el cultivo); b) la dependencia de la actual inercia del cultivo con respecto a las condiciones meteorológicas presentes y pasadas.

La predicción del tiempo, realizada a escala regional, es la herramienta fundamental para la planificación de labores agrícolas. Esto implica la disponibilidad de predicciones locales, utilizando técnicas de predicción numérica, junto con un profundo conocimiento del medio.

Un modelo es un bosquejo que representa un conjunto real con cierto grado de precisión y en la forma más completa posible, pero sin pretender aportar una réplica de lo que existe en la realidad. Los modelos son muy útiles para describir, explicar o comprender mejor la realidad, cuando es imposible trabajar directamente en la realidad en sí (Wadsworth, 2008 citado por Hernández *et al.*, 2009).

Apuntan Hernández *et al.* (2009) a que el uso de modelos, a veces llamado “modelación”, es un instrumento muy común en el estudio de sistemas de toda índole. Los modelos son especialmente importantes, porque ayudan a comprender el funcionamiento de los sistemas. El empleo de modelos facilita el estudio de los sistemas, aun cuando estos puedan contener muchos componentes y mostrar numerosas interacciones, como puede ocurrir si se trata de conjuntos bastante complejos y de gran tamaño. El trabajo de modelación constituye una actividad técnica como cualquiera otra, y dicha labor puede ser sencilla o compleja, según el tipo de problema específico que deba analizarse.

De acuerdo con (Amador y Alfaro, 2009), los modelos numéricos atmosféricos son básicamente representaciones de los procesos dinámicos y físicos que se producen en la atmósfera terrestre. Esta tarea implica generalmente la utilización y disponibilidad de una importante capacidad de cómputo. Lobato *et al.* (2015) concluyen que el uso de los modelos numéricos de la atmósfera permite hacer estudios de diagnóstico en diferentes escalas tanto espaciales como temporales y que esta herramienta también es de utilidad para generar escenarios tanto meteorológicos como climáticos que pueden ser de utilidad para planeación integral del uso y manejo de los recursos naturales. No obstante, están todavía lejos de representar la realidad al detalle (Carreño, 2013).

De ahí que el objetivo general de esta investigación sea diseñar un servicio agrometeorológico destinado a la evaluación y pronóstico de condiciones sustentado en un sistema automatizado para la generación y distribución del mismo a diferentes escalas geográficas.

Mientras que como objetivos específicos se proponen:

1. Definir los parámetros, variables o índices que desde el punto de vista agrometeorológico resulten válidos

para la predicción.

2. Establecer las bases para optimizar la productividad mediante una adecuada distribución espacial de especies de interés agropecuario, facilitando la asistencia técnica.

2. Materiales y métodos

2.1. Fuentes de datos

Se emplearon tres fuentes básicas de datos de entrada: (i) Observaciones trihorarias procedentes de la red de estaciones meteorológicas del Centro de Instrumentos y Métodos de Observación (CIMO), perteneciente al Instituto de Meteorología de la República de Cuba, (ii) Observaciones provenientes de la red informativa del Instituto de Recursos Hidráulicos y (iii) Datos de las salidas de un modelo numérico dinámico de dominio público.

El modelo sinóptico del cual se han tomado los datos para realizar este trabajo es el GFS (*Global Forecast System*) (Environmental Modeling Center, 2013). Este es un modelo espectral con un horizonte espectral de resolución triangular de 254 (T254), una malla de 768x384 puntos. En vertical tiene 64 niveles sigma desigualmente espaciados, con mejor resolución cerca de la parte inferior y de la parte superior. Para hacernos una idea dispone de 15 niveles por debajo de los 800 hPa y 24 niveles por encima de 100 hPa.

2.1.1 Observaciones meteorológicas

Se emplearon los datos de 68 estaciones meteorológicas pertenecientes a la red de estaciones de observación del Instituto de Meteorología de la República de Cuba. Las observaciones se realizan de acuerdo con lo establecido por la Organización Meteorológica Mundial (OMM).

2.1.2 Observaciones pluviométricas

Se emplearon los datos diarios de acumulado de precipitaciones provenientes de las estaciones pluviométricas de la red informativa del Instituto de Recursos Hidráulicos.

2. Índices agrometeorológicos seleccionados

La selección se estableció para los siguientes criterios:

- a) Índices de uso nacional.

Se adoptó esta consideración debido a la existencia de índices que combinan variables meteorológicas con biológicas (entiéndase número de individuos, tasa de mortalidad o natalidad), fitosanitarias (ejemplo, índices de infestación) o agrometeorológicas, cuyo uso no sería posible en aquellos centros donde no se contara con este tipo de información.

- b) Las variables a partir de las cuales se calculan los índices se deriven directa o indirectamente de las observaciones meteorológicas.

Dicha condición garantiza mayor facilidad en el trabajo, debido a que no se emplearían datos procedentes de observaciones realizadas fuera del horario establecido para ello.

En todos los casos, las predicciones fueron orientadas hacia los factores que afectan la producción agropecuaria, en el caso de los pronósticos de las plagas y enfermedades de los cultivos, se adoptaron:

2.2.1 Vigilancia fitosanitaria

- a) Pronóstico de las condiciones de riesgo de Moho azul (*Peronosporatabacina* Adam) (*P. hyoscyami* de Bary f. sp. *tabacina*) se emplea el Índice de Peligrosidad Modificado (IPM) de acuerdo con Rodríguez y Gómez (1991) y (Rodríguez *et al.*, 1984).
- b) Pronóstico de las condiciones para la aparición y desarrollo del tizón tardío de la papa (*Phytophthora infestans* (Mont.) de Bary) (metodología de Hyre), basada en la detección de un día favorable al tizón.

2.2.2 Vigilancia biometeorológica

Para las evaluaciones de las condiciones de confort animal adoptó el índice de temperatura y humedad (ITH) propuesto de Nienabar y Hahn (2007) y Mujica (2005) citados por Aguilar (2006), mediante el índice de temperatura y humedad.

Para la vigilancia de condiciones de peligro meteorológico para la ocurrencia de incendios en la vegetación, los bosques y los cultivos fueron elegidos los índices de Nesterov modificado y Monte Alegre. La determinación

del peligro por el primer método, el cual se utiliza hoy en Cuba, se realizó por la metodología adoptada en 1994 como resultado de investigaciones hechas por el Instituto de Investigaciones Forestales.

Los modelos sinópticos tienen baja resolución en los límites horizontales y una ruda representación de la orografía (Wigley *et al.* 1990; Storch *et al.* 1993). Todo esto hace que sea necesario utilizar técnicas específicas de regionalización o *downscaling* para obtener resultados apropiados a meso-escala (Carreño, 2013).

Se emplearon como variables meteorológicas, la presión atmosférica, las temperaturas del aire y del punto de rocío; todas predichas/obtenidas a partir de dos modelos de pronóstico: el MEC – PT (Mesoescala de Cuba – Pronóstico del Tiempo), para la red de estaciones meteorológicas de Cuba (Moya y Estrada, 2007).

Básicamente el algoritmo de trabajo se propuso para dos casos: diagnóstico y pronóstico. Se asumen el diagnóstico como la variante de predicción agrometeorológica sin predicción meteorológica ya explicado previamente; mientras que el pronóstico si incluye la marcha futura de las variables.

A partir de los valores de presión atmosférica y de punto de rocío pronosticados, se calculó la humedad específica para cada estación (1).

$$S = \exp\left(\frac{1936.4 - 235 \cdot \ln(P) + t_d \cdot (25.34 - \ln(P))}{t_d + 235}\right) \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

S - Humedad específicas al nivel de la estación, g.kg⁻¹.

td - Temperatura del punto de rocío pronosticada, °C.

P - Presión atmosférica al nivel de la estación pronosticada, hPa.

Una vez calculada la humedad específica se redujo su valor al nivel medio del mar con ayuda de la fórmula de Ziuring (Matveev, 1984):

$$S_0 = \frac{S}{10^{\frac{-h}{9} - \frac{h^2}{120}}} \quad \text{Ecuación 2}$$

Aquí h es la altura de la estación (m).

Obtenido el valor de la humedad específica para cada estación de la red nacional, se conformó una malla irregular de puntos (figura 2) al combinarse con los valores tomados de la salida numérica del modelo GFS.

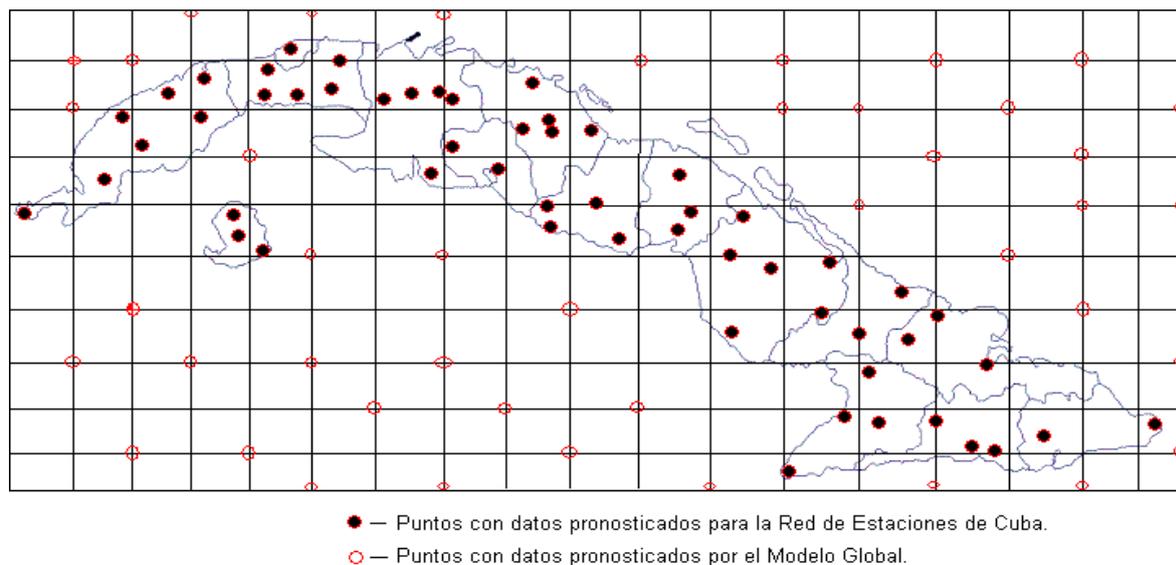


Fig. 2. Malla irregular construida a partir de los valores de la humedad específica reducida al nivel medio del mar

Para convertir la malla mostrada en la figura 2 en una malla regular de puntos se procedió a aplicar un método de análisis matemático (Press *et al.*, 1993). El escogido fue el método de Shepard y consiste en la definición de una función de interpolación $f(x)$ ponderada por sus ordenadas f_i (valores de las variables en los puntos dispersos):

$$f(x) = \sum_{i=1}^N \omega_i(x) f_i \quad \text{Ecuación 3}$$

$f(x)$ - Función de interpolación que arroja como resultado los valores de la variable en los nuevos puntos como resultado de la interpolación.

N - Cantidad de puntos dispersos.

$f_i = f(x_i)$ Valores en los puntos dispersos.

$\omega_i(x) = \frac{\sigma_i(x)}{\sum_{j=1}^N \sigma_j}$ - Función que define los pesos en el proceso de ponderación de los puntos para realizar la interpolación.

$\sigma_i(x) = \frac{1}{d_i(x)^{\mu_i}} = \frac{1}{[(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2]^{\frac{\mu_i}{2}}}$ $\mu_i \in \mathfrak{R}^+$ - Es una potencia (μ_i) del inverso de la distancia euclidiana ($d_i(x)$).

Este es un tipo de método de inverso de distancia ponderada, es decir, que entre más grande sea la distancia entre x y x_i , es menor la influencia que tiene f_i sobre el valor de f en el punto x .

Al finalizar la interpolación se obtuvo una nueva malla con una distribución uniforme de los puntos, dispuestos a una distancia de 10 km tanto en el eje X como en el eje Y (figura 3).

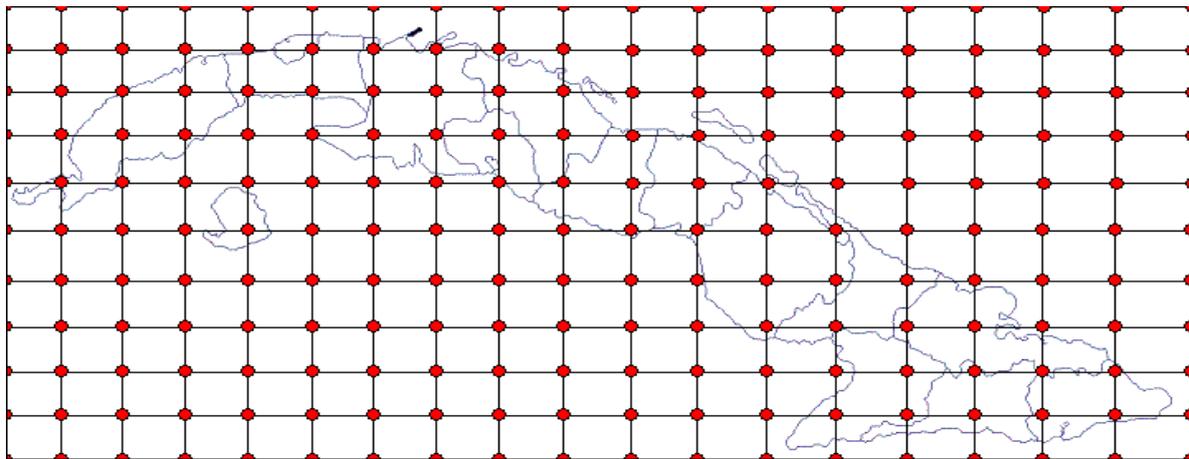


Fig. 3. Malla regular obtenida con ayuda del método de análisis matemático objetivo de Shepard

Posteriormente se calcularon los valores de humedad específica a la altura sobre el nivel del mar de los nodos de la nueva malla regular, invirtiendo los términos de la fórmula 3. El nuevo valor del punto de rocío a la altura sobre el nivel del mar de cada nodo de la malla regular se obtuvo con ayuda de la fórmula 5, luego de despejar la fórmula 2.

$$t_d = \frac{235 \cdot \ln(S \cdot P) - 1936.4}{25.34 - \ln(S \cdot P)} \quad (5)$$

La altura sobre el nivel del mar da cada nodo de la malla regular a una resolución de 10 km fue determinada previamente con ayuda del sistema MapInfo Professional versión 7.5 y del Atlas Nacional de Cuba (Ibarra *et al.*, 1978).

Reducción al nivel medio del mar de la temperatura pronosticada para las estaciones meteorológica de la red nacional

Se empleó la ecuación de estática, modificada sobre la base de la ecuación de estado para el aire no saturado (6):

$$T_0 = -0.06815 \bullet \left(\left[\frac{h_{est}}{\ln\left(\frac{P_1}{P_0}\right)} + 14.6730T_{est} \right] \right) \quad (6)$$

Donde:

T_0 Temperatura reducida al nivel medio del mar, K.

T_{est} Temperatura en el nivel de la estación, K.

h_{est} Altura en el nivel de la estación, m.

P_i, P_0 Presión al nivel de la estación y reducida al nivel del mar respectivamente, hPa.

En este último caso, los datos fueron adquiridos del sitio http://nomad6.ncep.noaa.gov/ncep_data/index.html, (última actualización del 1 de septiembre de 2006) y comprendieron desde los 12.5° hasta los 32.5° de latitud norte, 70° a 90° longitud oeste; mientras que la salida final se enmarcó entre los 19.74° y 23.43° latitud norte y los 73.86° y 85.06° longitud oeste.

La aplicación se desarrolló sobre lenguaje de programación JAVA, en la plataforma de desarrollo o entorno de desarrollo integrado Eclipse versión 3.3.

3. Resultados y discusión

Las experiencias previas en Cuba se basan en el uso de pronósticos nacionales de los Centros de Clima y Meteorología Agrícola y en el uso de pronósticos internacionales del IRI, CPC, ECMWS y otros, tomando en cuenta para ellos la posible evolución de la circulación atmosférica, de la precipitación y la evaluación de amenazas (Vázquez et al., 2015). Este acoplamiento no se encuentra totalmente automatizado.

Los servicios se estructuraron tal y como se muestra en las figuras 5 y 6. Se asumió lo propuesto por (Hoschek y Lasser, 1993), quienes recomendaron que $\mu_i = \mu = 2$, en aras de *facilitar minimizar la complejidad computacional en el proceso. Estos autores precisan que esta selección causa que la distancia entre los puntos tenga una mayor influencia en el algoritmo, y agregan que “para valores muy grandes de N, puede conducir a inestabilidad numérica”*.

En este caso, dicha situación no constituye un problema ya que los puntos dispersos a interpolar solamente ascienden a 68 (cantidad de estaciones en la red nacional de meteorología) y la malla regular a obtener como resultado de la interpolación contiene 118X44 puntos (relativamente pocos).

Sobre los criterios para la selección de los índices agrometeorológicos, desde el punto de vista fitosanitario se presupone que tanto el hospedante como el hospedero se encuentran y el procedimiento solamente se aspira a la caracterización de condiciones para el desarrollo del mismo. Así se tomaron como referentes enfermedades endémicas como el Moho azul, ya que asume la presencia del agente causal y hospederos durante todo el año.

Algunos índices con posibilidades de aplicación incluyen en su estimación parámetros propios del comportamiento de la plaga/enfermedad, por ejemplo, el índice de infestación en el caso del pronóstico de las condiciones favorables para la araña roja del plátano (*Tetranychus tumidus* Bank.) (Martínez y Pérez, 1995). Dichos datos si bien pueden estar disponibles a través de las observaciones realizadas en las estaciones especializadas (tanto del servicio agrometeorológico, en el tercer modelo de los expedientes de campo referido al deterioro originado por plagas o enfermedades, o por las propias estaciones territoriales de protección de plantas de sanidad vegetal); con vistas a la automatización del servicio no se encuentran accesibles. En tal sentido, se requiere la integración de ambos sectores: Agrometeorología y sanidad vegetal.

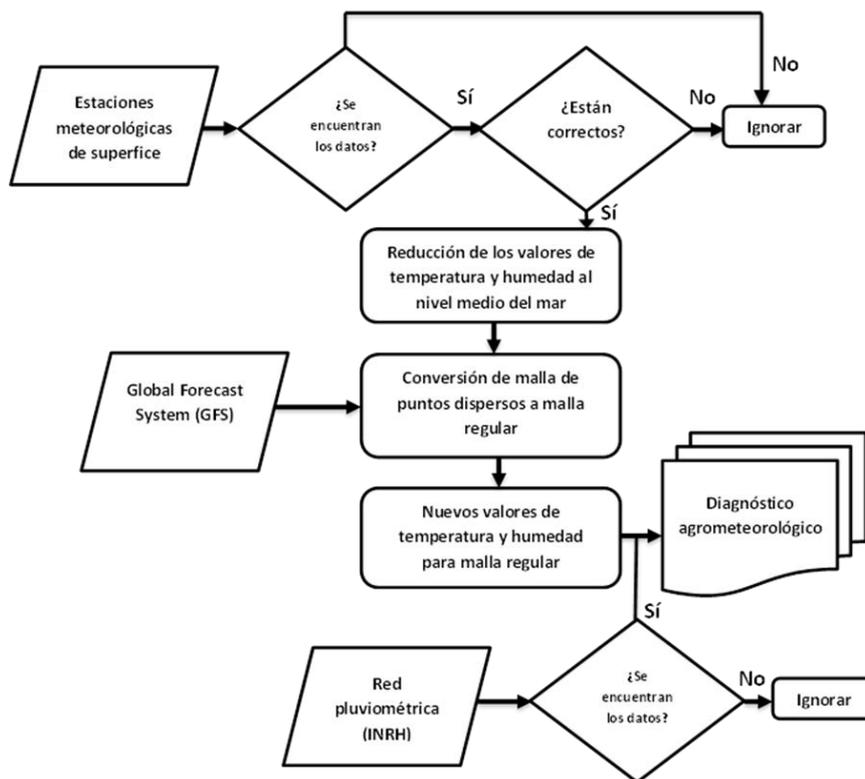


Fig. 3. Diagrama simplificado del procesamiento de la información para diagnóstico

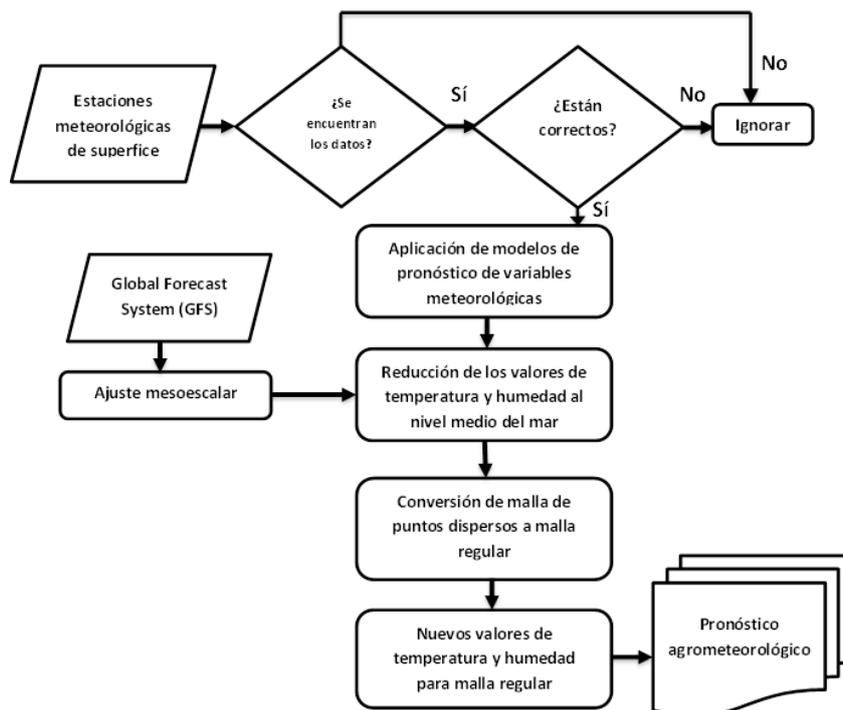


Fig. 4. Diagrama de procesamiento de la información para pronóstico

La efectividad es otro aspecto que debe considerarse en el momento de elaborar y difundir los servicios agrometeorológicos, específicamente cuando se trata de pronósticos, pues la verificación de una predicción es muy compleja y está sujeta a diversas y variadas dificultades. La atmósfera es un sistema caótico, sensible a las condiciones iniciales y que los errores desde el punto de partida se amplifican en los pronósticos; parte del detalle que se puede proporcionar en un pronóstico decrece con el tiempo (Belda, 2013). Debe considerarse que los datos iniciales de las “clásicas” predicciones del tiempo atmosférico cuentan con mecanismos para verificar el grado de cumplimiento, mediante la comparación más o menos compleja con los valores reales ocurridos.

En el caso de la meteorología agrícola, no resulta suficiente con extrapolar dicha variante, ya que se obviaría el componente agropecuario que integra la salida. Esta consideración, complejiza la evaluación ya que debe tenerse en cuenta las medidas adoptadas por los productores a partir de la información recibida (ejemplo, aplicación de productos fitosanitarios protectantes contra el desarrollo de hongos). Es importante considerar que la incorporación de las salidas de los modelos numéricos básicamente para la predicción conlleva a que el tratamiento de la incertidumbre debe ser manejada cuidadosamente, ya que a la habilidad del o los modelos se le suma aquella propia de los índices agrometeorológicos seleccionados.

Otro aspecto a considerar es la predicción operativa, la que considera la interpretación (humana) de las salidas (entiéndase mapas en este caso). Brizuela y Espoz (1986) señalan que en algunos casos, los mapas deben ser complementados por un analista quien incorpora los aspectos físicos no considerados.

Al respecto, en estudios realizados sobre la aplicación del GFS/NECP para la estimación de la evapotranspiración de referencia desarrollados por Oliveira (2007), este autor señala que el desempeño del modelo para el pronóstico de las variables meteorológicas fue bastante heterogéneo, tanto para las variables en sí como para los periodos. Apunta que la temperatura y el déficit de tensión de vapor de agua tienen mejor desempeño durante el periodo seco.

Las deficiencias de precisión de la predicción agrometeorológica dependen: a) de la fidelidad con que las observaciones iniciales representan las condiciones regionales; b) del grado de homogeneidad de las condiciones regionales (clima, características del suelo, etc.); c) de la precisión de las mismas observaciones; d) de la sensibilidad del modelo ante las fluctuaciones de la variable agrometeorológica que se trata de predecir.

Conclusiones

1. Se obtiene un sistema automatizado para la vigilancia agrometeorológica de varios índices agrometeorológicos, ajustados para Cuba con disímiles posibilidades de distribución y aplicación
2. El procedimiento propuesto permite delimitar la responsabilidad que tienen cada uno de los elementos que intervienen en la confección, interpretación y aplicación de los resultados contenidos en el pronóstico agrometeorológico.
3. La presentación de los resultados a través de representaciones gráficas como mapas permite su utilización inmediata aun por planificadores no familiarizados con su uso.

Referencias bibliográficas

- Aguilar Martínez, M., 2006. *Instituto Navarro de Tecnologías e Infraestructura Alimentaria S. A.* [En línea] Available at: <http://www.itg-ganadero.com/itg/portal/documentos.asp?Id=181> [Último acceso: 10 Septiembre 2015].
- Amador, J., 2011. *Predicción agrometeorológica y agricultura en Boyacá.* [En línea] Available at: <http://www.revistasjdc.com/main/index.php/ccient/article/view/22> [Último acceso: 19 Agosto 2015].
- Amador, J. A. & Alfaro, E. J., 2009. Métodos de reducción de escala: aplicaciones al tiempo, clima, variabilidad climática y cambio climático. *Revista Iberoamericana de Economía Ecológica*, Volumen 11, pp. 39-52.
- Belda, F., 2013. *Predicción meteorológica: Problemas clásicos y nuevos retos.* [En línea] [Último acceso: 24 Agosto 2015].
- Brizuela, A. B. & Espoz, C., 1986. Avances sobre el análisis digital en agrometeorología. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 7(1), pp. 63-70.
- Carreño Madinabeitia, S., 2013. *Aplicaciones en meteorología de modelos funcionales de predicción en componentes principales.* Granada: Universidad de Granada, Departamento de Estadística e I.O..
- Environmental Modeling Center, 2013. *NCEP Office Note 442: The GFS Atmospheric Model*, Washington D.C.: s.n.
- Hernández, N., Soto, F. & Caballero, S., 2009. Modelos de simulación en cultivos. *Cultivos Tropicales*.
- Hoschek, J. & Lasser, D., 1993. *Fundamentals of computer aided geometric design.* s.l.:s.n.
- Ibarra Martín, C. M., Vega Briones, R. & Espinosa Goitzolo, R. eds., 1978. *Atlas de Cuba. XX Aniversario del triunfo de la Revolución Cubana.* La Habana: Instituto Cubano de Geodesia y Cartografía.
- Lobato Sánchez, R., Rodríguez López, O. & Mendoza Uribe, I., 2014. El uso de los modelos numéricos de mesoescala en México: un ejemplo de aplicación. *Revista Digital Universitaria*, diciembre, 4(7), p. 12.

- Matveev, L. T., 1984. *Física de la atmósfera*. Leningrado: Gidrometeoizdat.
- Moya Álvarez, A. S. & Estrada Moreno, A., 2007. *Pronóstico de cobertura espacial y cantidad de precipitaciones. Un acercamiento al pronóstico probabilístico de tormentas locales severas*. Santa Clara, Centro Meteorológico Provincial de Villa Clara, p. 5.
- Oliveira Filho, C. L. d., 2007. *Prognóstico das variáveis meteorológicas e da evapotranspiração de referência com o modelo de previsão do tempo GFS/NCEP*. Piracicaba: s.n.
- Press, W. H., Flannery, B. P., Teukolsky, S. & Vetterling, W. T., 2007. *Numerical Recipes in C++: The Art of Scientific Computing*. Tercera ed. s.l.:Cambridge university press.
- Rodríguez, J., Gómez, G. & Trujillo, R., 1984. Pronóstico a corto plazo del moho azul del tabaco en Cuba. *Ciencia y Técnica en la Agricultura. Protección de Plantas*, 7(4), pp. 103-116.
- Rodríguez, J. & Gómez, G., 1991. Pronóstico a largo plazo del moho azul del tabaco causado por Peronospora tabacina en Cuba. *Ciencia y Técnica en la Agricultura*, 8(1), pp. 53-71.
- Solano Ojeda, O. G., 2003. *Conferencia Maestría en Ciencias Meteorológicas. Capítulo VI. Información, predicciones y avisos para la agricultura y la silvicultura*. La Habana, Centro Nacional de Meteorología Agrícola, Instituto de Meteorología, p. 26.
- Vázquez Montenegro, R. y otros, 2015. Análisis de estrategia de información y divulgación agrometeorológica para llegar a los productores. *Revista Iberoamericana de Bioeconomía y Cambio Climático*, 1(1), pp. 51-71.

Acerca de los autores:

Ismabel María Domínguez Hurtado: Master en Ciencias Meteorológicas (2013, Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas). Ingeniera Agrónoma (1998, Universidad Central *Marta Abreu* de Las Villas). Investigadora auxiliar, ejerce como Subdirectora técnica del Centro Meteorológico Provincial de Villa Clara. Profesora de la Facultad de Ciencias Agropecuarias y Secretaria del Consejo Científico del sistema CITMA en Villa Clara. Se desempeña como Corresponsal en Cuba de la Sociedad Internacional de Meteorología Agrícola (INSAM).

Aldo Saturnino Moya Álvarez: Ingeniero meteorólogo graduado en el Instituto Hidrometeorológico de Odesa, Ucrania. Doctorado en Ciencias Meteorológicas, del Instituto de Meteorología de Cuba (2003). Desarrolla trabajos de investigación en el área de modelación numérica, dirigida a los pronósticos meteorológicos. Actualmente es especialista principal del grupo de pronósticos del Centro Meteorológico de Villa Clara.

Alejandro Estrada Moreno: Doctor en Ingeniería Informática y Matemática por la Universitat *Rovira i Virgili* de Tarragona, España (2016), Máster en Ciencias Matemática (2010) y licenciado en Ciencia de la Computación (2006) por la Universidad de La Habana. Ha trabajado en el Centro Meteorológico Provincial de Villa Clara en el desarrollo de modelos numéricos de pronóstico del tiempo, Agrometeorológicos y Biometeorológicos. Actualmente, es investigador del grupo de Matemática Discreta del Departament d'Enginyeria Informàtica i Matemàtiques de la Universitat *Rovira i Virgili* de Tarragona. Su ámbito de investigación actual es la Teoría de Grafos y la Combinatoria.