



Foto: Río Magdalena – Fuente: Mario Moreno

PRONÓSTICO HIDROLÓGICO EN LAS ÁREAS DE INTERÉS DE ECOPETROL EN EL VMM

INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES

SUBDIRECCIÓN DE HIDROLOGÍA

GRUPO DE MODELACIÓN Y PRONÓSTICO HIDROLÓGICO

2023



PRODUCTO FINAL

Pronóstico hidrológico en las áreas de interés de ECOPETROL en el VMM



	Versión	Nombre	Cargo	Fecha
Autor	1	Mario Moreno Castiblanco Saúl Buitrago Díaz	Contratistas IDEAM	10/07/2023
Revisó		Juan José Montoya Monsalve Maria Costanza Rosero	Contratista IDEAM – Líder Técnico Profesional Especializado y Administradora del Sistema FEWS Colombia	24/07/2023
Aprobó		Fabio Andrés Bernal Quiroga	Subdirector de Hidrología	24/07/2023

Tabla de Contenido

1	Introducción	7
1.1	Antecedentes	7
1.2	Objetivo de la modelación hidrológica e hidráulica para pronóstico	8
1.3	Localización del área de interés	9
1.4	Estructura del documento	10
2	Actualización de la Cascada de Pronóstico del VMM en el Sistema FEWS Colombia	12
2.1	Marco Conceptual: El sistema Delft-FEWS	12
2.2	Metodología	17
2.3	Sistema FEWS Colombia	18
2.3.1	DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA	20
2.3.1.1	SISTEMA FEWS – COLOMBIA PARA EL RÍO MAGDALENA	22
2.4	Actualización de procesos dentro de FEWS Colombia para pronóstico	31
2.4.1	PRODUCTOS DESARROLLADOS PARA INCORPORAR DENTRO DE LA CASCADA DE PRONÓSTICO DE VMM	31
2.4.1.1	ACTUALIZACIÓN DE MODELOS HIDROLÓGICOS	32
2.4.1.2	ACTUALIZACIÓN DE MODELACIÓN HIDRÁULICA	39
2.4.1.3	ACTUALIZACIÓN DE PROCESOS PARA PRONOSTICO EN VMM - FEWS COLOMBIA	40
2.4.1.4	INCORPORACIÓN DE NUEVAS FUENTES DE INFORMACIÓN	43
2.4.1.4.1	PRODUCTOS MSWEP Y MSWX	43
2.4.1.4.2	ESTIMACIÓN DE EVAPOTRANSPIRACIÓN CON FINES DE PRONÓSTICO	48

2.4.1.4.3	ADECUACIÓN DE LOS NUEVOS MODELOS HIDROLÓGICOS AL SISTEMA FEWS COLOMBIA	52
2.4.1.4.4	ADECUACIÓN DEL NUEVO MODELOS HIDRÁULICO AL SISTEMA FEWS COLOMBIA	58
2.4.1.5	NUEVA CASCADA DE PROCESOS DENTRO DEL FEWS COLOMBIA	60
2.4.1.6	PUESTA A PRUEBA EN SISTEMA OPERACIONAL Y RESULTADOS.....	65
2.4.1.6.1	PRIMERA PRUEBA	65
2.4.1.6.2	SEGUNDA PRUEBA	67
2.4.1.6.3	TERCERA PRUEBA	68
2.4.2	RESULTADOS	69
2.5	Carga el sistema en el sistema operacional.....	71
2.6	Actualización de Manuales del FEWS Colombia	73
3	Conclusiones y Recomendaciones	74
3.1	Conclusiones.....	74
3.2	Recomendaciones.....	78
4	Bibliografía.....	81

Índice de figuras

Figura 1 Subzonas hidrográficas para considerar en la modelación con fines de pronóstico hidrológico (sin incluir la cuenca del río Magdalena aguas arriba de Puerto Berrio). Fuente: (IDEAM-ECOPETROL, 2021)	10
Figura 2 Estructura Esquemática de un sistema de pronóstico hidrológico y enlaces a otros servicios de importancia para el sistema operacional adaptado de (Werner, y otros, 2013)	13
Figura 3 Esquema de estructura para comunicación con procesos externos, https://publicwiki.deltares.nl/display/FEWSDOC/05+General+Adapter+Module	15
Figura 4 Algunas visualizaciones a través de la interfaz del sistema FEWS Colombia	16
Figura 5 Estructura Básica del Sistema FEWS Colombia	21
Figura 6 Porción del Programa Diario de Flujos de Trabajo en el FEWS Colombia	22
Figura 7 Tratamiento de la variable precipitación antes de la modelación hidrológica	25
Figura 8 Estructura del Modelo Hidrológico de la Zona de Influencia aguas arriba de Puerto Salgar	28
Figura 9 Resumen de aciertos de los Modelos del Magdalena Medio. Fuente: (IDEAM, 2018)	31
Figura 10 Desempeño de Modelos del Magdalena Medio. Fuente: (IDEAM, 2018)	31
Figura 11 Resumen de configuración e implementación de modelos para robustecer el pronóstico hidrológico. Fuente: (IDEAM-ECOPETROL, 2021)	34
Figura 12 Resultados en el período de calibración para la cuenca del Opon (en la estación Ayacucho). Datos Observados (negro), Media de los ensambles (rojo), Intervalos de confianza - 95% (en azul claro). Fuente: (IDEAM-ECOPETROL, 2021)	35
Figura 13 Resultados en el período de calibración para la cuenca del Sogamoso. Datos Observados (negro), Media de los ensambles (rojo), Intervalos de confianza - 95% (en azul claro). Figura de abajo detalle para el año 2006. Fuente: (IDEAM-ECOPETROL, 2021)	36
Figura 14 Resultados en el período de calibración para la cuenca la Colorada. Datos Observados (negro), Media de los ensambles (rojo), Intervalos de confianza - 95% (en azul claro). Figura de abajo detalle para el año 2006. Fuente: (IDEAM-ECOPETROL, 2021)	37
Figura 15 Comparación de Productos, obtenido de http://www.gloh2o.org/mswep/	44
Figura 16 Parte del código para descargar los productos GloH20 – MSWEP	45
Figura 17 Precipitación de MSWEP en el FEWS Colombia para 01 de marzo de 2022	46
Figura 18 Producto MSWEP por subzona hidrográfica	46
Figura 19 Producto MSWX Colombia para 01 de marzo de 2022	47
Figura 20 Producto MSWX por subzona hidrográfica	47

Figura 21 Comparación simple entre precipitación observada y la precipitación satelitales de los productos MSWEP(verde) y MSWX (rojo).....	48
Figura 22 Procesos para estimar la Evapotranspiración Potencial a partir de Hargreaves y Samani 1985..	50
Figura 23 Producto de evapotranspiración sobre el FEWS Colombia	52
Figura 24 Estructura Conceptual de los modelos de lluvia escorrentía. En este caso el GR4 (diaria y horario)	53
Figura 24 Extracto inicial del Preadaptador.....	55
Figura 25 Extracto del PosAdaptador.....	55
Figura 26 Parte de la estructura del documento de Configuración de la Simulación	56
Figura 27 Resultados Preliminares Modelo hidrológico GR4J Opón	58
Figura 28 Presentación esquemática del tramo del Valle Medio del Río Magdalena y representación de los tramos de los tres modelos hidrodinámicos solapados (Verde: tramo Puerto Salgar - Barrancabermeja, Azul – tramo Puerto Berrio – Sitio Nuevo, Sepia: Tramo Sitio Nuevo – El Banco)	59
Figura 29 Explicación esquemática de los cambios en el archivo de configuración del adaptador.....	60
Figura 30 Esquematación de los modelos del Río Magdalena	60
Figura 31 Comparación de los resultados de caudal en la estación de Barrancabermeja a través de la plataforma FEWS-Colombia y del modelo hidráulico calibrado de MIKE 11	66
Figura 32 Comparación de modelos acoplados y desacoplados despues de ajustes de las ventanas de simulación	67
Figura 33 – Condiciones de frontera de caudal de la plataforma FEWS.....	68
Figura 34 Algunos resultados de los modelos hidrológicos dentro del sistema FEWS Colombia (Stand Alone). Se observa la reproducción histórica (a mano izquierda de la línea roja) y el pronóstico (mano derecha de la línea roja).....	70
Figura 35 Algunos resultados de los modelos hidráulico dentro del sistema FEWS Colombia (Stand Alone). Se observa la reproducción histórica (a mano izquierda de la línea roja) y el pronóstico (mano derecha de la línea roja)	71

1 Introducción

1.1 Antecedentes

Este documento se construye con el objeto de establecer los avances en la modelación hidrológica e hidráulica orientada a la caracterización de las áreas de interés de Ecopetrol en la zona del Valle Medio del río Magdalena (VMM) en el marco del Acuerdo de Cooperación – AC No. 4 (3034153) derivado del Convenio Marco de Colaboración No. 5212957, cuyo objeto es: *“aunar esfuerzos técnicos, administrativos y financieros para el intercambio de conocimiento científico e información, y el desarrollo de productos y servicios que contribuyan al cumplimiento de las funciones, objetivos e intereses de las partes”*.

Este documento se inscribe en la Actividad 2.3.3 del acuerdo: *realizar la modelación Hidrológica e Hidráulica orientada a la caracterización de las áreas de interés de Ecopetrol en las subzonas hidrográficas Sogamoso, Opón y Lebrija Medio - Bajo (incluido tramo río Magdalena). Así también, realizar la evaluación del pronóstico hidrológico en los modelos implementados en FEWS para tal fin en las áreas de interés en mención*. Estas actividades están asociadas a las actividades del Grupo de Modelación y Pronóstico Hidrológico de la subdirección de Hidrología del IDEAM.

El sistema Delft-FEWS, es una plataforma creada para gestionar procesos para llevar a cabo pronósticos, así como la gestión de series de tiempo. A raíz de los eventos en el año 2010 y 2011, el Gobierno Nacional de Colombia solicitó apoyo técnico al gobierno de los Países Bajos. La misión holandesa de apoyo identificó la necesidad de que Colombia tuviese de un sistema de alerta temprana para el tema de inundaciones. Es así como un conjunto de instituciones colombianas y holandesa comenzaron el desarrollo del sistema FEWS Colombia, como parte de un programa de cooperación para el intercambio de conocimiento sobre la gestión del riesgo bajo el marco de gestión integral del agua.

“Desde el 2014 a la fecha se han acoplado alrededor de 20 modelos, entre hidráulicos, hidrológicos y estadísticos. Estos modelos proveen el pronóstico hidrológico en más de 90 de puntos de monitoreo del IDEAM, CAR y CVC con un horizonte de pronóstico de 3 días. Estos modelos generan pronóstico para los cauces principales de los ríos Magdalena, Cauca, Meta, San Jorge, Lebrija, La Vieja, ente otros” (IDEAM, 2019).

En el año 2021 se inician en el IDEAM las actividades orientadas a la caracterización de las áreas de interés de Ecopetrol en la zona del Valle Medio del río Magdalena (VMM) en el marco del acuerdo de cooperación. Para alcanzar el objetivo propuesto en el Acuerdo, se contemplan la ejecución de actividades que permitan: i) mejorar el monitoreo, pronóstico y generación de alertas hidrometeorológicas y de calidad de agua superficial, ii) determinar el estado actual y proyectado del recurso hídrico superficial; iii) fortalecer la capacidad técnica de la Corporación Autónoma Regional de Santander -CAS en temas de monitoreo del recurso hídrico superficial; y iv) adelantar un plan de divulgación y comunicaciones sobre el estado y comportamiento del recurso hídrico superficial en el VMM

1.2 Objetivo de la modelación hidrológica e hidráulica para pronóstico

El objetivo de un sistema de alerta temprana es poder emitir una alerta con suficiente antelación para que las entidades gubernamentales (nacional, regional o local) puedan emprender acciones que permitan evitar la pérdida de vidas humanas y reducir los daños en infraestructuras. En tal sentido, y teniendo en cuenta los eventos extremos de inundación ocurridos en el período 2010 – 2011, el gobierno de Holanda, a través de una misión holandesa que visitó el país, identificó la necesidad de que Colombia dispusiera de un Sistema de Alerta Temprana en el tema de inundaciones. A partir de cooperación de instituciones colombianas, lideradas por el IDEAM, y holandesas, liderada por DELTARES, se desarrolló un proyecto que dio origen a la plataforma FEWS – Colombia, la cual es actualmente utilizada para la predicción de inundaciones (alertas) de forma operativa.

Para poder contar con un sistema de alerta temprana efectivo, en la plataforma FEWS – Colombia de pronóstico se debe contar con modelos hidrológicos e hidráulicos calibrados, los cuales permitirán simular niveles y caudales en estaciones hidrológicas instaladas en los cuerpos de agua del país. Los niveles de pronóstico son generalmente utilizados para definir los niveles de alerta de sequías, crecidas repentinas e inundaciones. Los modelos hidrológicos se basan en información hidrológica como precipitación, evapotranspiración, temperatura, características de las cuencas, etc., mientras que, los hidráulicos se basan en la escurrentía de los modelos hidrológicos, los caudales de los ríos y su configuración topológica (secciones transversales, rugosidades y estructuras hidráulicas).

1.3 Localización del área de interés

El río Magdalena tiene una longitud aproximada de 1540 km con un área tributaria de 2570000 km² incluyendo su principal afluente, el Río Cauca. En promedio, el río Magdalena descarga en su desembocadura en el mar Caribe, un caudal de 7100 m³/s.

En términos generales, la cuenca en su totalidad se caracteriza por presentar un comportamiento de tipo bimodal, con dos épocas de lluvias (abril-mayo y octubre-noviembre) y dos épocas secas (diciembre - enero y julio – agosto).

El área de interés corresponde a toda la zona de influencia hidrológica correspondiente entre las estaciones de Puerto Berrio (Código de Estación IDEAM: 23097030) y Sitio Nuevo (Código de Estación IDEAM: 23187280), las dos ubicadas en el departamento de Santander. Estas dos estaciones ocupan un tramo de río de 177 km aproximadamente. Con fines de pronóstico hidrológico se requiere evaluar la respuesta hidrológica aguas arriba de la estación Puerto Berrio y de las cuencas aportantes al río Magdalena, entre las estaciones antes mencionadas. En la Figura 1, se puede observar las cuencas, sin incluir la parte alta del río Magdalena, que tienen influencia hidrológica sobre el tramo en cuestión.

En río Magdalena en su tramo medio, se caracteriza fisiográficamente por presentar pendientes bajas, observándose un patrón de drenaje trezado y en algunas zonas de meandros (IDEAM, 2021). En el tramo de río a considerar, existen zonas con diferentes resistencias a los procesos fluviales observándose tramos con alta deposición (acreción) o erosión tal como se menciona en el producto 4 del proyecto (IDEAM-ECOPETROL, 2021). Se observan amplias zonas de acumulación en forma de barras, terrazas y llanuras de inundación. La sección del río en esta zona es bastante amplia y puede variar entre 200 y 500 metros.

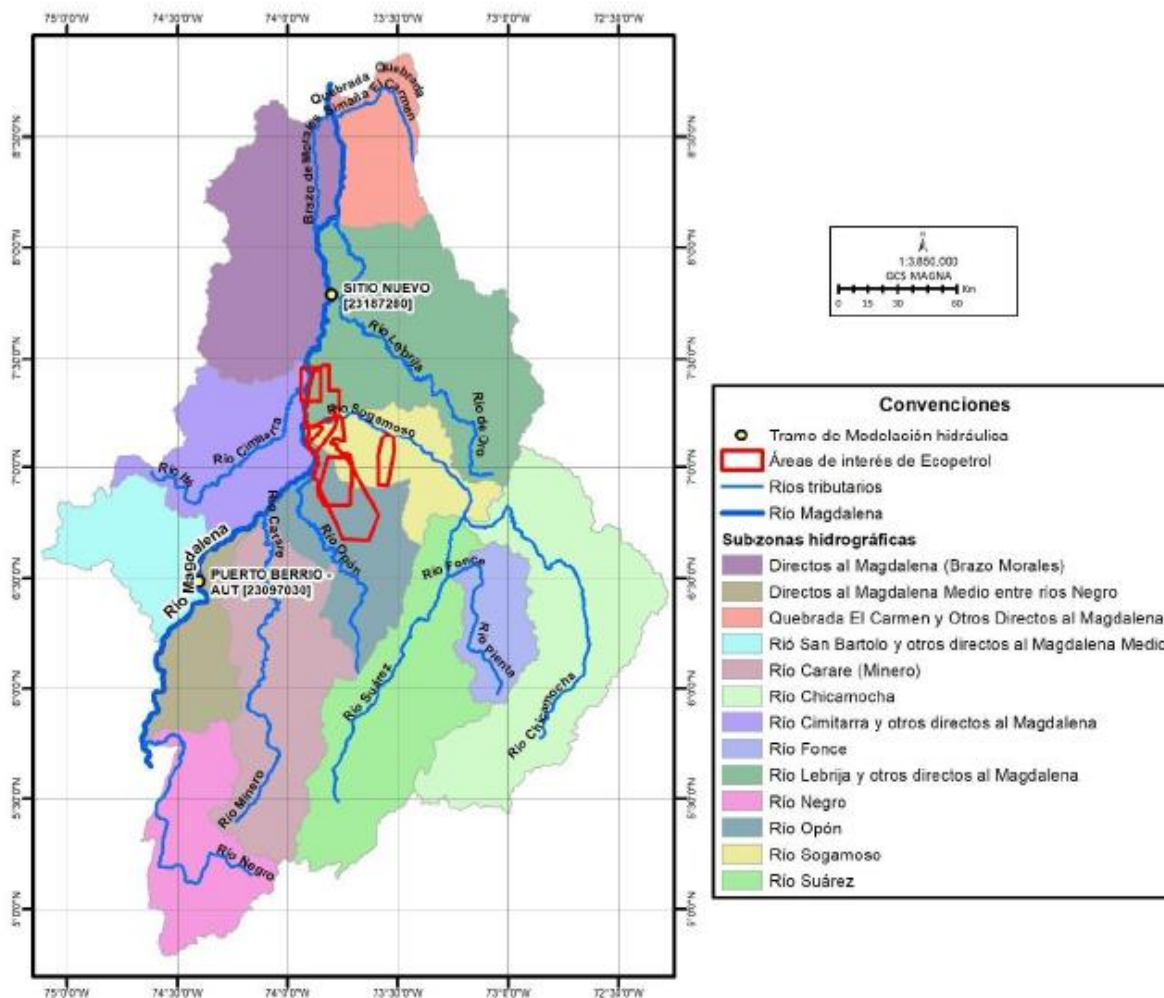


Figura 1 Subzonas hidrográficas para considerar en la modelación con fines de pronóstico hidrológico (sin incluir la cuenca del río Magdalena aguas arriba de Puerto Berrio). Fuente: (IDEAM-ECOPETROL, 2021)

1.4 Estructura del documento

El presente documento se encuentra dividido en 3 capítulos, incluyendo esta introducción. El capítulo 1 provee los antecedentes y bases del presente proyecto.

En el capítulo, se presenta una descripción detallada de todas las actividades y procesos que se realizaron para robustecer el sistema y cascada de pronóstico para el Valle Medio del río Magdalena. En este punto se ofrece una descripción del sistema FEWS Colombia, se presenta la metodología empleada para progresivamente realizar los ajustes dentro de la cascada de procesos del sistema FEWS Colombia. Se ofrecen detalles de los desarrollos realizados para incluir nuevas fuentes de información y alrededor de los modelos hidrológicos nuevos para incorporarlos en el

FEWS Colombia. Se finaliza con una explicación de las actividades realizadas para poner a prueba el sistema y su incorporación al sistema operativo.

Finalmente, el capítulo 3 presentan las conclusiones. Donde se enumera de manera resumida los logros obtenidos en el proyecto y así como hallazgos observados durante todo el proyecto. Además, se presenta una lista de recomendaciones a realizar de cara al futuro del sistema operacional para el pronóstico hidrológico del Valle Medio del Río Magdalena.

2 Actualización de la Cascada de Pronóstico del VMM en el Sistema FEWS Colombia

2.1 Marco Conceptual: El sistema Delft-FEWS

A nivel global se han desarrollado en muchas cuencas sistemas con capacidades de pronóstico hidrológico operacional y alerta temprana. En términos generales, los sistemas de pronóstico siguen 4 pasos claves relevantes: (i) detección, (ii) pronóstico, (iii) diseminación y alerta, y (iv) respuesta. Dentro de estos pasos claves, el Delft-FEWS se focaliza en el segundo paso, el pronóstico. El objetivo principal de este paso es el de proveer suficiente tiempo de anticipación a través de la predicción a corto plazo de las condiciones hidrometeorológicas. Estas predicciones son usadas posteriormente como guía para tomar decisiones como la emisión de alertas (Werner, y otros, 2013).

Los sistemas de pronóstico requieren tener las capacidades de integrar información en tiempo real de redes hidrometeorológicas de observación, y diseminar los resultados de las predicciones. Más aún, el uso de información en tiempo real amerita entonces la ejecución de rutinas, dentro del sistema, para el control de calidad de los datos. Así mismo, dentro de los sistemas operativos puede haber modelos hidrológicos e hidráulicos, o estadísticos, para realizar predicciones, y por lo tanto estos sistemas deben tener las capacidades para soportar la ejecución de estos modelos en tiempo real. Estos modelos hacen uso de información hidrometeorológica procesada a una escala temporal y espacial adecuada (Werner, y otros, 2013).

Para incrementar el tiempo de anticipación los sistemas pueden usar información de pronósticos meteorológicos como los provenientes de los modelos de predicción numérica del clima. Para ello, los sistemas operacionales deben tener desarrollados módulos de importación de datos proveniente de los modelos climatológicos (Werner, y otros, 2013).

En la Figura 2 se observa la estructura esquemática de las conexiones entre el sistema de pronóstico, los sistemas de adquisición de datos en tiempo real y los sistemas de diseminación de información.

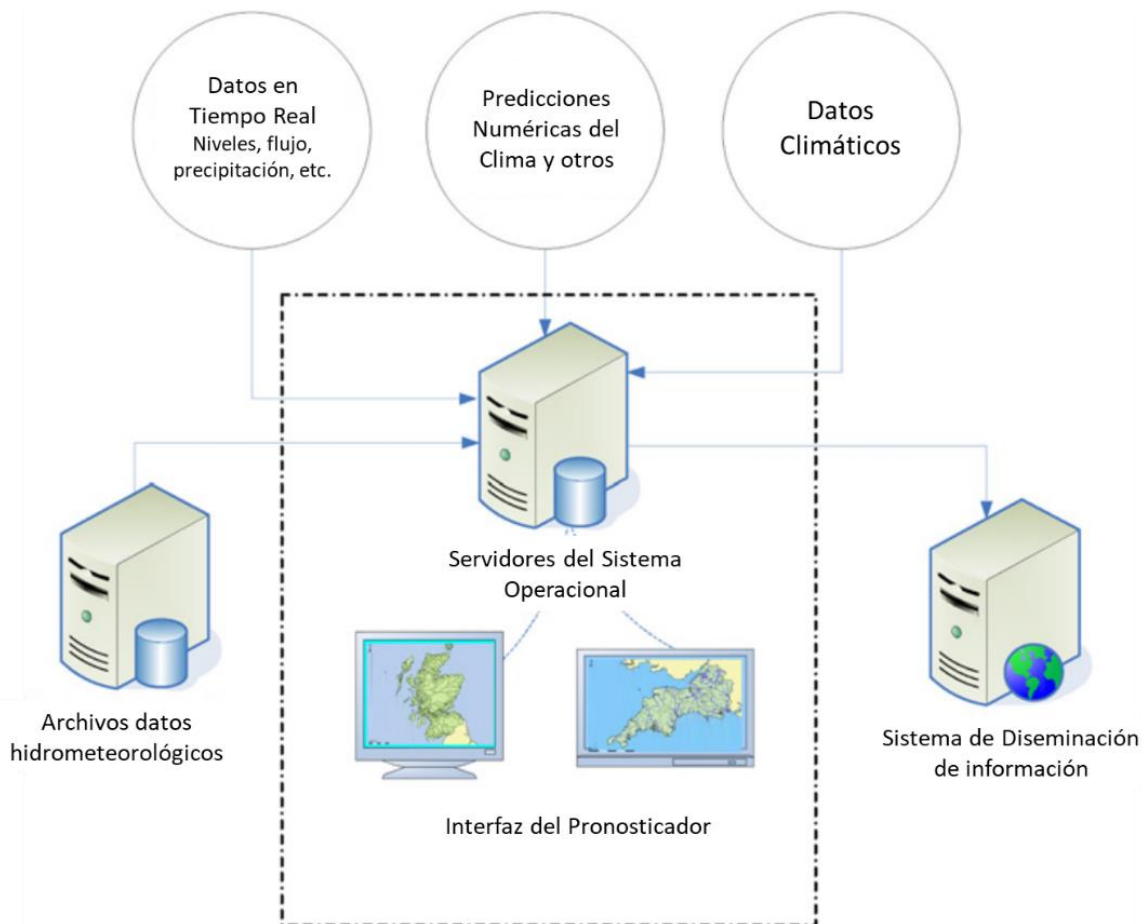


Figura 2 Estructura Esquemática de un sistema de pronóstico hidrológico y enlaces a otros servicios de importancia para el sistema operacional adaptado de (Werner, y otros, 2013)

Los sistemas operacionales de pronóstico además deben proveer una interfaz adecuada para que el equipo de pronosticadores consuma la información procesada por el sistema.

Como se mencionó anteriormente, el Delft-FEWS es una herramienta que se centra en el pronóstico operacional. Para ello sigue la filosofía de proveer un marco donde se puede desarrollar un sistema de pronóstico operacional específico a las necesidades y requerimientos de los centros de pronóstico operativos. El Delft-FEWS usa un concepto centrado en los datos, con un modelo de datos definido. Es decir, todas las series de tiempo (puntual/escalar y ráster/grilla) se almacenan en un modelo de datos común dentro de una base de datos. Las capacidades de procesamiento o de modelación son entonces enlazadas al sistema a través de interfaces desarrolladas alrededor de este modelo de datos.

Para incorporar información para el pronóstico, el Delft-FEWS tiene la capacidad de consumir información en múltiples formatos (csv, NetCDF, XML, GRIB, entre otros) y estructuras como

información de series de tiempo puntual (o escalar) o series de tiempo de grillas (ráster). Al ser consumida la información por el sistema, esta es almacenada en una base de datos. Adicionalmente, la base de datos posee información de “configuración”, la que incluye de información de estaciones (coordenadas, propiedades, capas de mapas, entre otras), y información dinámica (series de tiempo) desarrollada de manera interna por el sistema a través de la manipulación de las series de tiempo (hidrometeorológicas) que han sido incorporadas al sistema.

La manipulación, automática, de las series de tiempo es un requerimiento necesario para un sistema de pronóstico. En términos generales, los datos incorporados al sistema no se encuentran en la escala temporal o espacial requerida, por lo que es necesario de procesamientos de información adecuados que cumpla con los requerimientos de los modelos o de los pronosticadores. Para ello el sistema Delft-FEWS posee una librería de procesos para el procesamiento de series de tiempo (puntuales y ráster) que pueden incluir desde transformaciones de nivel a caudal, correcciones por sesgo usando modelos ARMA, funciones para el control de calidad de los datos, transformaciones genéricas, entre otras.

Para los casos en los cuales no se tiene una función disponible para manipular series de tiempo, o se requiere de modelación hidrológica o hidráulica, el Delft-FEWS permite ejecutar procesos externos. Para ello hace uso de un módulo que intercambia información a través de un formato de “interfaz de publicación” (un formato estándar de publicación de información) y que ejecuta los procesos de manera externa. El módulo hace uso de módulos llamados adaptadores que transforman los datos en formato de “interfaz de publicación” en un formato legible por el proceso externo, y adicionalmente ejecutan los modelos.

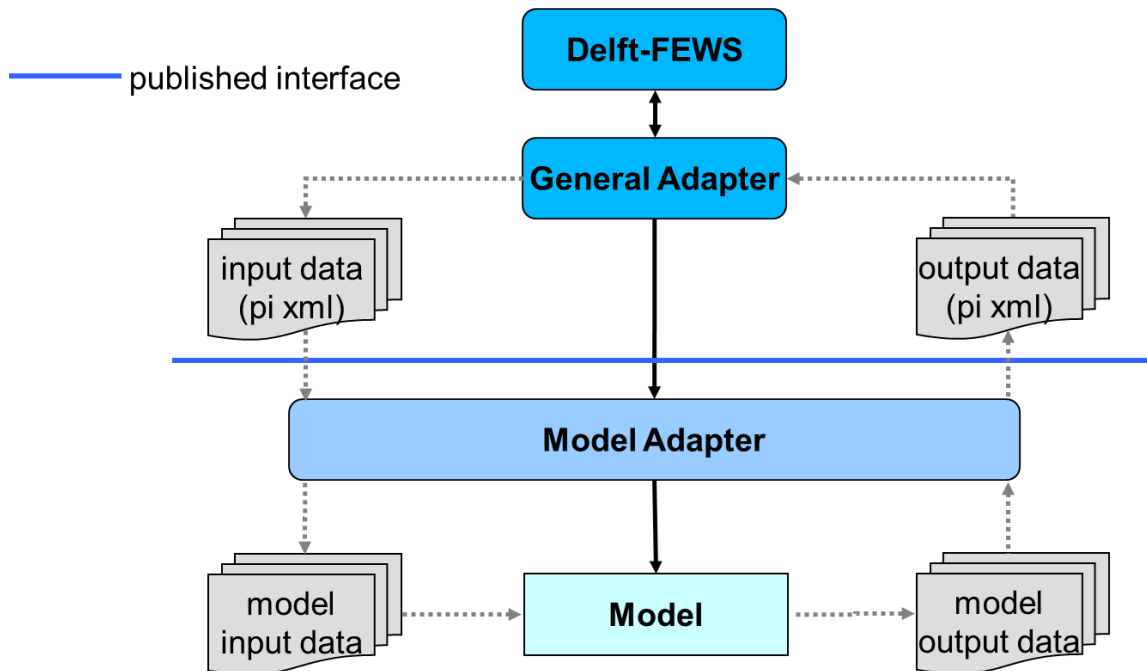


Figura 3 Esquema de estructura para comunicación con procesos externos,
<https://publicwiki.deltares.nl/display/FEWSDOC/05+General+Adapter+Module>

Los procesos de pronóstico son, en general, una secuencia de pasos sucesivos que inician con la importación de datos, un numero pasos secuenciales de procesos y modelación (de acuerdo con las necesidades específicas de pronóstico) y culmina con la generación de productos que son diseminados (por ejemplo, a través de una interfaz gráfica) al equipo de pronosticadores. En termino generales, esta secuencia de pasos es considerada dentro del Delft-FEWS como un “flujo de trabajo” (workflow).

Finalmente, el Delft-FEWS posee una interfaz gráfica, la cual es configurable, a partir del cual el equipo de los centros de pronóstico interactúa y consumen información. Esta interfaz puede incluir mapas con la ubicación de estaciones de medición, gráficas con series de tiempo creadas en los flujos de trabajo, series de tiempo ráster con información hidrometeorológica, esquemas, entre otros.

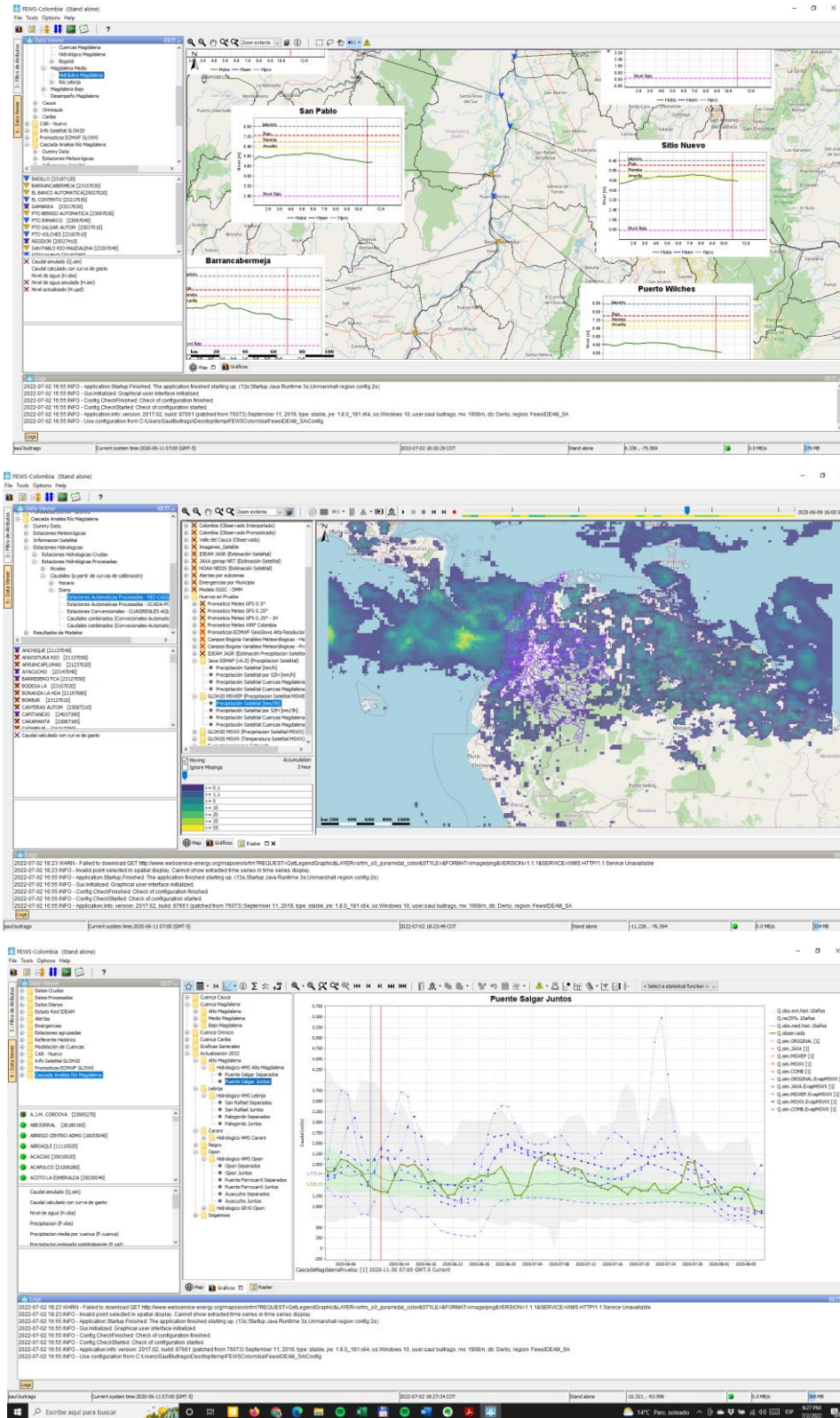


Figura 4 Algunas visualizaciones a través de la interfaz del sistema FEWS Colombia



2.2 Metodología

Para actualizar los procesos de cálculo (automáticos y operacionales) con fines de pronóstico se realizaron un conjunto de actividades que fueron realizadas de manera progresiva. Se destaca que los procesos de actualización y configuración se llevaron a cabo en un sistema tipo isla (Stand Alone) donde el sistema FEWS no trabaja de manera operacional, sino en un computador personal. A través de este sistema tipo isla se realizaron las evaluaciones a los procesos configurados y se corrigieron posibles incidentes (“bugs”) que pudieran tener las configuraciones. Una vez evaluado el funcionamiento correcto y esperado, las configuraciones actualizadas se subieron al sistema operacional.

El proceso inició con la revisión / diagnóstico de los procesos de cálculo existentes en el sistema FEWS Colombia. Este consistió en una revisión de los procesos de cálculo realizados por el sistema FEWS antes de ejecutar los modelos hidrológicos e hidrodinámicos. Se realizó una revisión de procesos como: importación de datos, procesos de interpolación, otras transformaciones a las que están sometidas las series de tiempo, procesos de corrección a través de ARMA, entre otros.

Posteriormente, se inició la actualización del sistema iniciando con el desarrollo y configuración para incorporar nuevas fuentes de información, siguiendo las recomendaciones del producto 4 (IDEAM-ECOPETROL, 2021) en cuanto al uso de múltiples fuentes de información. Esta actividad consistió en una revisión de las características de las fuentes de información: ubicación de los datos (ftp, almacenamiento en web, servicio web, entre otros), formatos en que se presenta los datos, frecuencia de presentación de información. A partir de esta información se debió desarrollar el código necesario para que el sistema FEWS Colombia pudiese realizar la importación y el consumo de información de manera automática. El lenguaje de desarrollo fue también seleccionado de acuerdo con las características antes mencionadas. Posteriormente, se realizó la configuración dentro del sistema FEWS Colombia para que este pudiese ejecutar dichos códigos, así como, la configuración necesaria para visualizar la información en el sistema.

Una vez los procesos de importación se encontraban en funcionamiento, se llevó a cabo la configuración dentro del sistema FEWS de todos los procesos necesarios (interpolación de series de tiempo y espacial, promedios aéreos sobre cuenca, cálculo de evapotranspiración, unión de series de tiempo) para alimentar los modelos hidrológicos existentes y los nuevos desarrollados en el producto 4 (IDEAM-ECOPETROL, 2021).

El siguiente paso fue incorporar los nuevos modelos hidrológicos desarrollados en el producto 4, en el sistema FEWS Colombia. La incorporación de estos modelos consistió en la estructuración de los modelos desarrollados para que pudiesen ser ejecutados en un entorno operacional. Para eso se realizó el desarrollo de código que permitiera hacer la ejecución de los modelos hidrológicos a través del FEWS Colombia. Posteriormente, se realizó la actualización del modelo hidrodinámico Mike11 dentro del tramo medio del Río Magdalena (entre Puerto Berrio y Sitio Nuevo). Para ello se realizó una actualización de los módulos del FEWS Colombia que ejecutan el modelo, incorporando nuevas condiciones de bordes.

Por último, se realizó la actualización de los módulos de corrección de errores (a través de un módulo ARMA¹) y el cálculo de indicadores de desempeño (BIAS, R2, NSE) a nivel operacional de los modelos hidrológicos e hidrodinámicos.

2.3 Sistema FEWS Colombia

La segunda mitad del año 2010 marco el inicio de un período prolongado de condiciones La Niña. Estas condiciones se mantuvieron, a pesar de un restablecimiento corto de condiciones neutrales en la segunda parte del año 2011, hasta el primer cuarto del año 2012. La presentación de largos períodos y altas intensidades de precipitación producto de estas condiciones climáticas provocaron inundaciones, especialmente en el período húmedo del invierno boreal del año 2010 – 11 y en la última parte del año 2011. Las inundaciones se presentaron en muchas partes del territorio colombiano, afectando un porcentaje importante de la población, así como, provocando importantes impactos económicos (Adams & Pagano, 2016).

Los eventos de inundación entre el año 2010 – 2011 llevó al Gobierno Colombiano a tomar acciones a nivel regional y nacional para desarrollar un nuevo marco para lidiar con el riesgo ante inundaciones. Dentro de estas acciones se encontraba el fortalecimiento de un sistema de información y de alerta temprana, para pronósticos de inundación. En respuesta a esta recomendación, El instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), ente que tiene el mandato de monitorear y alertar eventos hidrometeorológicos a nivel nacional, inició la implementación de un sistema para pronosticar y alertar eventos de inundación. Esto incluyó, y

¹ Los módulos ARMA dentro del FEWS utilizan un modelo autorregresivo de media móvil alimentado con información histórica para pronosticar el error residual entre un modelo hidrológico o hidrodinámico y los datos medidos.

sigue en constante expansión, la actualización de la red en tiempo real de estaciones meteorológicas e hidrológicas, la instalación de radares climáticos, y el desarrollo e implementación de capacidades para el pronóstico hidrológico (Adams & Pagano, 2016).

“Desde el 2014 a la fecha se han acoplado alrededor de 20 modelos, entre hidráulicos, hidrológicos y estadísticos. Estos modelos proveen el pronóstico hidrológico en más de 90 de puntos de monitoreo del IDEAM, CAR y CVC con un horizonte de pronóstico de 3 días. Estos modelos generan pronóstico para los cauces principales de los ríos Magdalena, Cauca, Meta, San Jorge, Lebrija, La Vieja, ente otros” (IDEAM, 2019).

Tal como se mencionó anteriormente, el IDEAM tiene el mandato para la provisión de pronósticos meteorológicos e hidrológicos a un nivel nacional. Adicionalmente a esto, las corporaciones ambientales tienen la responsabilidad dentro de cada región de realizar pronósticos, por lo tanto, el IDEAM debe trabajar de manera cercana con las 34 entidades distribuidas en Colombia. Adicionalmente, la entidad debe articularse con la Unidad Nacional del Gestión del Riesgo, así como las unidades distritales de gestión de riesgo. Por esta razón, el IDEAM decidió usar la plataforma de pronóstico operacional DELFT- FEWS. Esta herramienta ha sido diseñada como una plataforma abierta, donde se es capaz de integrar datos de diversas fuentes en tiempo real, procesar dicha información y correr modelos en tiempo real. Esto con el fin de proveer pronósticos hidrológicos de manera operacional para la toma de decisiones.

Actualmente el sistema soporta la toma de decisiones del grupo de pronosticadores de la Oficina de Servicios de Pronostico y Alertas (OSPA) del IDEAM. El sistema produce información necesaria para la elaboración de los boletines hidrológicos y de alerta hidrológica diarias, reportes específicos de condiciones hidrológicas en zonas específicas (Río Chicamocha, Ituango, etc.), así como, reportes específicos como el elaborado para RTVC. El sistema presenta la información histórica y de pronóstico en estaciones meteorológicas e hidrológicas. Así mismo, procesa la información para agregar la información a nivel de subzona hidrográfica (nivel hasta donde el IDEAM tiene responsabilidad de presentar información). Las corporaciones ambientales CVC y CAR también son usuarios del sistema.

En términos muy generales, El sistema consume información de una diversidad de fuentes. La información está compuesta por datos en tiempo real o cuasireal proveniente de estaciones meteorológicas e hidrológicas manejadas por el IDEAM. Adicionalmente, el sistema consume información proveniente de las estaciones hidrometereológicas e hidrológicas de la CVC y CAR.

También de estaciones o monitoreos de embalses operados por entidades privadas, así como, información de estaciones en aeropuertos y de otros países. Finalmente, el FEWS Colombia consume información en formato ráster, de productos de pronóstico meteorológicos del IDEAM y de instituciones internacionales como la NOAA, así como imágenes del satélite GOES, así como imágenes de radar, entre otros. Finalmente, el sistema también posee un conjunto de información estática como divisiones territoriales, mapas base, división de subzonas hidrográficas y modelos de elevación digital. Actualmente, el FEWS consume información disponible en 2458 locaciones (IDEAM, 2018). El sistema FEWS Colombia exporta la información la cual es publicada en una página web. En esta se presentan pronósticos en 90 estaciones distribuidas en el territorio nacional. Así mismo, el sistema genera reportes automáticos para diversas entidades.

En el año 2020 y 2021 se inició el proceso de fortalecimiento del sistema. El robustecimiento de esta consistió en reestablecer los procesos de importación de productos de pronóstico meteorológico producidos por el IDEAM (WRF) y por la NOAA (GFS), así como, productos pilotos como y ECMWF GeoGLOWS.

2.3.1 Descripción del Sistema

El sistema FEWS Colombia es un sistema extenso. El sistema tiene configurado 85 flujos de trabajo, compuestos por 430 módulos. El sistema está compuesto por módulos de importación, de procesamiento, de ejecución de modelos externos (hidrológicos o hidrodinámicos), de reporte y de mantenimiento de la base de datos. El sistema de pronóstico tiene una estructura estándar como los tradicionales sistemas de pronóstico, ver Figura 5.

A gran escala, el sistema gestiona en paralelo dos flujos de trabajo, el histórico (de actualización) y el de pronóstico. En el primero se importan, se procesan y se hacen simulaciones hidrológicas e hidrodinámicas empleando información medida y reportada a través de las estaciones automáticas. Este flujo de trabajo es encargado también de generar estados iniciales de los modelos empleados para el pronóstico. En el segundo flujo de trabajo, el de pronóstico, se importa información meteorológica pronosticada, esta es procesada y empleada en los modelos hidrológico e hidrodinámicos. Y así generar predicciones a lo largo de los tramos de ríos donde se han implementado modelos. Finalmente, luego de hacer las simulaciones, el sistema posee módulos de posprocesamiento y reporte.

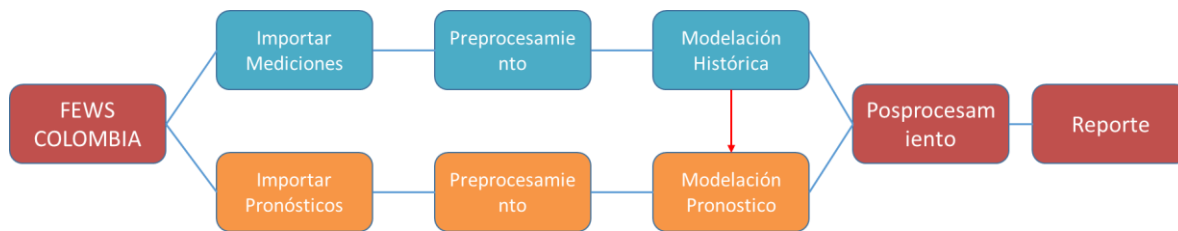


Figura 5 Estructura Básica del Sistema FEWS Colombia

El FEWS Colombia trabaja de manera continua. Este realiza rutinas diarias, algunas recurrentes cada hora, como los procesos de importación de información, validación y procesamiento, y otras que se ejecutan una vez al día como los módulos que activan la modelación matemática, flujos de trabajo históricos y de pronóstico.

El sistema inicia con la importación de series de tiempo de datos crudos. Para ello consume información de las bases de datos del IDEAM y de otras instituciones (CAR, CVC, CENICAFE, CHOCO, CARDIQUE, IDIGER, NOAA). El sistema importa información relativo a precipitación, niveles en cuerpos de agua, temperatura, velocidad y dirección del viento, humedad relativa, presión barométrica, radiación, presión de vapor, evaporación, e índices climatológicos.

De la misma manera, el sistema consume series de tiempo “raster” (distribuidas). De este tipo de información se posee desde información meteorológica histórica (obtenida a partir de observaciones satelitales) hasta información proveniente de modelos de predicción del clima (NWP por sus siglas en inglés). Del primer grupo, el sistema FEWS Colombia consume los productos de precipitación GSMAP de la JAXA, así como los productos de IDEAM del sistema SMARTMET. El FEWS Colombia está configurado para consumir esta información “observada” de manera horaria y diaria. En cuanto a productos de pronóstico el sistema FEWS Colombia consume información proveniente del modelo de IDEAM WRF y de los diversos productos de pronóstico del modelo global de pronóstico GFS de la NOAA. Para el caso de los productos de precipitación IDEAM-WRF el sistema FEWS Colombia consume los productos 1 vez al día. Por el otro lado, los productos de GFS se consumen 4 veces al día, lo que representa 4 pronósticos diarios de varias variables meteorológicas.

Una vez importado, el sistema ejecuta procesos de validación y de uniformización de la información. Así mismo, realiza procesos de interpolación lineal, unión jerárquica, y transformaciones específicas como por ejemplo cálculo de caudales a partir de niveles, y viceversa en algunos casos, así como, transformaciones específicas (creada por usuarios). También el sistema está configurado para realizar interpolaciones espaciales para obtener por ejemplo campos de

precipitación promedio sobre subzonas hidrográficas. Este procesamiento se realiza tanto para los flujos de trabajo históricos como de pronóstico.

La información se presenta visualmente a través de una interfaz gráfica para que sea interpretada por los pronosticadores. La interfaz gráfica en estos momentos lo componen el visor principal (FEWS Explorer) donde se observa lo relativo a estaciones hidrometeorológicas, el visualizador de series de tiempo, el visualizador de información en grilla (“raster”), el visualizador para correr flujos de trabajo y módulos de manera manual, y un módulo para la edición manual de series de tiempo.

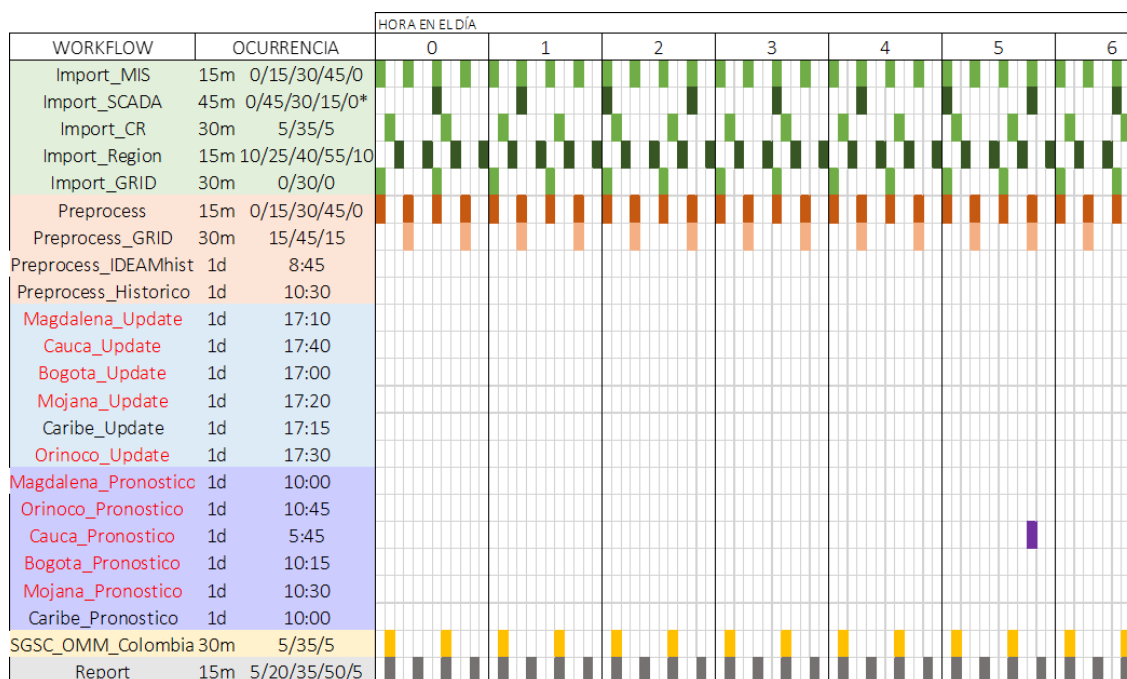


Figura 6 Porción del Programa Diario de Flujos de Trabajo en el FEWS Colombia

Parte de la información procesada alimentará a un conjunto de flujos de trabajo compuestos por una cascada de modelos estadísticos, hidrológicos e hidrodinámicos. Dichos modelos tienen doble función: “actualizar” los estados iniciales de las corridas de pronóstico (los cuales deben estar acorde a la realidad del sistema hídrico) y realizar las simulaciones para pronóstico. Esto quiere decir en otras palabras que los modelos, y flujos de trabajo, “corren” dos veces: la primera, usando información medida, para actualizar el estado de los modelos, que posteriormente consumirán los flujos de trabajo de pronóstico. Y una segunda vez, empleando información de pronóstico (por ejemplo: meteorológico), para generar pronósticos hidrológicos a través de los modelos.

2.3.1.1 Sistema FEWS – Colombia para el Río Magdalena

Para la cuenca del Río Magdalena el sistema FEWS Colombia presenta una cascada de procesos que incluyen desde la importación y validación de información hidrometeorológica, preparación y procesamiento de la información, simulaciones hidrológicas con fines de pronóstico, correcciones de errores a partir de información medida y finalmente el cálculo de algunos indicadores para evaluar la calidad de las estimaciones de las variables hidrológicas. Es importante destacar que el sistema realiza estos procesos primero empleando información medida (histórica) y posteriormente realiza casi los mismos procesos empleando información de pronóstico, siguiendo el paradigma de cálculo mencionado en capítulos anteriores. En total, son aproximadamente 45 procesos que ejecuta el sistema de manera secuencial para poder producir un pronóstico a varios de puntos de interés a lo largo del río.

El proceso de pronóstico en el río Magdalena incluye los siguientes pasos:

1. Importación de información medida (principalmente precipitación y niveles en los cuerpos de agua) obtenida en las estaciones automáticas provenientes de las bases de datos Polaris, Cassandra, y Aquarius del IDEAM
2. Procesamiento de la información medida (series de tiempo) con el fin de llenar espacios vacíos la cual se realiza mediante interpolación lineal. De la misma manera, se emplea la unión jerárquica de series de tiempo (provenientes de diferentes fuentes de información)² cuando los espacios vacíos (en las series de tiempo) son muy extensos y el uso de interpolación lineal no es adecuado.
3. Cálculo de precipitación media sobre cuenca. Para el caso de los procesos que emplea información medida se utiliza el método de interpolación mediante la distancia inversa ponderada (IDW por sus siglas en inglés). Para las cascadas de procesos en las cuales se emplea información de pronóstico meteorológico, la cual es información del tipo “raster” (distribuido), se emplea el promedio basado en los pixeles que se encuentran dentro de los límites de cuenca.
4. El sistema FEWS posee configurado un módulo que crea series de tiempo de evaporación de acuerdo con la climatología (promedios mensuales multianuales). El sistema FEWS

² Para mas detalle de la unión jerárquica ir a: <https://publicwiki.deltares.nl/display/FEWSDOC/Simple+Merge>

Colombia entonces va creando unas series de tiempo de evaporación climatológica para todo el territorio colombiano.

5. Una vez preparados los insumos antes mencionados, el sistema FEWS Colombia está configurado para ejecutar, siguiendo una secuencia también configurada, las simulaciones hidrológicas. En términos generales, las simulaciones están configuradas para ejecutarse siguiendo el flujo del agua (de aguas arriba hacia aguas abajo). También las simulaciones históricas (en el sistema llevan el nombre de “update”) se realizan primero considerando que estas crearan los estados iniciales de futuras simulaciones (tanto históricas como las de pronóstico). Para el caso del Río Magdalena el sistema:
 - a. Ejecuta los modelos hidrológicos (HEC-HMS) correspondientes a las cuencas de los ríos Carare, Opón (y Colorada), Negro.
 - b. Ejecuta un modelo hidrológico (HEC-HMS) de la parte alta de la Cuenca del Magdalena. El cual incluye la zona de influencia hidrológica aguas arriba del Puerto Salgar (Incluyendo Las cuencas del Bogotá, Sumapaz.
 - c. Ejecuta un modelo hidrológico (HEC-HMS) correspondiente al Río Lebrija.

6. Existen algunas cuencas aportantes al río Magdalena las cuales no poseen un modelo hidrológico configurado, para estos casos se ha empleado diferentes procedimientos para la estimación de caudales producidos por esas cuencas³.
 - a. Para los ríos La Miel (szh: 2308) y Nare (szh: 2305), en el caso de las corridas históricas y en los momentos en que no se tenga información medida, se emplea una extrapolación lineal con tendencia hacia un valor específico de caudal.
 - b. Para los ríos Cocorna (szh: 2307), San Bartolo (szh: 2310) y Sogamoso (szh: 2605), se emplea un valor constante de caudal.
 - c. Del análisis de la configuración no pareciera incluir algunas zona aportantes al río Magdalena como: los Directos al Magdalena entre Guarinos y Miel (szh: 2304), directos al Magdalena entre rio seco y negro (szh: 2303), directos al magdalena entre ríos negro y carare (szh: 2311) y río cimitarra y otros directos al río magdalena (szh: 2317). Se evaluará en mayor detalle si estas zonas están incluidas en la valoración de caudales de otras cuencas.
7. Posteriormente a la ejecución de los modelos hidrológicos, en algunos puntos de interés y que corresponde a las condiciones de borde de los modelos hidrodinámicos, el sistema emplea un modelo autorregresivo y de media movible (ARMA) para pronosticar el error entre los valores observados y simulados (históricos y de pronóstico)⁴. Esto asumiendo que las características de los errores en las series de tiempo simuladas se mantienen en el tiempo. Y de esta manera ajustar los resultados de la simulación.
8. El sistema FEWS Colombia tiene configurado para la cuenca del río Magdalena la ejecución de simulaciones hidrodinámicas. La simulación hidrodinámica en el valle medio del río magdalena es ejecutada a través de 3 modelos hidrodinámicos (usando el software DHI Mike11) configurados en cascada. Estos son:
 - a. Un modelo hidrodinámico desde Puerto Salgar hasta Barrancabermeja. Con condiciones de borde

³ Ver configuración para saber los valores específicos de caudal – Módulo: M11_Magdalena_DataPrep_Update.xml y M11_Magdalena_DataPrep_Pronostico.xml

⁴ Modulo de Error del sistema Delft FEWS: <https://publicwiki.deltares.nl/pages/viewpage.action?pageId=8683839>

- b. Un modelo hidrodinámico desde Puerto Berrio y Sitio Nuevo.
 - c. Un modelo hidrodinámico desde Sitio Nuevo al Banco.
9. Es importante mencionar que los dos primeros modelos se encuentran solapados, es decir, el tramo más aguas abajo del primer modelo corresponde al tramo más aguas arriba del segundo. Específicamente, el solape se encuentra en el tramo de río entre la estación Puerto de Berrio (0023097030) y Barrancabermeja (0023157030). Esto con el fin de ejecutar un modelo de corrección de error ARMA en la estación de Puerto Berrio y reducir las incertidumbres que transitan a lo largo de la cascada de procesos y en la dirección del flujo.
10. En varias estaciones del río, donde el modelo matemático presenta resultados, tiene configurado un modelo de predicción del error ARMA tal como en las salidas de los modelos hidrológicos.
11. Finalmente, en algunos de las estaciones se ha configurado la evaluación de indicadores para la valoración de los resultados de la modelación. Estos incluyen: RMSE, BIAS, R2, MAE.

Es importante destacar que, para llevar a cabo los procesos antes mencionados, se debe configurar una cascada de módulos que comprenden desde la importación de datos, la transformación (procesamiento) de series de tiempo puntuales y distribuidas (rasters), módulos “adaptadores generales” a partir de los cuales se pueden ejecutar rutinas y aplicativos externos al FEWS Colombia como los modelos para simulación hidrológica e hidrodinámica. Abajo se presenta una tabla con los módulos que intervienen dentro de la cascada para realizar pronósticos en el río Magdalena.

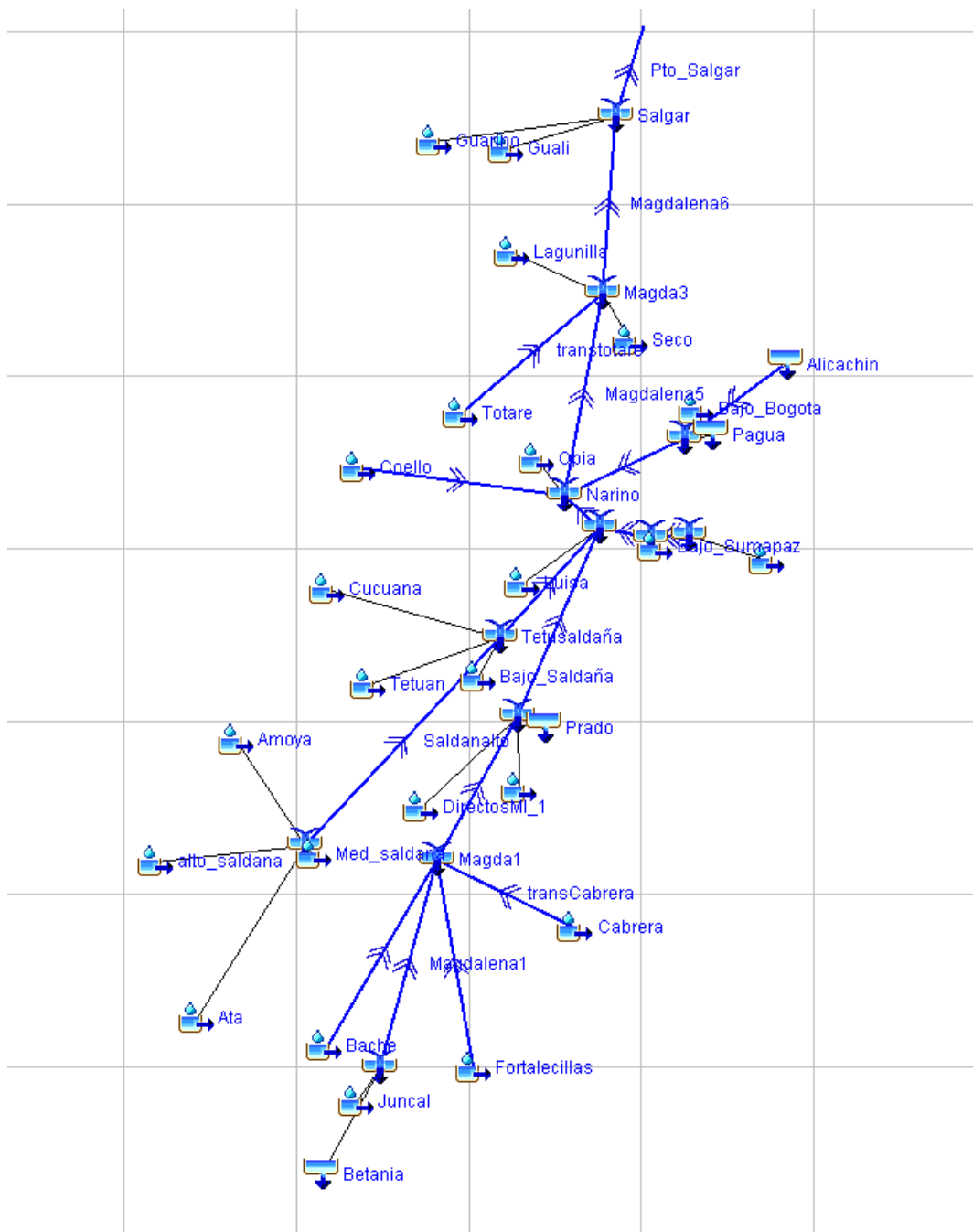


Figura 8 Estructura del Modelo Hidrológico de la Zona de Influencia aguas arriba de Puerto Salgar

Tabla 1 Módulos que intervienen en la cascada de procesos del río Magdalena

Nombre Módulo	Tipo ⁵	Histórico	Pronostico
Import_CR	Módulo de Importación	x	
ImportIDEAM_CUASIREALES	Módulo de Importación	x	
ImportIDEAM_Aquarius	Módulo de Importación	x	
ImportIDEAM_HYDRAS3	Módulo de Importación	x	
Preprocess_H_IDEAM	Módulo de Transformación	x	
PreprocessHQ_IDEAM	Módulo de Transformación	x	
Preprocess_Q_IDEAM	Módulo de Transformación	x	
Preprocess_Hr_IDEAM	Módulo de Transformación	x	
Preprocess_P_IDEAM	Módulo de Transformación	x	
Preprocess_T_IDEAM	Módulo de Transformación	x	
Preprocess_U_IDEAM	Módulo de Transformación	x	
Preprocess_pres_IDEAM	Módulo de Transformación	x	
Preprocess_R_IDEAM	Módulo de Transformación	x	
Climatology_Ev_IDEAM	Módulo de Transformación	x	
Preprocess_EvClim_IDEAM	Módulo de Transformación	x	
ImportJAXA_GSMAP_NRT13	Módulo de Importación	x	
ImportGLOH20_MSWEF	Adaptador General + Modulo de Importación	x	
ImportIDEAM_GFS05	Módulo de Importación		x
ImportIDEAM_WRF	Módulo de Importación		x
DataPrepZH_JAXA_NRT	Módulo de Importación	x	
DataPrepZH_IDEAM_WRF	Módulo de Transformación		x
DataPrepZH_IDEAM_GFS05	Módulo de Transformación		x

⁵ Para ver acerca de cada módulo del Delft FEWS ir a

<https://publicwiki.deltares.nl/display/FEWSDOC/05+Configuring+the+available+Delft-FEWS+modules>

Nombre Módulo	Tipo ⁵	Histórico	Pronostico
HMS_Magdalena	Flujo de Trabajo	x	x
HMS_Magdalena_DataPrep	Módulo de Transformación	x	x
HMS_Magdalena_PrecipCuenca	Módulo de Transformación	x	x
HMS_Carare	Módulo Adaptador General	x	x
HMS_Negro	Módulo Adaptador General	x	x
HMS_Opon	Módulo Adaptador General	x	x
HMS_Alto_Magdalena	Módulo Adaptador General	x	x
ARMA_Salgar	Módulo de Corrección de Error	x	x
ARMA_Carare	Módulo de Corrección de Error	x	x
ARMA_Negro	Módulo de Corrección de Error	x	x
ARMA_Opon	Módulo de Corrección de Error	x	x
HMS_Lebrija (workflow)	Flujo de Trabajo	x	x
HMS_Lebrija	Flujo de Trabajo	x	x
HMS_Lebrija_DataPrep	Módulo de Transformación	x	x
HMS_Lebrija	Módulo Adaptador General	x	x
ARMA_Lebrija	Módulo de Corrección de Error	x	x
M11_Magdalena	Flujo de trabajo		
M11_Magdalena_DataPrep	Módulo de Transformación	x	x
M11_Magdalena	Módulo Adaptador General	x	x
ARMA_Berrio	Módulo de Corrección de Error	x	x
Estadistico_MEDIA	Módulo de Transformación	x	x
M11_MagdalenaBerrio	Módulo Adaptador General	x	x
ARMA_SitioNuevo	Módulo de Corrección de Error	x	x
CienagaZapatoza_Magdalena	Módulo de Transformación	x	x
M11_MagdalenaSitioNuevo	Módulo Adaptador General	x	x
ARMA_Magdalena	Módulo de Corrección de Error	x	x

De acuerdo con los trabajos realizados por Urrego (IDEAM, 2018), las cascadas de procesos para el pronóstico en el VMM tienen un espacio de mejora. Urrego, hizo una evaluación de los modelos de simulación existentes en el FEWS Colombia para el año 2018. Estas evaluaciones se hicieron principalmente observando los resultados de simulaciones con información medida. Adicionalmente, la evaluación fue realizada puramente en base a los resultados de la simulación. De acuerdo con los resultados, ver tabla abajo, Urrego anuncia que “se recomienda hacer una recalibración continua de los modelos (a partir de registros observados en las estaciones de precipitación y nivel) donde las estimaciones hidrológicas no dependan de los modelos meteorológicos”.

Modelo	Punto de evaluación	Corriente	Código	Primera fase		Segunda fase	
				Total eventos	Aciertos	Total eventos	Aciertos
HMS Negro	Puerto Libre	Río Negro	0023067040	15	6	12	3
M11 Magdalena	Puerto Berrio	Magdalena	0023097030	17	9		
HMS Opón	Pte Ferrocarril	Río Opón	0023147020	16	7	10	5
HMS Lebrija	San Rafael	Río Lebrija	0023197370	6	0	10	0
M11 Berrio	Sitio Nuevo	Magdalena	0023187280	11	6		
M11 Sitio Nuevo	El Banco	Magdalena	0025027020	8	1		

Figura 9 Resumen de aciertos de los Modelos del Magdalena Medio. Fuente: (IDEAM, 2018)

Modelo	Punto de evaluación	Corriente	Código	Desempeño días de pronóstico		
				1	2	3
HMS Negro	Puerto Libre	Río Negro	0023067040	Regular	Regular	Bajo
HMS Opón	Pte Ferrocarril	Río Opón	0023147020	Regular	Regular	Regular
HMS Lebrija	San Rafael	Río Lebrija	0023197370	Bajo	Bajo	Bajo

Figura 10 Desempeño de Modelos del Magdalena Medio. Fuente: (IDEAM, 2018)

2.4 Actualización de procesos dentro de FEWS Colombia para pronóstico

2.4.1 Productos Desarrollados para incorporar dentro de la Cascada de Pronóstico de VMM

Este proyecto se enmarca en el robustecimiento del monitoreo, pronóstico y generación de alertas hidrometeorológicas en la zona de interés del Valle medio del Magdalena. Dentro de este alcance del proyecto, se planteó la actualización de algunos procesos de modelación hidrológica para

mejorar el pronóstico en el área de estudio. Para ello, dentro del Producto 4 se han desarrollado y/o mejoraron un conjunto de modelos, hidrológicos e hidrodinámicos.

2.4.1.1 Actualización de modelos Hidrológicos

En cuanto a la modelación hidrológica se configuraron, desarrollaron y se pusieron a prueba varios modelos hidrológicos en las cuencas del río Opon y Sogamooso. Los modelos hidrológicos se basaron en los modelos conceptuales: el primero basado en la familia de modelos “Génie Rural à 4 paramètres Journalie - GR4J” (Edijatno et al. 1999), y el modelo TUWmodel, basado en el modelo HBV (Parajka et al. 2007). Específicamente, se configuraron 4 modelos hidrológicos conceptuales: GR4j, TUWmodel, GR4H y GR5h a nivel diario y horarios para los ríos la Colorada y Sogamooso. La implementación y puesta a prueba de estos modelos conceptuales no solo consistió en la configuración, calibración y validación de los modelos. Sino se planeó todo un proceso de cálculo que incluyó el robustecimiento de la representación de los forzamientos (condiciones de borde) de parámetros importantes como: la precipitación, la evapotranspiración, y la temperatura. Para ello se planteó el empleo de diversas fuentes de información, así como de herramientas específicas. Como se menciona en (IDEAM-ECOPETROL, 2021) los modelos “fueron evaluados desde una perspectiva multinivel, es decir, el forzamiento de la variable precipitación tuvo múltiples productos (GSMAP, MSWEP y RF_MEP). Esta aproximación multinivel permitió construir ensambles hidrológicos y evaluar la capacidad que tiene esta estrategia para mejorar la estimación de caudales como consecuencia de la habilidad de los modelos y productos de compensar las debilidades de unos en función de las fortalezas de los demás”. De la misma manera, El proceso de modelación a nivel diario y horarios también contempló la evaluación del nivel de ajuste de los modelos, el ajuste del ensamble por medio de puntajes probabilísticos, análisis de sensibilidad paramétrica e incertidumbre en la estimación de caudales con el ensamble hidrológico.

El primer paso en el proceso de actualización fue la evaluación de diferentes fuentes de información, así como, estrategias para combinar las diferentes fuentes en un solo producto (implementación del algoritmo RF_MEP). Se enfocó de manera particular en el componente de precipitación. Los productos evaluados fueron GSMAP versión 6 de la Agencia espacial japonesa (JAXA), MSWEP versión 2.8 de GLOH20 y los productos WRF del IDEAM. Los dos productos iniciales son productos de información de precipitación global histórica obtenida a través de la unión de diferentes productos de precipitación obtenidos a partir de sensores remotos (satélites) y en el caso del MSWEP con información de estaciones en sitio. Los productos WRF del IDEAM,

son pronósticos del clima (entre ellos la precipitación) a corto plazo (10 días) provenientes del modelo de predicción numérica del clima (NWP) WRF, del cual el IDEAM produce 1 pronóstico diario. En cuanto al algoritmo de unión de fuentes de información se evaluó el uso del RF_MEP. Este algoritmo desarrollado por Baez-Villanueva et al. (2020) permite combinar productos de variables meteorológicas derivada de satélites o de reanálisis junto con los datos de estaciones in situ usando tecnologías de aprendizaje automático supervisado (bosque aleatorios o random forests). Adicionalmente, se hizo la evaluación de la variable temperatura para el producto MSWX de GLOH20⁶.

A partir de las evaluaciones de los productos meteorológicos, se llegó a la conclusión que:

- Los productos GSMAP y MSWEP tienden a sobreestimar la precipitación diaria en las subzonas hidrográficas evaluadas (Opon, Sogamoso y Lebrija)
- La combinación de los productos GSMAP y MSWEP, junto con el modelo de elevación digital como entrada del algoritmo RF_MEP permitió reducir el sesgo a valores de sobre estimación del orden de 1%
- En cuanto al producto MSWX para la variable temperatura a paso de tiempo horario, se evidenció que representa de forma satisfactoria la temperatura máxima y mínima diaria tanto en el tiempo como en el espacio.
- Aunque el RF_MEP demostró grandes ventajas para mejorar la representación espacial y temporal de la precipitación diaria, se debería explorar otros algoritmos.

Una vez se evaluaron las fuentes de información el estudio dispuso de evaluar la combinación de las anteriores fuentes de información se preparó la configuración de los modelos hidrológicos con el enfoque multinivel, multifuentes. Esto fue realizado para las cuencas del río Opon y Río Sogamoso. Abajo en la figura se muestra cómo se contempló la configuración de los modelos. Específicamente se crearon tres casos, la evaluación de la cuenca del río Opon y Sogamoso para condiciones diarias, y la evaluación de la cuenca la Colorada (dentro de la szh del Opon) para condiciones horarias.

⁶ En el Capítulo 4: Aspectos conceptuales de modelos hidrológicos para pronósticos y alertas del Producto 4: Avances en la modelación hidrológica e hidráulica orientada a la caracterización de las áreas de Ecopetrol en el VMM (IDEAM-ECOPETROL, 2021) se presenta una descripción detallada de todos estos productos.

Luego de evaluar las diferentes combinaciones de fuentes y modelos se evaluó las condiciones de incertidumbre, considerando la media del ensamble de series de tiempo a partir de las múltiples combinaciones y/o experimentos, ver Figura 11.

Para el caso de la cuenca Opon y su evaluación diaria se observó que hay una clara sobreestimación de los caudales simulados en comparación con los observados. Así mismo, la media de los ensambles de diferentes productos a pesar de aproximarse de forma razonable a la información observada, los eventos de gran magnitud los subestima o los sobrestima es decir no presenta un comportamiento homogéneo para la representación de las condiciones de flujo. En la Figura 12 se puede ver algunos resultados de las simulaciones de caudales para la cuenca del Opon.

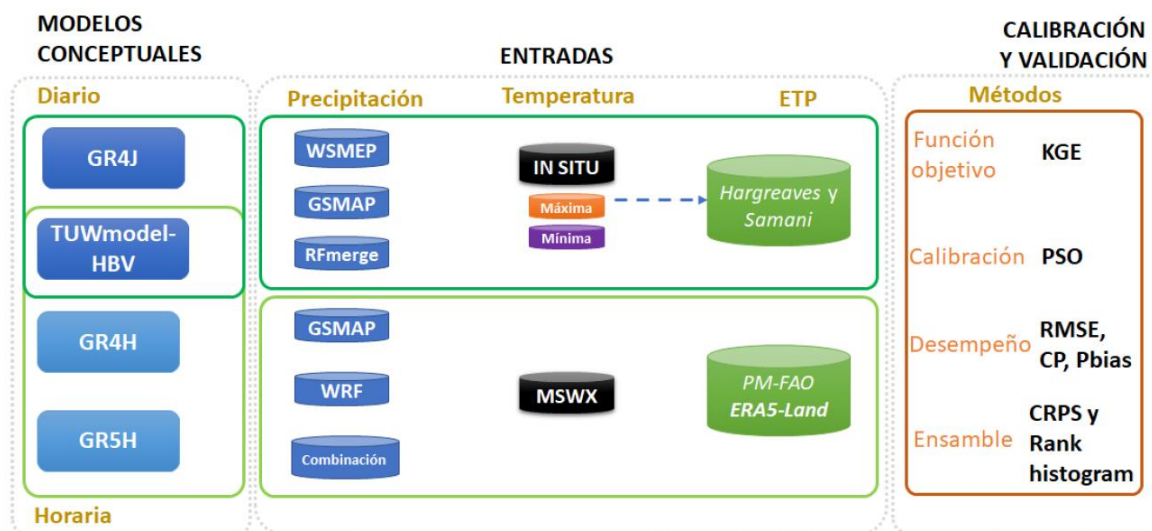


Figura 11 Resumen de configuración e implementación de modelos para robustecer el pronóstico hidrológico. Fuente: (IDEAM-ECOPETROL, 2021)

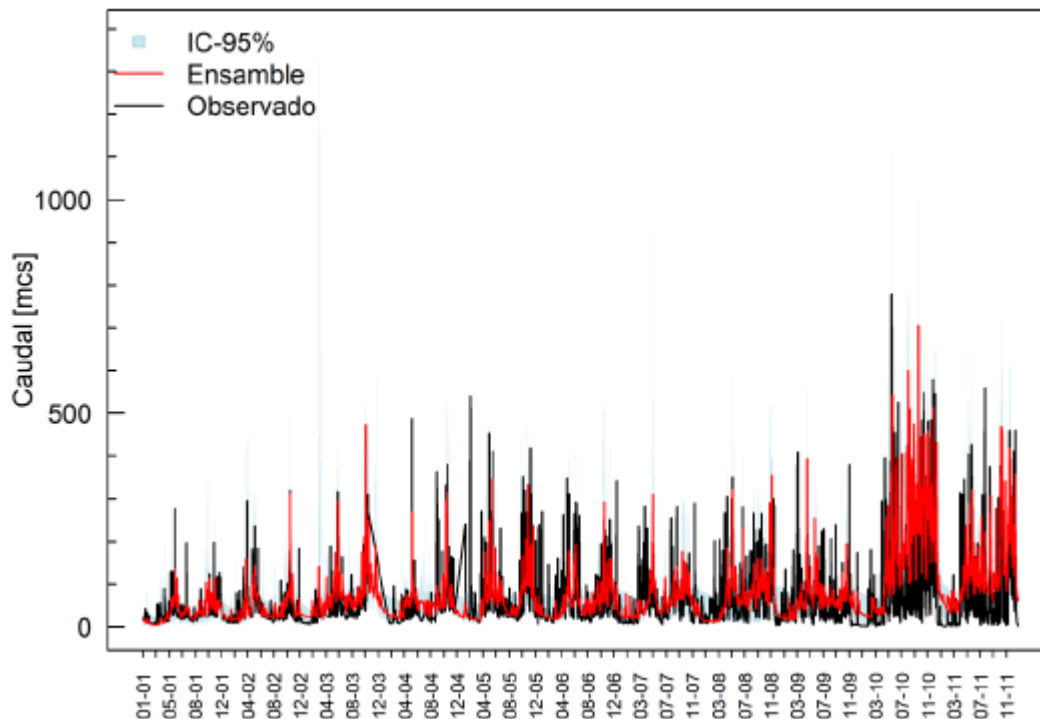


Figura 12 Resultados en el período de calibración para la cuenca del Opon (en la estación Ayacucho). Datos Observados (negro), Media de los ensambles (rojo), Intervalos de confianza - 95% (en azul claro). Fuente: (IDEAM-ECOPETROL, 2021)

De la misma manera se realizó la evaluación de la cuenca del Río Sogamoso. Esta también fue evaluada para condiciones diarias. Para este caso, los intervalos de confianza a partir de los resultados del ensamble evidencian que existe un leve chance de cubrir eventos con caudales de magnitud baja. Sin embargo, al observar el límite superior de los intervalos de confianza se observa la baja probabilidad de representar eventos con caudales de magnitudes superiores. Al evaluar una ventana de tiempo específica (año 2006) se nota claramente la subestimación de caudales observados. Más aún, los eventos simulados en los ensambles poseen un retraso con respecto a la información observada. En el documento lo asocian a que puede haber una falta de correspondencia con los pulsos de precipitación (magnitud y temporalidad).

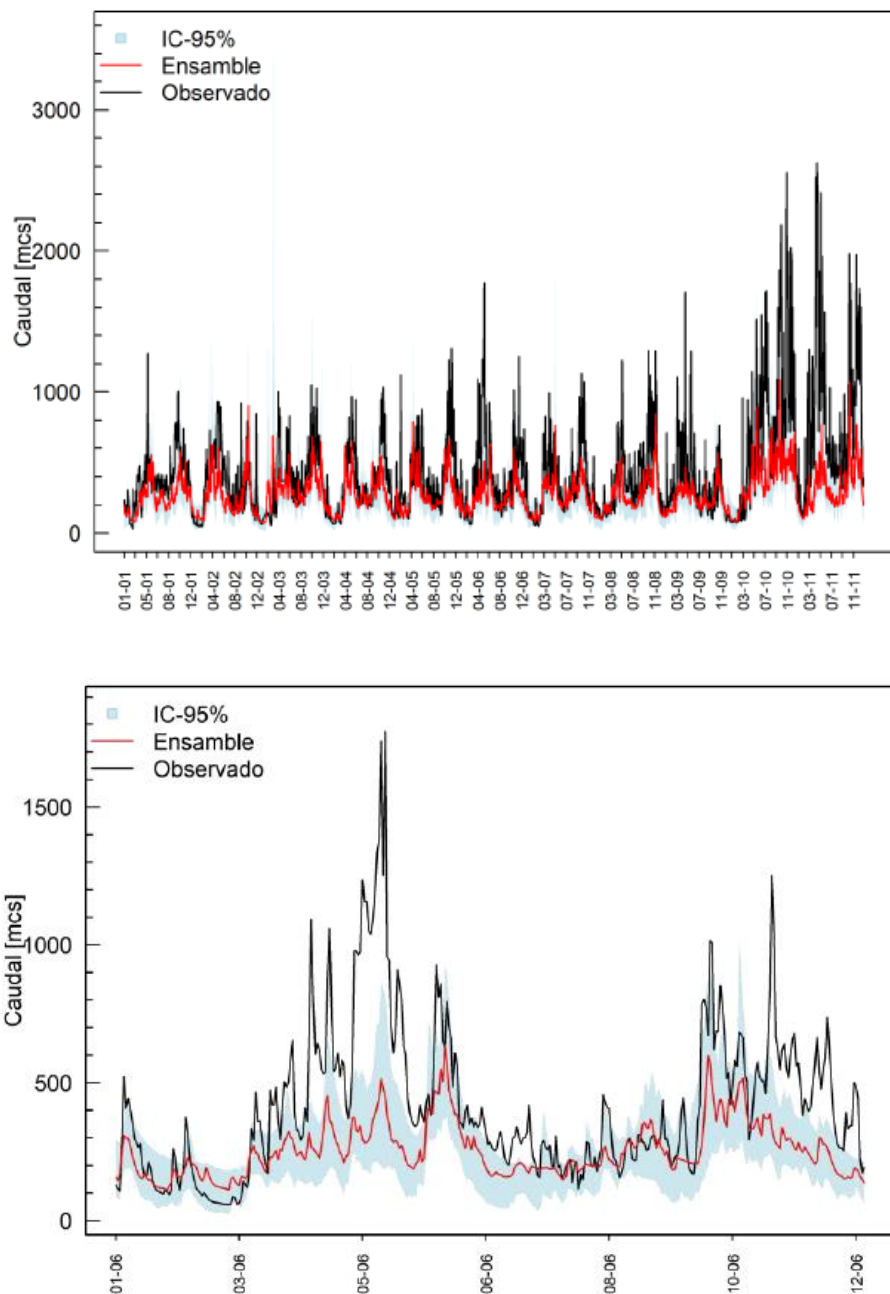


Figura 13 Resultados en el periodo de calibración para la cuenca del Sogamoso. Datos Observados (negro), Media de los ensambles (rojo), Intervalos de confianza - 95% (en azul claro). Figura de abajo detalle para el año 2006. Fuente: (IDEAM-ECOPETROL, 2021)

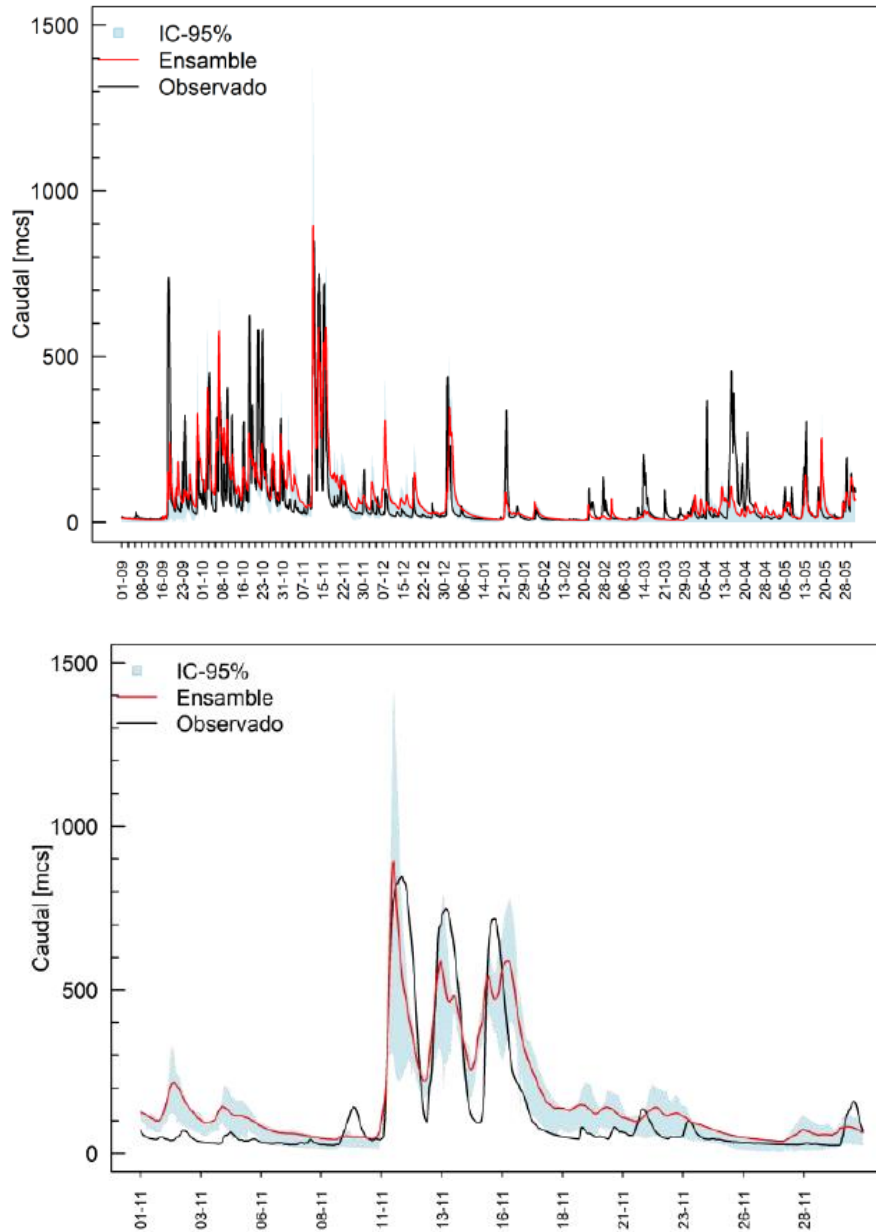


Figura 14 Resultados en el periodo de calibración para la cuenca la Colorada. Datos Observados (negro), Media de los ensambles (rojo), Intervalos de confianza - 95% (en azul claro). Figura de abajo detalle para el año 2006. Fuente: (IDEAM-ECOPELROL, 2021)

Finalmente, se realizó la evaluación en condiciones horarias para la cuenca del Río La Colorada en la szh del río Opon. Del análisis de incertidumbre y de los resultados a partir de la media del ensamble se identificó que gran parte de los valores observados salen de los límites superiores e inferiores del intervalo de confianza. De la misma manera hay un desfase entre las simulaciones y la información observada.

De los análisis realizados para el producto 4 del proyecto (IDEAM-ECOPETROL, 2021) se llegó a la conclusión que los modelos GR4J (diario), GR4H y GR5H (subdiario) se consolidaron como las mejores alternativas para su implementación en la plataforma FEWS.

Finalmente, a partir del análisis de fuente de información y del análisis de los modelos y sus combinaciones se ha propuesto un “acople operacional” de estas estrategias. Este acople operacional se basó en 2 conceptos: 1) el uso de diferentes fuentes de información como teledetección, reanálisis y su combinación. Y 2) el uso de múltiples modelos hidrológicos conceptuales y parsimoniosos, y que no requieran un amplio número de variables de entrada. Considerando esto se propuso el siguiente proceso:

1. Incorporar una configuración al FEWS Colombia que incorpore las diversas versiones del GSMAP.
2. Incorporar una configuración de los productos MSWEP y MXWX de GLoH20.
3. Remuestrear los diferentes productos a una misma resolución espacial.
4. Combinar a través de la media los productos WRF, GSMAP horarios. En este punto, existen cuestiones a resolver ya que los productos WRF son productos de pronóstico y GSMAP son productos con información histórica obtenida de manera indirecta.
5. Agregar espacial y temporalmente los productos WRF y la versiones de GSMAP cada tres horas
6. Combinar a través de la media los productos WRF, las versiones de GSMAP y MSWX a nivel horarios (cada tres horas). De la misma manera, En este punto, existen cuestiones a resolver ya que los productos WRF son productos de pronóstico y GSMAP son productos con información histórica obtenida de manera indirecta
7. Agregar temporalmente los productos y combinaciones cada hora, cada tres horas, y diario.
8. Emplear la variable temperatura diaria o cada tres horas de los productos MSWX para el cálculo de evapotranspiración potencial con los modelos Hargraves – Samani (diario) o Penman-Monteith-FAO (horario).
9. Implementar los modelos GR4J, GR4H y GR5H en la plataforma FEWS Colombia.
10. Implementar la metodología de bootstrapping (remuestreo) para el cálculo de los intervalos de confianza para las simulaciones.

Si bien, la cascada para el cálculo del pronóstico en el VMM dentro del FEWS Colombia puede ser adaptada a las consideraciones antes mencionadas. La estructura anterior debe ser adaptada para

que pueda articularse con los conceptos operativos de los sistemas de pronóstico, donde se considere las particularidades (como por ejemplo la consideración de las dos cascadas en paralelo cada una alimentándose de información histórica o de pronóstico).

2.4.1.2 Actualización de Modelación Hidráulica

Dentro del presente proyecto se realizó una evaluación a uno de los modelos hidrodinámicos del VMM. Específicamente se evaluó el modelo que simula el tramo de río entre la estación Puerto Berrio y Sitio Nuevo.

En términos generales, el modelo que se encuentra configurado en el FEWS Colombia fue desarrollado en el software DHI Mike 11. El modelo es unidimensional y se ejecuta en estado no permanente. El modelo está constituido por 84 secciones transversales localizadas en un tramo de río de uno 189.5 km. La separación entre las secciones es de 0.5 km (mínimo) y 10.7 km (máximo). Las mayores separaciones entre secciones transversales se encuentran en la zona cercana a sitio nuevo.

El modelo fue evaluado en cuanto a su desempeño para un período específico y con condiciones de bordes impuestas de información observada en diferentes puntos (Río Magdalena – aguas arriba, Río Carare, Río Opon, Río Sogamoso). Los análisis se realizaron para los primeros 7 meses del año 2018. Se compararon las series de nivel y caudal registradas en la estación Sitio Nuevo con las series de tiempo simuladas en el modelo hidráulico. De la comparación se logró identificar que el modelo presenta adecuadamente los caudales bajos y medios, mientras que para los caudales altos (mayores a 4500 m³/s) el caudal simulado es aproximadamente 25% más que el caudal registrado. Se concluye que esto puede deberse a que en el modelo no se están considerando desbordamientos. Si bien el modelo tiene un desempeño aceptable con condiciones de borde extraídas de información observada. Esto puede ser un indicador que las incertidumbres producto de la estructura del modelo serán inferiores a las que pueden provenir de los modelos hidrológicos aguas arriba de este modelo hidrodinámico.

De la misma manera, se evaluó los cambios en las secciones transversales producto de la evolución morfodinámica del río Magdalena. A partir de estas consideraciones y de las características de desempeño se realizaron ajustes al modelo.

El primer ajuste que se realizó fue adecuar la topología eliminando el brazo del río Sogamoso y los cambios bruscos en el lecho del río Magdalena. Así mismo se integraron nuevas condiciones de borde para cuencas aportantes no consideradas anteriormente (Aporte de río San Bartolomé,

Cimitarra y otros directos). El segundo ajuste fue la inclusión de estructuras que simularan los desbordamientos en el río, de tal manera que se garantice hasta cierto nivel los volúmenes de agua transitados.

De la misma manera, se evaluaron las estimaciones realizadas por los modelos hidrológicos como condiciones de borde sobre el modelo hidrodinámico. Se utilizaron los resultados provenientes de dos modelos el GR4J y TUWmodel junto a tres productos: MSWEP, GSMAP y productos resultados del uso de la herramienta RF_MEP. De los resultados del modelo hidrodinámico se observa que los resultados de la simulación subestiman los niveles y caudales en relación con los valores observados y con los valores de la simulación del modelo hidrodinámico con condiciones de borde observadas.

2.4.1.3 Actualización de procesos para pronóstico en VMM - FEWS Colombia

A partir de la información desarrollada en los productos iniciales - producto 2 (IDEAM-ECOPETROL, 2021) y 4 (IDEAM-ECOPETROL, 2021) del proyecto, se recogen un número importante de recomendaciones a incorporar en el sistema FEWS Colombia con la intención de mejorar el pronóstico hidrológico en el VMM. Estas recomendaciones las podemos resumir en las siguientes:

- Según Urrego, 2018 existe una ventana para robustecer la representación de caudales mediante los modelos hidrológicos existentes para el VMM. Para ello se sugiere en ese momento la recalibración de los modelos hidrológicos para mejorar su representación hidrológica.
- De acuerdo con las evaluaciones de las fuentes de información, se menciona el hecho de mejorar la información de entrada a los modelos hidrológicos. Específicamente, los componentes de precipitación y evapotranspiración. Para ello, se recomienda un enfoque que contemple múltiples fuentes de información, que permitan tener un entendimiento de las condiciones de precipitación. En el caso de la evapotranspiración el empleo de metodologías como Hargraves – Samani (diario) o Penman-Monteith-FAO (horario), las cuales estiman este parámetro a partir de la temperatura máxima y mínima es factible usando también fuentes externas para la estimación de temperatura.
- La incorporación de nuevas estructuras de modelos hidrológicos ayudará a la estimación de caudales en las condiciones de borde aguas arriba del modelo hidrodinámico. se llegó a la

conclusión que los modelos GR4J (diario), GR4H y GR5H (subdiario) se consolidaron como las mejores alternativas para su implementación en la plataforma FEWS.

- Se deben incorporar (añadir) los aportes de caudal de zonas de influencia hidrológica que no están consideradas como condiciones de borde en el sistema actual.
- La incorporación del modelo hidrodinámico corregido puede traer mejorar en la representación de niveles de agua, aunque todavía hay retos en la reproducción de las señales observadas al implementar las salidas de los modelos hidrológicos como condiciones de borde.

A partir de estas recomendaciones, se puede estructurar un proceso de ajustes que permita actualizar la cadena de procesos para el pronóstico en el VMM. Estos se pueden circunscribir en los puntos anteriores, y tienen que ver con:

1. Configuración de módulos de importación de datos (pueden ser adaptadores generales) para incorporación de fuentes de información nueva en el sistema operacional
2. Configuración de módulos procesamiento y preparación de la información (precipitación, evapotranspiración) para incorporar en los modelos hidrológicos.
3. Ajuste, reactivación y/o corrección de errores a la configuración de los modelos hidrológicos en los cuales no haya un modelo hidrológico nuevo
4. Configuración de adaptadores generales para la incorporación de los nuevos modelos hidrológicos creados para las cuencas de Opon, Sogamoso y la Colorada
5. Configuración de estimaciones de caudales diferentes a la estimación de usando un valor constante en las zonas de influencia hidrológica que aportan al río Magdalena
6. Ajuste a la Configuración de módulos corrección de errores de acuerdo con la nueva estructura de procesos si es requerido
7. Ajuste de la configuración de adaptador general para el modelo hidrodinámico ajustado (modelo Puerto Berrio – Sitio Nuevo). En el caso que el modelo requiera ajustes en el tramo Puerto Berrio – Barrancabermeja se deberá realizar los ajustes en el modelo M11 Puerto Salgar - Barrancabermeja.
8. Revisión y/o ajuste de indicadores para la evaluación de desempeño de la cascada de modelos.

Se destaca que los puntos antes descritos se deben configurar en el sistema FEWS Colombia considerando que el sistema para correr en ambiente operacional debe desarrollar el cálculo en

modo histórico y modo de pronóstico. Por lo tanto, los pasos antes descritos deberán ser considerados de manera doble, cada una con sus particularidades y diferencias. Por ejemplo, la información de entrada y la preparación de la información no necesariamente es la misma si se emplea información histórica o de pronóstico.

Mas aún, se contempla que siguiendo la propuesta de los procesos multinivel y multifuentes reactivar (si es necesario) y mantener los modelos hidrológicos existentes. Y en los casos en que exista dos modelos mantenerlos en la cascada de procesos con la finalidad de observar y comparar los resultados obtenidos por diferentes estructuras de modelos.

Considerando lo anterior se propone los siguientes pasos para llevar a cabo el robustecimiento de los procesos de para el pronóstico en el VMM:

1. Evaluación, reactivación y/o corrección de incidentes de la cascada de procesos actual empleando información histórica en sistema FEWS Colombia Stand Alone.
2. Configuración de módulos de importación (o adaptadores generales) para la Incorporación de nuevas fuentes de información (versiones 7 y 8 de GSMAP, MSWEP, MSWX)
3. Configuración de módulos de transformación de información de acuerdo con las consideraciones realizadas para la precipitación y evapotranspiración en el Producto 4 (IDEAM-ECOPETROL, 2021).
4. Ajuste a Configuración si es necesario de módulos de transformación de series de tiempo para preparar la información para los modelos hidrológicos
5. Configuración y desarrollo (y debugging) de adaptadores generales para ejecutar los nuevos modelos hidrológicos desarrollados en R. Esto contempla el desarrollo de scripts (Bat, Python, R, etc.) que transforman los formatos de datos en formatos que pueden ser leída por las rutinas de cálculo, así como, las rutinas para la ejecución de manera remota de las rutinas (con el fin de que puedan ser ejecutadas de manera automática).
6. Configuración de los módulos adaptadores generales para la incorporación de nuevos modelos hidrológicos configurados.
7. Ajuste a configuración de modelos de errores ARMA
8. Configuración de mejoras o nuevos métodos de transformación para estimar aportes de caudal al modelo hidrodinámico de zonas no consideradas en el sistema actual.

9. Ajuste a configuración del adaptador general del modelo hidrodinámico M11 de Puerto Berrio a Sitio Nuevo. Puede que exista la posibilidad que se necesite hacer ajustes al adaptador general del modelo hidrodinámico M11 de Puerto Salgar a Barrancabermeja
10. Puesta a pruebas (Stand Alone y Sistema Operativo), corrección de errores (debugging) y evaluación de resultados.

2.4.1.4 Incorporación de nuevas fuentes de información

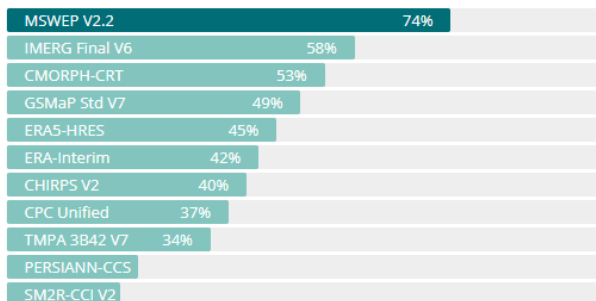
Siguiendo las recomendaciones anteriormente mencionadas, se realizaron un conjunto de desarrollos y configuraciones en el sistema FEWS Colombia de tal manera que el sistema pudiese información meteorológica específicamente de los productos meteorológicos MSWEP y MSWX (precipitación y temperatura). En cuanto al JAXA GSMAP el sistema FEWS Colombia, el sistema ya consume esta información.

2.4.1.4.1 Productos MSWEP y MSWX

MSWEP es un producto de precipitación global con una resolución de 0.1 ° cada 3 horas disponible desde 1979 a ~ 3 horas en tiempo real. El producto es único porque combina datos de medición, satélites y de reanálisis para obtener estimaciones de precipitación de la más alta calidad en cada ubicación. Dada su resolución temporal y espacial puede ser útil para los procesos dentro del FEWS Colombia. Existen múltiples referencias que mencionan de las cualidades y brechas de estos productos, como:

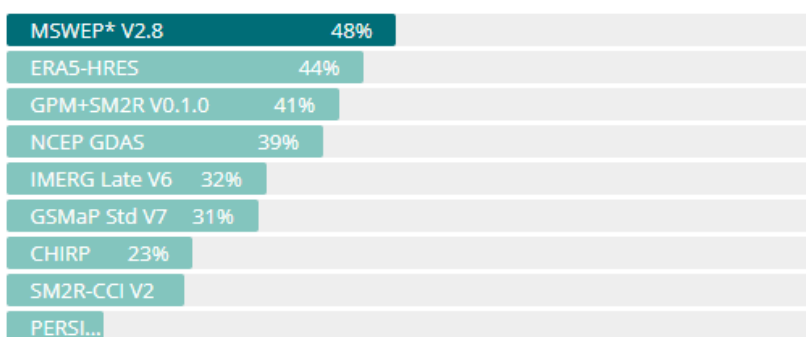
- Beck, H. E., Van Dijk, A. I., Levizzani, V., Schellekens, J., Miralles, D. G., Martens, B., & Roo, A. D. (2017). MSWEP: 3-hourly 0.25 global gridded precipitation (1979–2015) by merging gauge, satellite, and reanalysis data. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(1), 589-615.
- Beck, H. E., Wood, E. F., Pan, M., Fisher, C. K., Miralles, D. G., Van Dijk, A. I., ... & Adler, R. F. (2019). MSWEP V2 global 3-hourly 0.1 precipitation: methodology and quantitative assessment. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 100(3), 473-500.

Reference: Stage-IV gauge-radar data



Values represent the mean daily temporal R² over the US
Adapted from Beck et al. (2019)

Reference: 75,540 gauges worldwide



Values represent the mean 3-day temporal R²
*Version without gauge corrections
Publication in preparation

Figura 15 Comparación de Productos, obtenido de <http://www.gloh2o.org/mswep/>

Los productos MSWEP pueden ser accedidos una vez es solicitada una licencia de creative commons en la página <http://www.gloh2o.org/mswep/>. La información se encuentra alojada en una carpeta compartida de Google Drive y se encuentra en formato Netcdf. Esta se encuentra dividida en información pasada y cuasi tiempo real. La primera posee información Global (escala temporal de 3 horas y espacial de 0.1°) desde el año 1979 hasta el año 2020. La información cuasi real esta desde el año 2020 hasta la actualidad. En la base de datos la información es publicada un día después de haber realizado las mediciones.

Los productos de precipitación MSWEP son reportados aproximadamente cada 3 horas de manera diaria, y con latencias de 2 horas y media aproximadamente (el archivo está disponible 3 horas después de su estampa de tiempo).

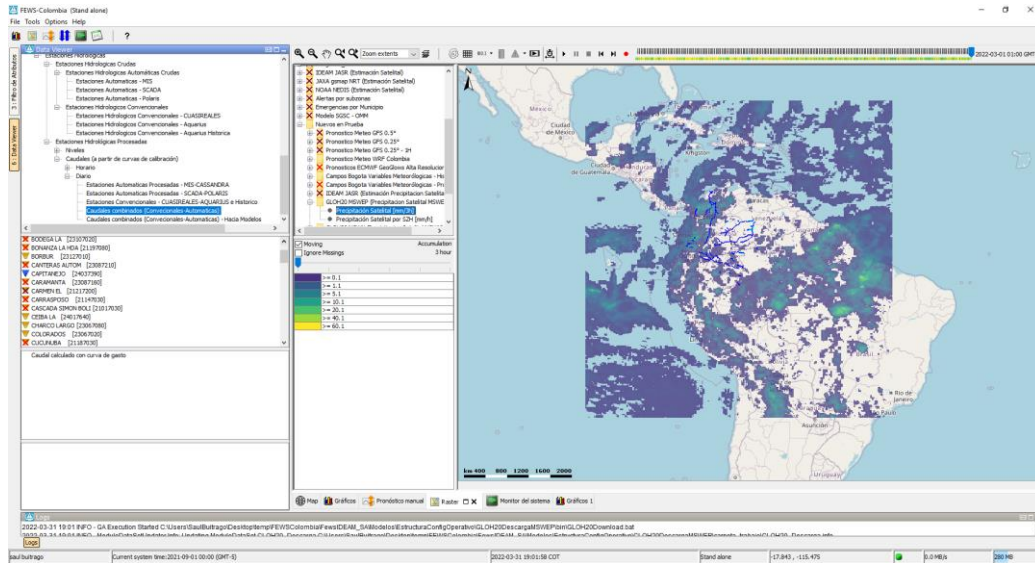


Figura 17 Precipitación de MSWEP en el FEWS Colombia para 01 de marzo de 2022

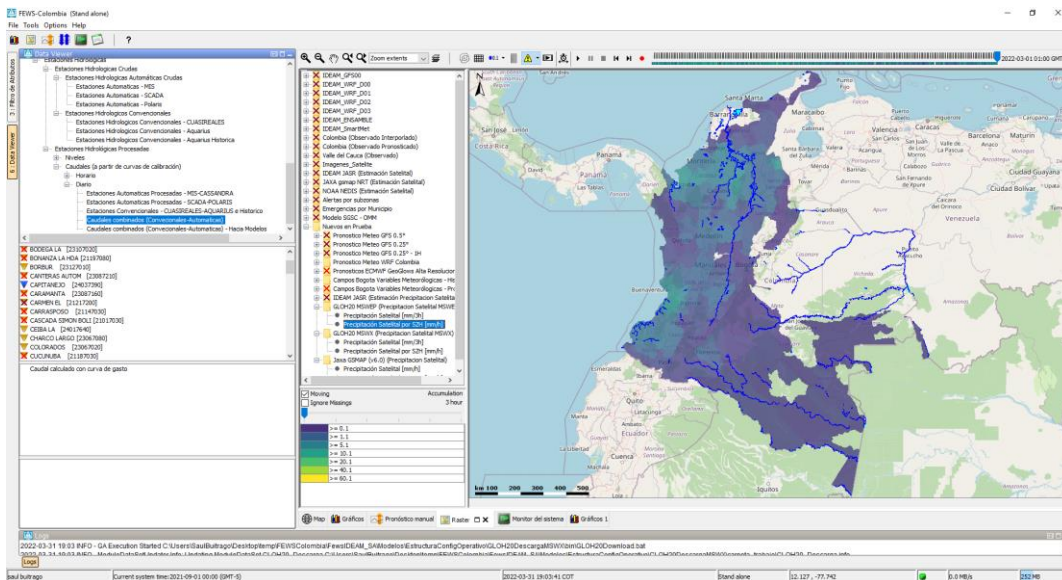


Figura 18 Producto MSWEP por subzona hidrográfica

GloH20 posee más productos en adición al MSWEP. El MSWX (<http://www.gloh2o.org/mswx/>) es un producto similar al MSWEP, este producto es la combinación de un conjunto de productos satelitales y posee pronósticos a mediano (10 días) y largo plazo (7 meses). Los pronósticos son probabilísticos el primero con 30 miembros y el segundo con 51 miembros.

A partir del código desarrollado para la descarga del MSWEP, se extendieron los procesos para descarga de los productos de MSWX para la información en medición cuasi tiempo real, y los productos de pronóstico. Por lo que se configuró los módulos de adaptador general, y de importación.

Adicionalmente para todos los productos se configuraron los módulos de procesamiento para tener precipitación promedio sobre cuenca a nivel de subzona hidrográfica.

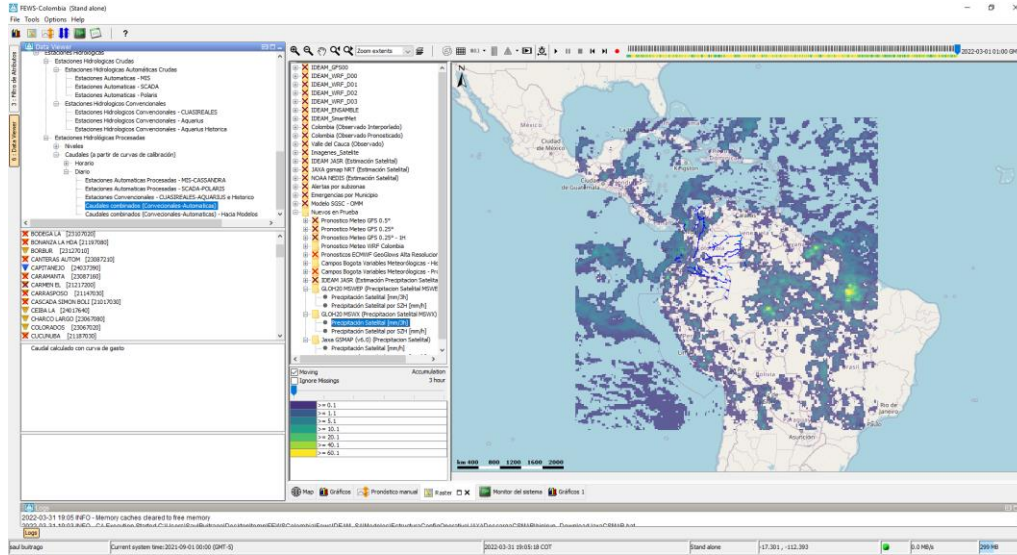


Figura 19 Producto MSWX Colombia para 01 de marzo de 2022

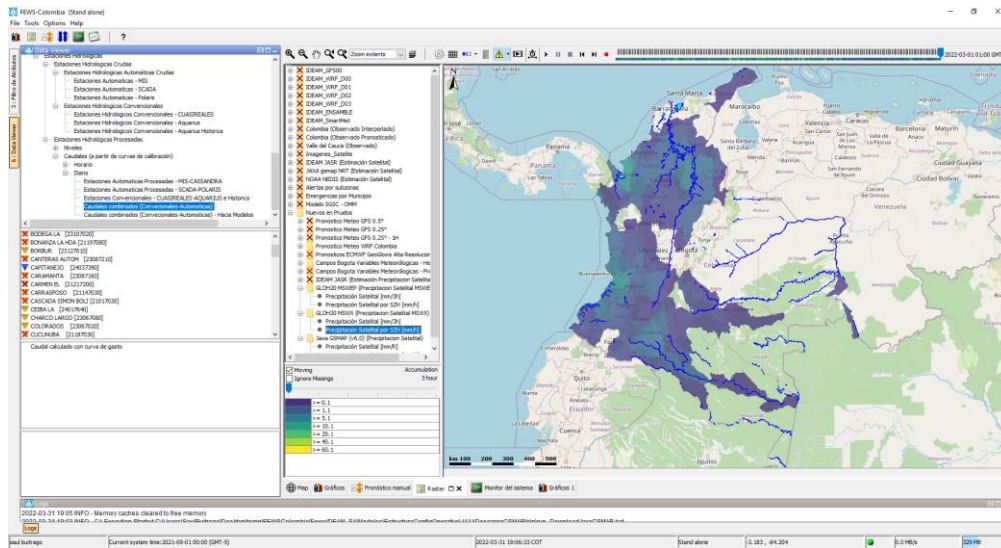


Figura 20 Producto MSWX por subzona hidrográfica

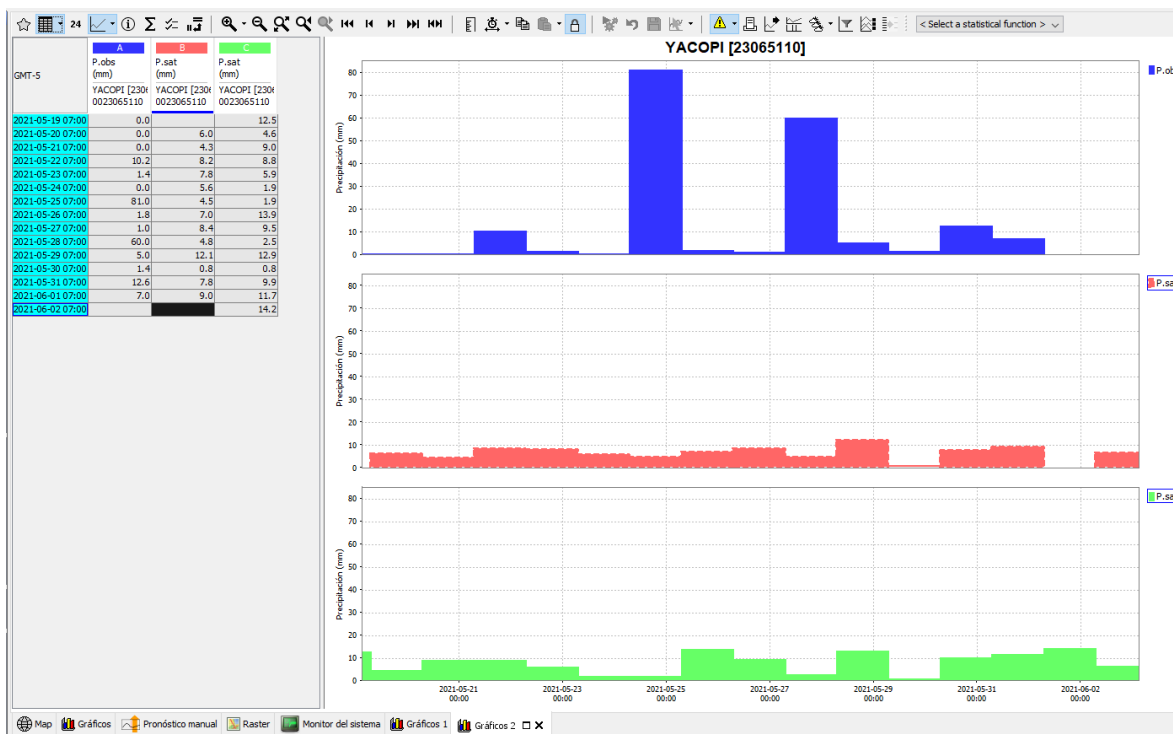


Figura 21 Comparación simple entre precipitación observada y la precipitación satelitales de los productos MSWEP(verde) y MSWX (rojo)

2.4.1.4.2 Estimación de Evapotranspiración con fines de pronóstico

La evapotranspiración potencial es una variable de mucha importancia para el pronóstico hidrológico, especialmente cuando los modelos hidrológicos incorporados en la cascada de pronóstico son continuos y están basados en el balance de humedad del suelo (“soil accounting”). Tal como los que están implementados en el sistema FEWS Colombio o están contemplados para incorporar.

Actualmente, el sistema FEWS Colombia hace uso de series de tiempo climatológicas para estimar de manera mensual la evapotranspiración potencial a usar por los modelos hidrológicos. Según el Manual de FEWS Colombia, en su capítulo de evaporación menciona que: “Los datos de evaporación disponibles para FEWS Colombia tienen limitaciones, los datos de variables que se pueden utilizar para calcular la evaporación con el método por ejemplo de Penman Monteith poseen incertidumbres que no les permite realizar una adecuada representación de la variable. Por este motivo se ha definido una evaporación climatológica para su uso en los modelos. Los datos de evaporación climatológica provienen del banco de datos de IDEAM”.

Por estas razones, en el Producto 4 recomienda emplear una ecuación simplificada como la de Hargreaves Samani, 1985. Mas aún, estudios como Oudin⁷ mencionan los beneficios y propone emplear una estructura simple basada en temperatura (dato hidrometereológico accesible) para alimentar modelos de lluvia esorrentía. La estructura de cálculo de Hargreaves fue evaluada en los estudios de Oudin, y se pretende hacer la evaluación dentro de las cascadas de procesos para el VMM. Actualmente, en el IDEAM no se ha realizado una evaluación comparativa entre el empleo de evaporación climatológica y evapotranspiración potencial estimada a partir de una ecuación como la propuesta arriba. La incorporación del cálculo en la cascada de procesos podrá informar acerca de si una estimación a partir de información de temperatura puede mejorar el pronóstico hidrológico o si los modelos puede que sean insensibles a las condiciones de variabilidad de la evapotranspiración.

⁷ Oudin, L., Hervieu, F., Michel, C., Perrin, C., Andréassian, V., Anctil, F., & Loumagne, C. (2005). Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall–runoff model?: Part 2—Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall–runoff modelling. *Journal of hydrology*, 303(1-4), 290-306.

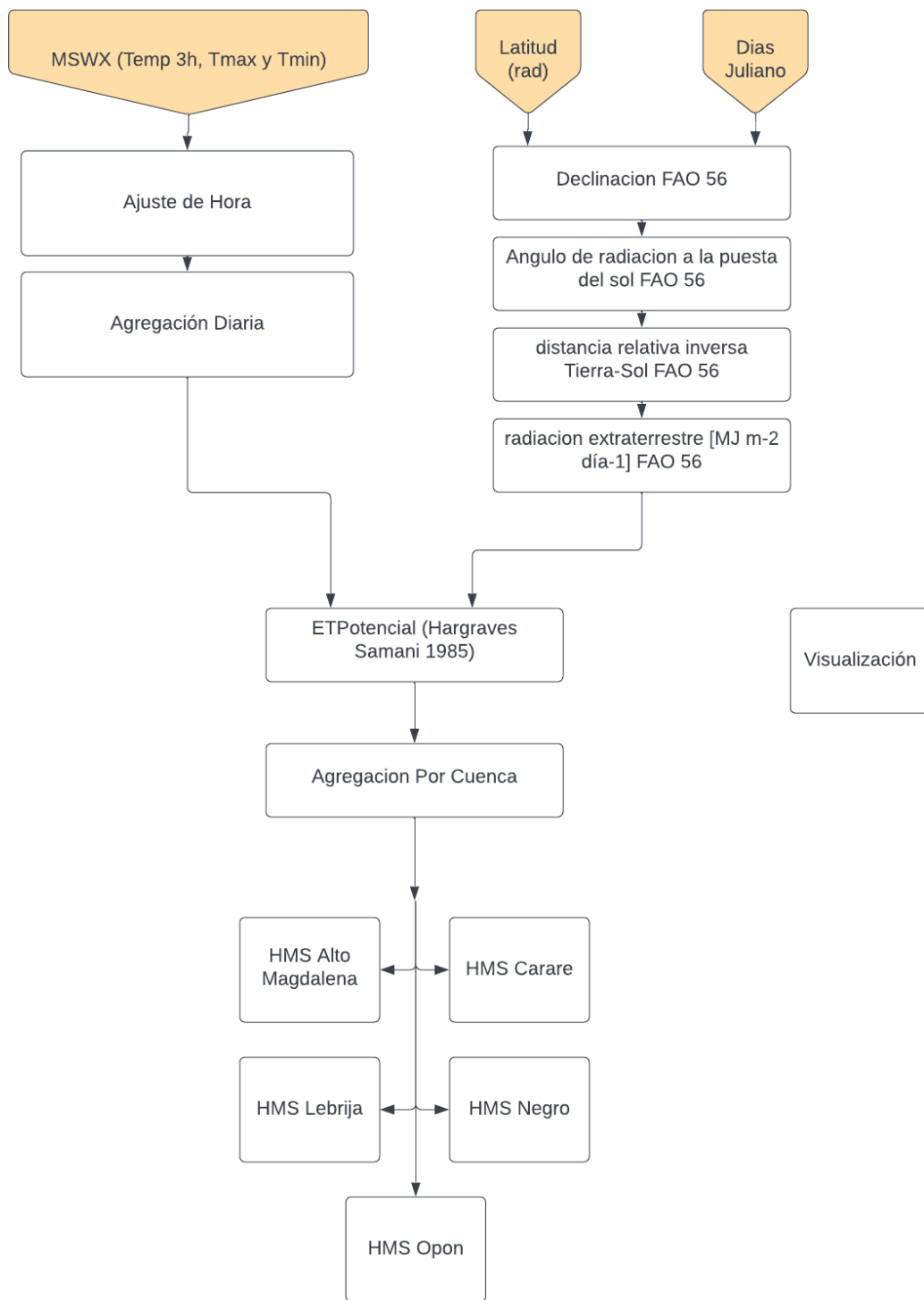


Figura 22 Procesos para estimar la Evapotranspiración Potencial a partir de Hargreaves y Samani 1985

La estimación de evapotranspiración según Hargreaves y Samani es realizada mediante la siguiente expresión:

$$ETP = 0.023 * Ra * (Tm + 17.8) * (Tmax - Tmin)^{0.5}$$

Dónde:

ETP: Evapotranspiración Potencial (mm/día)

Ra: Radiación solar extraterrestre (mm/día)

Tm: Temperatura media diaria (°C)

Tmax: Temperatura máxima diaria (°C)

Tmin: Temperatura mínima diaria (°C)

Para la incorporación de la cascada de procesos del cálculo de evapotranspiración según Hargraves se empleó la información de Temperatura (distribuida) proveniente de la fuente de datos MSWX. Entonces, se empleó la temperatura con paso temporal de 3 horas de MSWX para el cálculo de la temperatura media diaria, adicionalmente se usaron los productos de MSWX de temperatura máxima y mínima, diarios, presentados por MSWX. Adicionalmente, se emplearon el conjunto de ecuaciones propuestas por el documento de FAO 56 para la estimación de la radiación extraterrestre⁸. El proceso de cálculo siguió la estructura mostrada en la figura 3.

La incorporación dentro de la cascada de proceso consistió en:

- Configuración de los procesos de importación de productos de temperatura de MSWX, para ello se empleó la misma estructura de configuración para la descarga de los productos de precipitación, pero con los parámetros para descargar los productos de temperatura.
- Configuración de procesos de transformación para ajustar los productos de precipitación a las horas definidas por IDEAM,
- Configuración de los procesos de transformación para obtener temperaturas promedio diario a partir de la información de cada 3 horas.
- Configuración de las expresiones de cálculo de Declinación, Angulo de radiación a la puesta de sol, distancia relativa inversa de Tierra-Sol, y Radiación Extraterrestre. Estas expresiones fueron tomadas de FAO 56. Todas estas variables dependen del día Juliano y de la latitud.
- Configuración del cálculo de ETP (distribuido) a partir de Hargraves y Samani 1985

⁸ Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (2006). Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Roma: FAO, 298(0).

- Agregación por cuenca de los valores de ETP sobre cuencas aportantes que alimentan los modelos hidrológicos del VMM.
- Configuración de nuevos adaptadores generales donde los modelos hidrológicos existentes empleen la evapotranspiración proveniente del proceso de cálculo antes mencionado. Esto quiere decir, que, en adición a la configuración actual, la cual considera información de evaporación climatológica, se posee otra que consume la evapotranspiración a través del método de Hargreaves.

Es importante destacar que para el cálculo de evapotranspiración se consideró el procesamiento de manera distribuida. De tal manera que se pudiera emplear estos productos en otras áreas del territorio colombiano en el caso que se requiera. Adicionalmente, se configuraron los procesos para que pudiesen correr de manera continua y diaria, e incorpore la última información existente del MSWX en el sistema FEWS Colombia. La cascada de procesos produce entonces de manera diaria información distribuida de precipitación a una resolución de 0.1°.

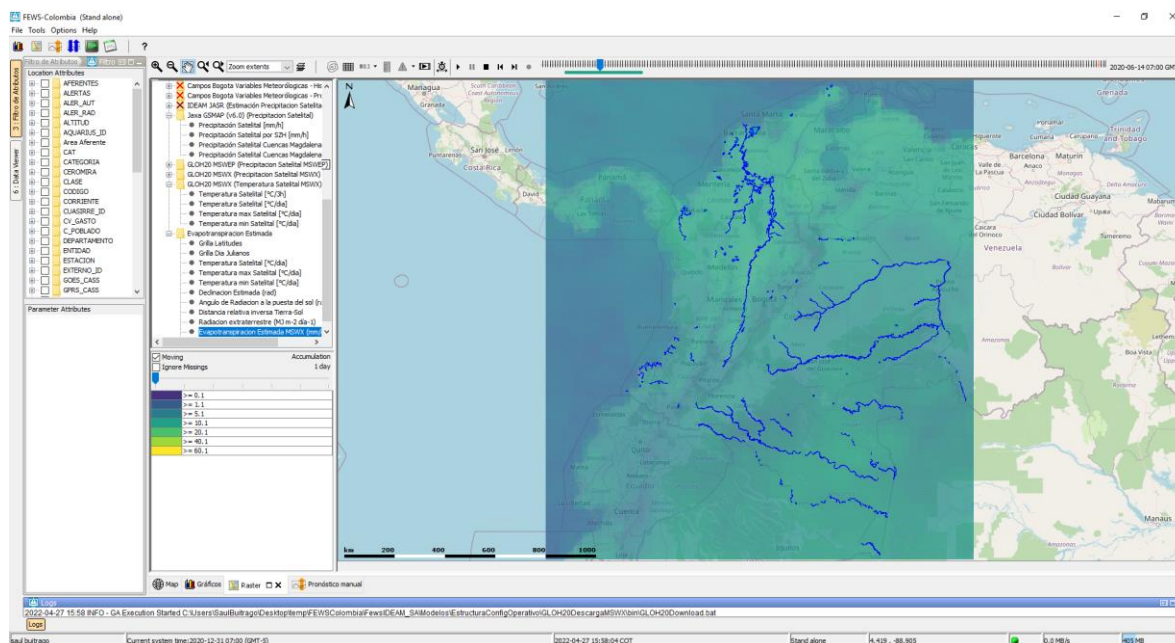


Figura 23 Producto de evapotranspiración sobre el FEWS Colombia

Finalmente, este proceso fue complementado con toda la configuración correspondiente a la visualización de la información a través del explorador del FEWS Colombia.

2.4.1.4.3 Adecuación de los Nuevos Modelos Hidrológicos al Sistema FEWS Colombia

Tal como se mencionó anteriormente, el producto 4, del marco de acuerdo de cooperación – AC No. 4 (3034153) derivado del Convenio Marco de Colaboración No. 5212957, generó un conjunto

modelos hidrológicos desarrollados en código R. Este módulo entonces es responsable del intercambio de datos entre el FEWS y los módulos externos, y la ejecución de los módulos. El desarrollo de los adaptadores se dividió en la construcción de dos rutinas: el preadaptador y el post adaptador, cada uno tiene sus propias funciones.

El preadaptador fue desarrollado en lenguaje Python y fue desarrollado con el fin entonces para:

- Leer la información exportada del sistema FEWS Colombia (archivos de configuración de la simulación, archivos de series de tiempo),
- Transformar la información de serie de tiempo en formato que pueda ser leído por el modelo hidrológico,
- Adecuar archivo de configuración con aspectos específicos de la simulación que será leído por modelo hidrológico.

Por otro lado, El posadaptador fue desarrollado con el fin entonces de:

- Leer la información de los resultados de modelo de simulación,
- Transformar la información de serie de tiempo de los resultados de simulación en formato que pueda ser leído por el sistema FEWS Colombia, es decir, formato de interfaz pública en XML.

```

1 # -*- coding: utf-8 -*-
2 """
3 Created on Wed May 18 17:29:22 2022
4
5 PreAdaptador de Modelos Hidrologicos GR(en R) para FEWS Colombia
6
7 @author: SaulBuitrago
8 """
9 import os
10 import sys
11 import xmltodict
12 import pandas as pd
13 import numpy as np
14 from datetime import datetime
15
16
17 print ("Inicio de Preadaptador GR4J")
18
19 #Entrada de Argumentos
20 #Argumento 1: ruta del archivo runfile exportado por el FEWS Colombia
21 #Argumento 2: ruta de la carpeta de trabajo donde se encuentra el config_template.dat para ejecutar el model GR
22
23 inArg = sys.argv
24
25 #os.chdir('c://Users/SaulBuitrago/Desktop/temp//FEWS Colombia Workspace//Code//VWMagdalena//')
26
27 ## Lectura del archivos de propiedades exportado por FEWS para conocer el T0, y calcular la estampa
28 #de tiempo de inicio (init) y la estampa de tiempo de fin (fint). Tambien extraer ubicaciones de estados
29
30 fnameT = inArg[1]
31 #fnameT = './runFile.xml'
32
33 nArg = len(inArg)
34
35 print(f'Argumentos empleados -- numero {nArg} -- {inArg[0]} -- {inArg[1]} -- {inArg[2]}')
36
37 print(f'Inicio de Lectura de {fnameT}')
38
39 with open(fnameT, "r") as rdfile:
40     lines = rdfile.readlines()
41
42 # Seleccion fechas de inicio y fin
43
44 stp = datetime(int(lines[4][25:29]),int(lines[4][30:32]),int(lines[4][33:35]),int(lines[4][43:45]),int(lines[4][46:48]),int(lines[4][49:51]))
45 etp = datetime(int(lines[5][23:27]),int(lines[5][28:30]),int(lines[5][31:33]),int(lines[5][41:43]),int(lines[5][44:46]),int(lines[5][47:49]))
46

```

Figura 25 Extracto inicial del Preadaptador

```

###
##Preparacion de Informacion para importar al FEWS Colombia
#Lectura de Series de tiempo

print("Inicio de Preparacion de archivos de datos")

#Lectura de archivo de salida del Modelo

df = pd.read_csv(outfile)
col = list(df.columns)
tst = len(df[col[1]])

#Lectura del Archivo Template de FEWS para resultados

outFileTs = lines[11][26:164]

print("Lectura de XML de Series de Tiempo")

with open(outFileTs, "r") as Tsfile:
    docOs = xmldict.parse(Tsfile.read())

ts = len(docOs['TimeSeries']['series'])

if ts == 1:
    evnts = []
    for t in range(tst):
        evnt = OrderedDict()
        evnt['@date'] = df[col[1]][t]
        evnt['@time'] = '12:00:00'
        evnt['@value'] = df[col[2]][t]
        evnt['@flag'] = '2'
        evnts.append(evnt)

    docOs['TimeSeries']['series']['event'] = evnts

else:
    for s in range(ts):
        evnts = []
        for t in range(tst):
            evnt = OrderedDict()
            evnt['@date'] = df[col[1]][t]
            evnt['@time'] = '12:00:00'
            evnt['@value'] = df[col[2]][t]
            evnt['@flag'] = '2'

```

Figura 26 Extracto del PosAdaptador

Estas rutinas antes mencionadas fueron puesta a pruebas en entorno FEWS Stand-Alone. Para ello se realizó la configuración del adaptador general del modelo hidrológico GR sobre el sistema FEWS Colombia. Una vez configurado, fue ejecutado tratando de reproducir el ambiente operacional. Las pruebas se realizaron ejecutando las rutinas como si estuviesen trabajando el sistema de manera diaria durante 6 meses. A través de estas pruebas se hicieron ajustes al código para el óptimo funcionamiento de las rutinas, y se eliminaron posibles errores que pudiesen encontrarse.

Adicionalmente al desarrollo de los adaptadores, para la configuración de los modelos de simulación hidrológica en el FEWS Colombia se debió reestructurar los nuevos modelos hidrológicos desarrollados en el producto 4. De tal manera que pudiesen correr dentro del entorno FEWS Colombia. La estructuración consistió en la generalización del código. El código presentado para el producto 4 se estructuró con fines de realización de un cálculo hidrológico y no con fines de usar el código en un sistema operacional (es decir, de que corre automáticamente y de manera diaria).

La generalización del código consistió en reestructurar los algoritmos, en código R, que permitieran de manera secuencial leer aspectos específicos de la simulación, leer las variables de entrada, y ejecutar el modelo. Adicionalmente, la generalización consistió en tener una rutina que pueda ser

utilizada por diferentes modelos hidrológicos, es decir, la implementación del modelo sobre diferentes cuencas. Como es el caso actual, en el que se deben implementar un modelo para el Río Opon y una para la cuenca del Sogamoso.

La rutina fue desarrollada en código R. Esta lee un archivo de configuración que posee información acerca de las características específicas del modelo como:

- Área de la cuenca
- Parámetros de calibración
- Fechas de inicio y fin de la simulación
- Ubicación de estados iniciales y donde grabar estado final
- Ubicación de donde escribir resultados de la modelación

```
### CONFIG FILE MODELOS GRJ #####
### NOTA - Mantener estructura como se muestra abajo, no incluir espacios en variable area o parametros.
##Parametros X1, X2, X3, X4 Segun Modelo
##Cuenca Rio:Sogamoso-CAL:RFMerge-GR4J
Area[m2]=3408026154.762
Parametros=28.89,16.77,152.47,1.92
#####De aqui para abajo es agregado por el preadaptator del modelo#####
##Fechas de Inicio y Fin de Corrida
Start=2020-11-20
End=2020-11-30
##Ubicacion de Estados
StateIn=C:/Users/SaulBuitrago/Desktop/temp/FEWSColombia/FewsIDEAM_SA/Modelos/EstructuraConfigOperativo/C
StateOu=C:/Users/SaulBuitrago/Desktop/temp/FEWSColombia/FewsIDEAM_SA/Modelos/EstructuraConfigOperativo/C
##Ubicacion de Archivo de Entrada
Pre=C:/Users/SaulBuitrago/Desktop/temp/FEWSColombia/FewsIDEAM_SA/Modelos/EstructuraConfigOperativo/GR4J/
ETP=C:/Users/SaulBuitrago/Desktop/temp/FEWSColombia/FewsIDEAM_SA/Modelos/EstructuraConfigOperativo/GR4J/
##Ubicacion de Archivo de Salida
outfile=C:/Users/SaulBuitrago/Desktop/temp/FEWSColombia/FewsIDEAM_SA/Modelos/EstructuraConfigOperativo/C
```

Figura 27 Parte de la estructura del documento de Configuración de la Simulación

La rutina realiza las siguientes actividades de manera secuencial:

1. Carga al entorno las librerías especificadas
2. Lee los argumentos de entrada
3. Abre y lee el archivo de configuración para extraer información de Area, parámetros de calibración, fechas de inicio y fin, ubicación de estados iniciales, ubicación de destino donde se escribirán los estados finales y los resultados.
4. Asignación de variables
5. Lectura de archivos con series de tiempo de entrada (precipitación y evapotranspiración)
6. Carga de Estados Iniciales
7. Ejecución de la simulación

8. Escritura de resultados

9. Guardar estados finales

La rutina fue creada para trabajar de manera articulada con los pre y posadaptadores. Y bajo las condiciones específicas de modelación en las que se encuentran los modelos creados en el producto 4. Es decir, modelos completamente agregados, con una sola entrada de precipitación y de evapotranspiración y con una sola salida (caudales). También el código fue creado para ejecutar el modelo GR4J, es decir un modelo que emplea 4 parámetros de calibración y un paso de tiempo diario. El código actual tiene espacio para mayor generalización considerando lo anterior y los cambios requeridos no deben ser sustanciales.

El código fue puesto a prueba empleando el sistema FEWS Colombia en estado Stand-Alone. Para ello se realizó la configuración del adaptador general respectivo, y se simuló el proceso operativo del sistema, es decir, la ejecución de simulaciones hidrológicas de manera diaria.

Una vez creados los adaptadores, que facilitaran el intercambio de datos y la ejecución de simulaciones hidrológicas, se realizó la configuración del adaptador general sobre el FEWS Colombia. La configuración del adaptador general del FEWS Colombia para los modelos hidrológicos consiste en preparar las condiciones en las cuales el sistema ejecutará la simulación hidrológica en el ambiente operacional.

Para alimentar este proceso también se debió realizar la configuración de los procesos de transformación de series de tiempo que permitan preparar la información que será exportada al momento que se ejecute el adaptador general. Esto quiere decir, los procesos de transformación necesarios para crear las series de tiempo de precipitación y de evapotranspiración que serán exportadas. Por lo tanto, se crearon un conjunto de módulos de transformación que prepararan las variables meteorológicas (precipitación y evapotranspiración) en valores medios sobre área de las cuencas a modelar considerando las múltiples fuentes de información que existen. Para ello se crearon módulos de transformación para:

- Crear precipitación media sobre cuenca a partir de las estaciones de medición
- Crear precipitación media sobre cuenca a partir de información distribuida (en grilla o raster) proveniente de fuentes de información como GSMAP, MSWX, MSWEP
- Crear evaporación media sobre cuenca a partir de las estaciones con información de evaporación climatológica

- Crear precipitación media sobre cuenca a partir de información distribuida (en grilla o ráster) proveniente del cálculo de evapotranspiración empleando Hargreaves y los datos de temperatura de MSWX

El adaptador general fue configurado para un conjunto de diversas fuentes de información considerando las propuestas del producto 4.

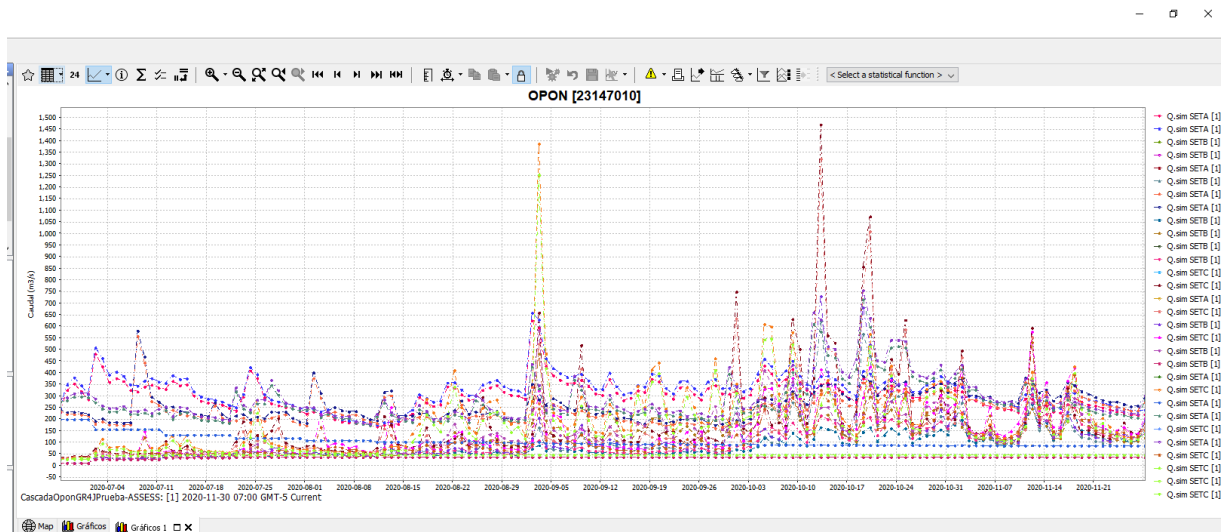


Figura 28 Resultados Preliminares Modelo hidrológico GR4J Opón

2.4.1.4.4 Adecuación del Nuevo Modelos Hidráulico al Sistema FEWS Colombia

El producto 4 y 5, del marco de acuerdo de cooperación – AC No. 4 (3034153) derivado del Convenio Marco de Colaboración No. 5212957, generó una actualización del modelo hidráulico actualizado para el valle medio del Río Magdalena.

En el FEWS Colombia el Valle medio del Río Magdalena se encuentra representando por 3 modelos hidrodinámicos solapados. El modelo que se ajustó representa el tramo comprendido entre Puerto Berrio y Sitio Nuevo. El modelo actualizado es unidimensional en estado no permanente, este es fue configurado en el software DHI Mike11.

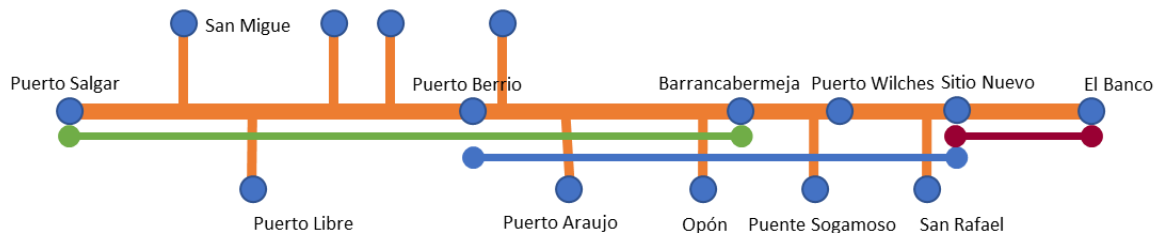


Figura 29 Presentación esquemática del tramo del Valle Medio del Río Magdalena y representación de los tramos de los tres modelos hidrodinámicos solapados (Verde: tramo Puerto Salgar - Barrancabermeja, Azul – tramo Puerto Berrío – Sitio Nuevo, Sepia: Tramo Sitio Nuevo – El Banco)

Los ajustes del modelo giraron en torno a la modificación topológica del modelo existente, lo cual incluye:

- Eliminación del brazo del Río Sogamoso
- Eliminación de cambios bruscos en el lecho del río Magdalena
- Cambio de topología, se añadieron nuevas secciones transversales al modelo.
- Integración de nuevas condiciones de borde para cuencas aportantes no consideradas en el modelo actual (Aporte de río San Bartolomé, Cimitarra y otros directos).
- Inclusión de estructuras que simularan los desbordamientos en el río, de tal manera que se garantice hasta cierto nivel los volúmenes de agua transitados.

El software DHI Mike11 desarrolla su propio adaptador para que las simulaciones hidráulicas puedan ser ejecutadas a través del FEWS Colombia. El adaptador:

- transforma la información exportada por el FEWS Colombia (en formato xml) al formato DHI Mike11 de series de tiempo (formato dfs0)
- ajusta el archivo de configuración de la simulación (sim11) con las fechas apropiadas
- Crear un archivo con las series de tiempo simuladas en formato leíble por el FEWS Colombia (formato xml)

Considerando todo lo anterior, se realizaron los ajustes a la configuración de todo el módulo que ejecutará las simulaciones hidráulicas. Los cambios se realizaron en el archivo de configuración del adaptador. Donde se incluyó y se ajustaron las locaciones e IDs de las nuevas condiciones de borde. Adicionalmente, se realizó todo un ajuste a la abscisa de los puntos de interés que se exportarán para el sistema FEWS Colombia (en las estaciones donde se visualizarán los resultados de las simulaciones).

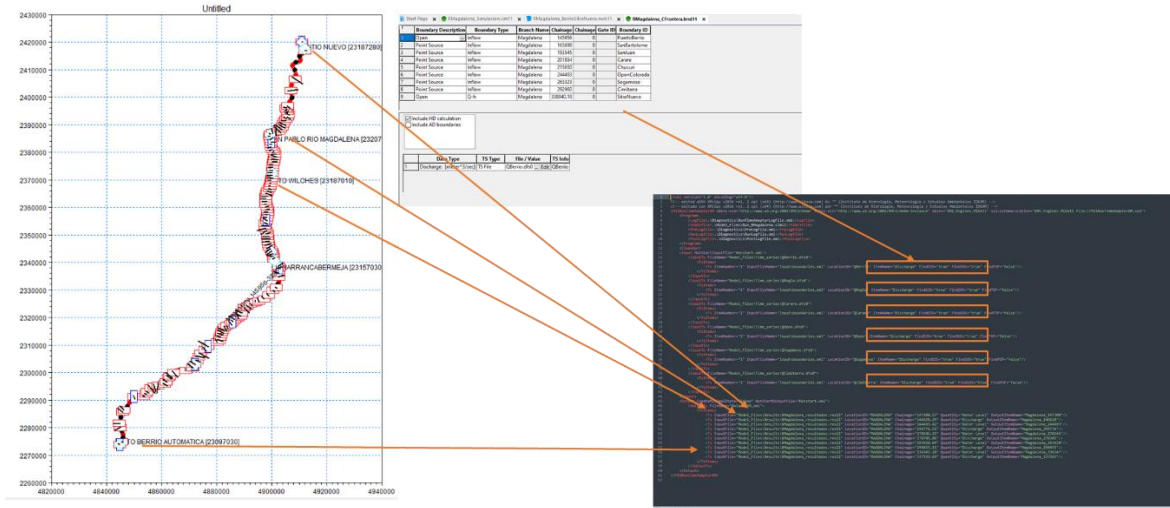


Figura 30 Explicación esquemática de los cambios en el archivo de configuración del adaptador

2.4.1.5 Nueva Cascada de Procesos dentro del FEWS Colombia

Para la Cuenca del Río Magdalena se construyó una cascada donde que a lo largo de los procesos son implementados un conjunto de modelos hidrológicos e hidráulicos. En la figura 29 se muestra esquemáticamente como se encuentran representados cada zona dentro de la cuenca.

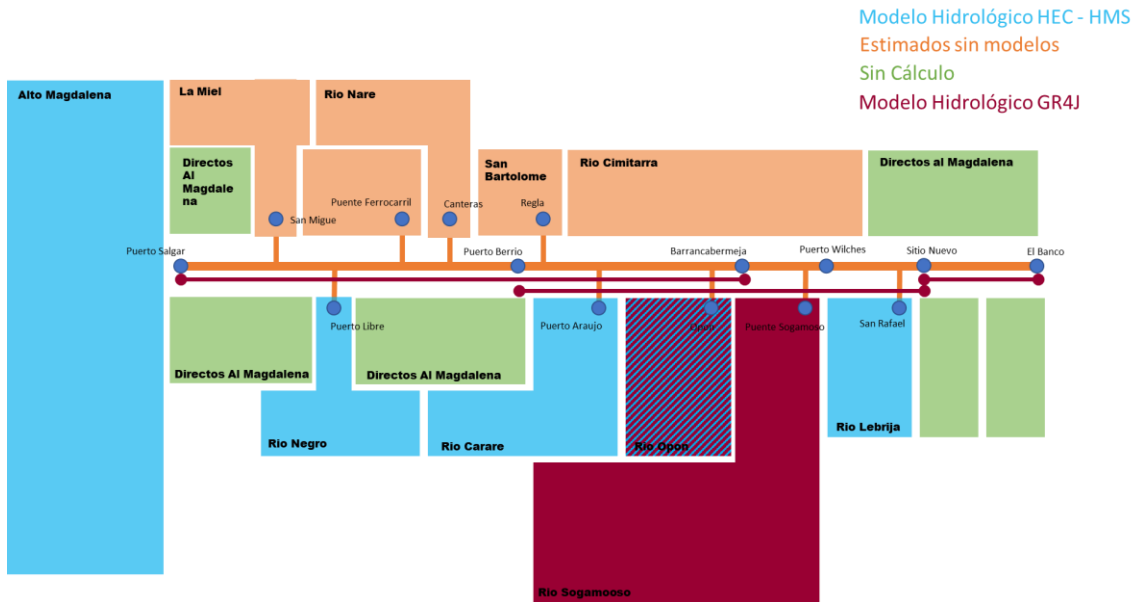


Figura 31 Esquemática de los modelos del Río Magdalena

Se ha estructurado una cascada de procesos para el pronóstico hidrológico de tal manera que se ejecuten diferentes realizaciones de la cascada con combinaciones de diferentes fuentes de

información. Para la cascada encargada de la actualización de los estados (update), la cascada es alimentada por forzamientos (precipitación) producidos por diferentes fuentes de información: estaciones de la red de monitoreo IDEAM, así como, los productos de precipitación histórica provenientes de la JAXA (GSMAP) y GLOH20 (MSWX, MSWEP), adicionalmente, una combinación a través del promedio de todas las anteriores. Posteriormente, para el pronóstico los estados actualizados son combinados con diferentes forzamientos provenientes de diversos productos de pronóstico: WRF desarrollado por IDEAM y los diversos productos GFS (0.5°, 0.25° y 0.25°-1h) desarrollados por NOAA. Esto produce la combinación de múltiples combinaciones, en total son 20 cascadas de pronóstico que corren de manera simultánea.

Adicionalmente, se incorporó una cascada que hace uso de la evapotranspiración estimada usando el método de Hargreaves y las estimaciones de temperatura de MSWX. Sin embargo, al momento de implementar la cascada no se encontró diferencias con la estimación climatológica. Una evaluación más detallada determinó que los modelos hidrológicos requieren una calibración más detallada, donde exista una separación de flujos entre los caudales superficial y base (según las conceptualizaciones de los modelos hidrológicos). Los modelos hidrológicos, para el año 2022, están funcionando (independientemente de la conceptualización HMS o GR4J) mayormente la porción de caudal base en la estructura conceptual del modelo. Esto hace que los modelos sean muy poco sensibles a los efectos de la evapotranspiración. La futura calibración de los modelos hidrológicos deberá abordar esta situación, y de tal manera que se pueda evaluar el impacto de la evapotranspiración climatológica o estimada en los modelos hidrológicos y en el pronóstico.

Los modelos hidrológicos son ejecutados a través de un módulo adaptador general. Para el caso de los módulos de actualización del estado. Estos modelos corren una ventana de simulación de 10 días (desde 10 días antes hasta el presente – T0). Al finalizar de ejecutar los modelos, estos actualizan los estados (iniciales) que serán usados por las simulaciones con fines de pronóstico y por futuras simulaciones de actualización del estado.

Para el caso de las simulaciones de pronóstico, los modelos también son ejecutados por un módulo adaptador general. Los módulos de pronóstico ejecutan los modelos hidrológicos para una ventana de simulación que se extiende -10 días y de 5 a 15 días hacia el futuro dependiendo de producto de pronóstico. Para esto dentro de los módulos de preparación de los datos se ha establecido una unión de series de tiempo históricas con pronóstico.

La estimación de caudales y niveles a lo largo del río Magdalena consiste en la ejecución de dos modelos hidrodinámicos ejecutados en el software DHI Mike11. Los dos modelos se encuentran solapados. El primer modelo se extiende desde Pto Salgar hasta Barrancabermeja. El segundo, se extiende entre Pto Berrio hasta Sitio Nuevo. Los modelos trabajan en cascada, el primer modelo realiza simulaciones y posteriormente los valores simulados (y corregidos a través de un módulo ARMA) son impuestos como condición de borde en el segundo modelo.

Para correr los modelos de Mike 11 hay que ajustar las condiciones de contorno. Las condiciones de contorno del modelo Mike 11 se ubican en las estaciones hidrológicas. Sí existe una estimación de caudal en la estación mediante un modelo hidrológico, se aplican los caudales simulados previamente corregidos mediante un modelo de predicción de error a través de un ARMA⁹.

El proceso de pronóstico en el río Magdalena incluye los siguientes pasos:

1. Importación de información medida (principalmente precipitación y niveles en los cuerpos de agua) obtenida en las estaciones automáticas provenientes de las bases de datos Polaris, Cassandra, y Aquarius del IDEAM
2. Descarga e importación de información de precipitación medida a través de satélites de fuentes JAXA y GLOH20
3. Descarga de pronósticos de precipitación (WRF y NOAA GFS)
4. Procesamiento de la información medida (series de tiempo) con el fin de llenar espacios vacíos la cual se realiza mediante interpolación lineal. De la misma manera, se emplea la unión jerárquica de series de tiempo (provenientes de diferentes fuentes de información)¹⁰ cuando los espacios vacíos (en las series de tiempo) son muy extensos y el uso de interpolación lineal no es adecuado.
5. Cálculo de precipitación media sobre cuenca. Para el caso de los procesos que emplea información medida se utiliza el método de interpolación mediante la distancia inversa ponderada (IDW por sus siglas en inglés). Para las cascadas de procesos en las cuales se emplea información de precipitación satelital (JAXA, GLOH20) ó de pronóstico

⁹ <https://publicwiki.deltares.nl/pages/viewpage.action?pageId=8683839>

¹⁰ Para más detalle de la unión jerárquica ir a: <https://publicwiki.deltares.nl/display/FEWSDOC/Simple+Merge>

- meteorológico (WRF o GFS), la cual es información del tipo “raster” (distribuido), se emplea el promedio basado en los pixeles que se encuentran dentro de los límites de cuenca.
6. El sistema FEWS posee configurado un módulo que crea series de tiempo de evaporación de acuerdo con la climatología (promedios mensuales multianuales). El sistema FEWS Colombia entonces va creando unas series de tiempo de evaporación climatológica para todo el territorio colombiano.
 7. Una vez preparados los insumos antes mencionados, el sistema FEWS Colombia está configurado para ejecutar, siguiendo una secuencia también configurada, las simulaciones hidrológicas. En términos generales, las simulaciones están configuradas para ejecutarse siguiendo el flujo del agua (de aguas arriba hacia aguas abajo). También las simulaciones históricas (en el sistema llevan el nombre de “update”) se realizan primero considerando que estas crearan los estados (iniciales) de futuras simulaciones (tanto históricas como las de pronóstico). Para el caso del Río Magdalena el sistema:
 - a. Ejecuta los modelos hidrológicos (HEC-HMS) correspondientes a las cuencas de los ríos Carare, Opón, Negro.
 - b. Ejecuta un modelo hidrológico (HEC-HMS) de la parte alta de la Cuenca del Magdalena. El cual incluye la zona de influencia hidrológica aguas arriba del Puerto Salgar (Incluyendo Las cuencas del Bogotá, Sumapaz.
 - c. Ejecuta un modelo hidrológico (HEC-HMS) correspondiente al Río Lebrija.
 - d. Ejecuta los modelos hidrológicos GR4J para los ríos Opón y Sogamoso.
 8. Existen algunas cuencas aportantes al río Magdalena las cuales no poseen un modelo hidrológico configurado, para estos casos se ha empleado diferentes procedimientos para la estimación de caudales producidos por esas cuencas¹¹.
 - a. Para los ríos La Miel (szh: 2308) y Nare (szh: 2305), San Bartolo (szh: 2310) en el caso de las corridas históricas y en los momentos en que no se tenga información medida, se emplea los valores de promedios diarios multianuales provenientes de información medida. Para el caso de pronóstico, se usan los mismos promedios.

¹¹ Ver configuración para saber los valores específicos de caudal – Módulo: M11_Magdalena_DataPrep_Update.xml y M11_Magdalena_DataPrep_Pronostico.xml

- b. Para los ríos Cocorna (szh: 2307), y Cimitarra (szh: 2317), se emplea una estimación de caudal considerando la relación proporcional entre las áreas de las cuencas aledañas (por ejemplo Miel, Nare, San Bartolo) y el área de la cuenca.
 - c. Existen algunas cuencas apotantes al río Magdalena las cuales no se estima caudal como: los Directos al Magdalena entre Guarinos y Miel (szh: 2304), directos al Magdalena entre río seco y negro (szh: 2303), directos al Magdalena entre ríos negro y carare (szh: 2311).
9. Posteriormente a la ejecución de los modelos hidrológicos, en algunos puntos de interés y que corresponde a las condiciones de borde de los modelos hidrodinámicos, el sistema emplea un modelo autorregresivo y de media móvil (ARMA) para pronosticar el error entre los valores observados y simulados (históricos y de pronóstico)¹². Esto asumiendo que las características de los errores en las series de tiempo simuladas se mantienen en el tiempo. Y de esta manera ajustar los resultados de la simulación.
10. El sistema FEWS Colombia tiene configurado para la cuenca del río Magdalena la ejecución de simulaciones hidrodinámicas. La simulación hidrodinámica en el valle medio del río Magdalena es ejecutada a través de 3 modelos hidrodinámicos (usando el software DHI Mike11) configurados en cascada. Estos son:
 - a. Un modelo hidrodinámico desde Puerto Salgar hasta Barrancabermeja. Con condiciones de borde
 - b. Un modelo hidrodinámico desde Puerto Berrio y Sitio Nuevo.
 - c. Un modelo hidrodinámico desde Sitio Nuevo al Banco.
11. Es importante mencionar que los dos primeros modelos se encuentran solapados, es decir, el tramo más aguas abajo del primer modelo corresponde al tramo más aguas arriba del segundo. Específicamente, el solape se encuentra en el tramo de río entre la estación Puerto de Berrio (0023097030) y Barrancabermeja (0023157030). Esto con el fin de ejecutar un modelo de corrección de error ARMA en la estación de Puerto Berrio y reducir las incertidumbres que transitan a lo largo de la cascada de procesos y en la dirección del flujo.

¹² Módulo de Error del sistema Delft FEWS: <https://publicwiki.deltares.nl/pages/viewpage.action?pageId=8683839>

12. En varias estaciones del río, donde el modelo matemático presenta resultados, tiene configurado un modelo de predicción del error ARMA tal como en las salidas de los modelos hidrológicos.
13. Finalmente, en algunos de las estaciones se ha configurado la evaluación de indicadores para la valoración de los resultados de la modelación. Estos incluyen: RMSE, BIAS, R2, Error del Volumen y NSE.

2.4.1.6 Puesta a prueba en Sistema Operacional y resultados

Una vez finalizada las configuraciones del sistema se dispuso de un tiempo para hacerle pruebas funcionales al sistema. Que permitieran corroborar que la cascada de procesos reprodujera de la misma manera los resultados que produciría un modelo hidrodinámico desacoplado al sistema de pronóstico. Por lo tanto, se hicieron un conjunto de pruebas funcionales al sistema.

Las pruebas funcionales consistieron básicamente en la comparación, empleando las mismas condiciones de borde, de los resultados del modelo hidrodinámico Mike11 desacoplado al sistema, con los resultados del mismo modelo acoplado en el sistema FEWS Colombia. Las pruebas se realizaron verificando los resultados del modelo correspondiente al tramo entre Puerto Berrio y Sitio Nuevo. Se empleó el año 2018 para la verificación de los resultados y las evaluaciones se realizaron para la cascada de procesos histórico.

2.4.1.6.1 Primera prueba

De las configuraciones de cascada de procesos, en la primera prueba se utilizó la cascada de procesos histórica que dentro del sistema FEWS es llamado “Magdalena_Update” donde se ejecutan los modelos hidráulicos. Especial atención se le dio al modelo hidrodinámico entre Pto Berrio y Sitio Nuevo. Este modelo consume las condiciones de frontera del modelo hidráulico de aguas arriba (Pto Salgar – Barrancabermeja) corregidas mediante un módulo de corrección de error mediante ARMA. La cascada se ejecutó en modo “Batch” con paso de tiempo de 1 día, modo que permite hacer la simulación por lotes, con tiempos de 10 días previos para cada espacio de tiempo. Las primeras pruebas funcionales arrojaron diferencias entre los resultados simulados entre el modelo desacoplado y el acoplado. Como se ve en la figura se observaban que los resultados del modelo inicialmente presentaban diferencias.

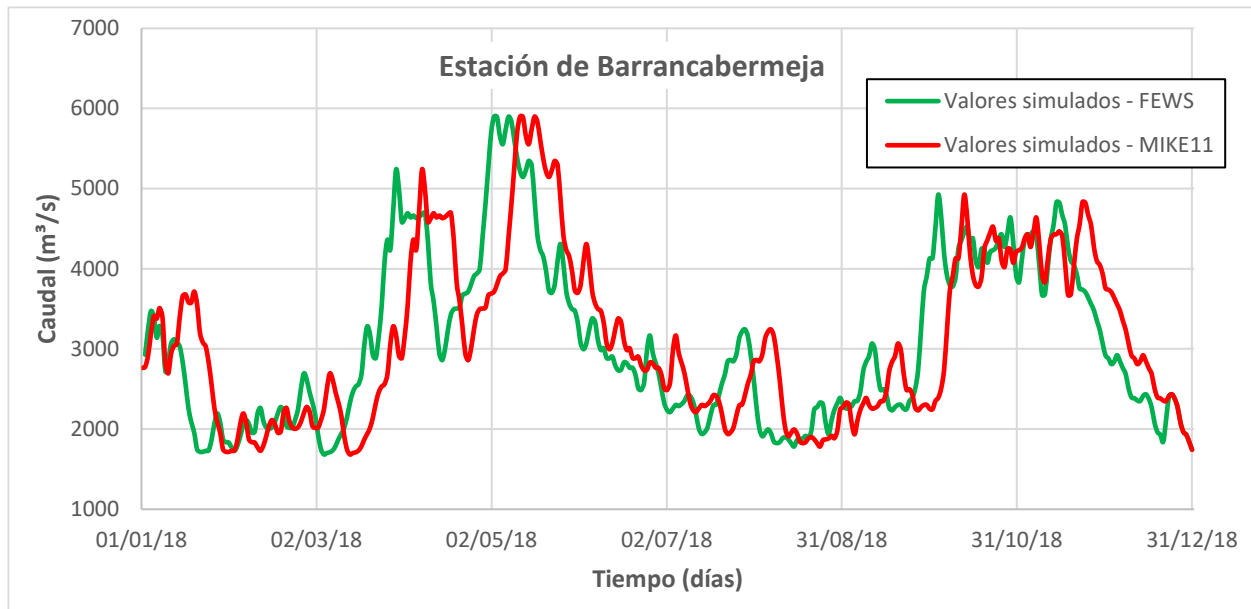


Figura 32 Comparación de los resultados de caudal en la estación de Barrancabermeja a través de la plataforma FEWS-Colombia y del modelo hidráulico calibrado de MIKE 11

Después de revisiones en la configuración se observó que las diferencias provenían de la configuración de la longitud de simulación de los modelos en su cascada histórica. Inicialmente, la configuración se realizó considerando simulaciones de 10 días, es decir, una ventana que se extiende desde pasado 10 días hasta la fecha T0 (actualidad). La selección de esta ventana provocaba sobreescritura de las series de tiempo de simulaciones anteriores. La sobreescritura impactaba artificialmente la señal reproducida por el modelo hidrodinámico.

Después de varias pruebas se llegó a la conclusión que la mejor medida era reducir la ventana de simulación a 2 pasos de tiempo. Y empleara los estados iniciales de la simulación inmediatamente anterior. Luego de realizar las pruebas se observó que los resultados mejoraron en gran medida, ver figura (realizada por Mario Moreno).

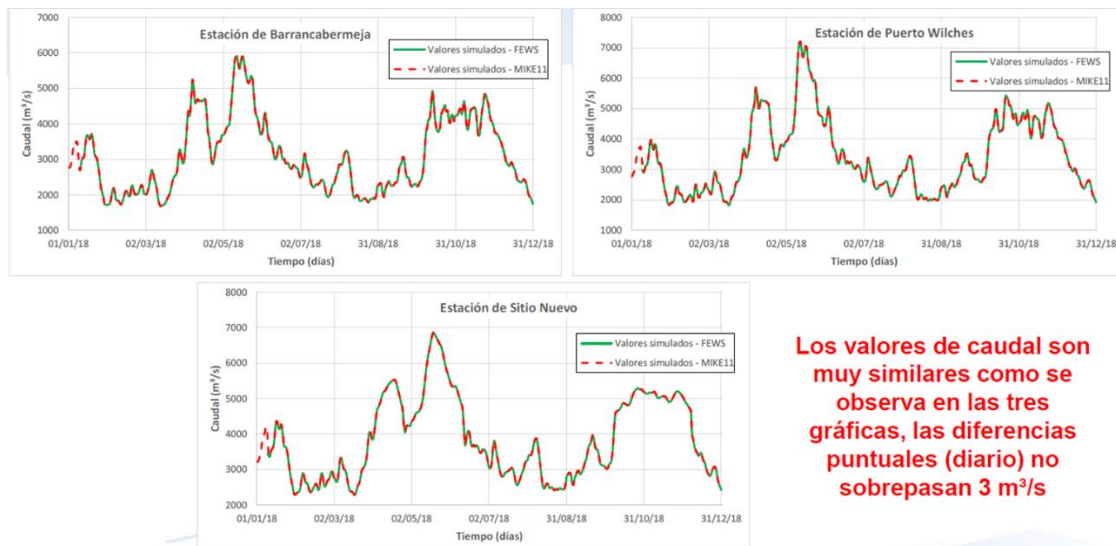


Figura 33 Comparación de modelos acoplados y desacoplados después de ajustes de las ventanas de simulación

2.4.1.6.2 Segunda prueba

Como segundo ejercicio, se evaluó la influencia de las condiciones de borde en las cuales no hay impuesto un modelo hidrológico conceptual. Actualmente, en el sistema FEWS Colombia se impone un caudal constante e igual a su promedio histórico multianual como condiciones de borde para las cuencas en las cuales no hay disponible un modelo hidrológico. Esto traía como resultado que existiera una sobreestimación en los caudales bajos de los ríos.

Se llegó al acuerdo entre la supervisión del proyecto y de otros profesionales, el cambio de las condiciones de borde impuestas al modelo por condiciones que mejor representaran las dinámicas hidrológicas. Entonces, se acordó hacer una reconfiguración de la cascada de procesos de manera que las nuevas condiciones de borde correspondieran a los promedios diarios multianuales. Este proceso está parcialmente implementado en el FEWS Colombia. Por lo tanto, se realizaron ajustes a los procesos de tratamiento de niveles y caudales históricos, de tal manera que se obtuviese una serie de tiempo que correspondiera a las condiciones que puede consumir el modelo de simulación. El proceso de uso de series de tiempo de promedios diarios multianuales correspondió para las estaciones representando las estaciones de los ríos Miel, Nare, Regla. Más aún, para estas estaciones se configuró una unión de series de tiempo (transformación tipo Merge) de tal manera que se empleará series de tiempo con información observada, y en dado caso que existiesen espacios sin información completar esta con la serie promedio diaria multianual.

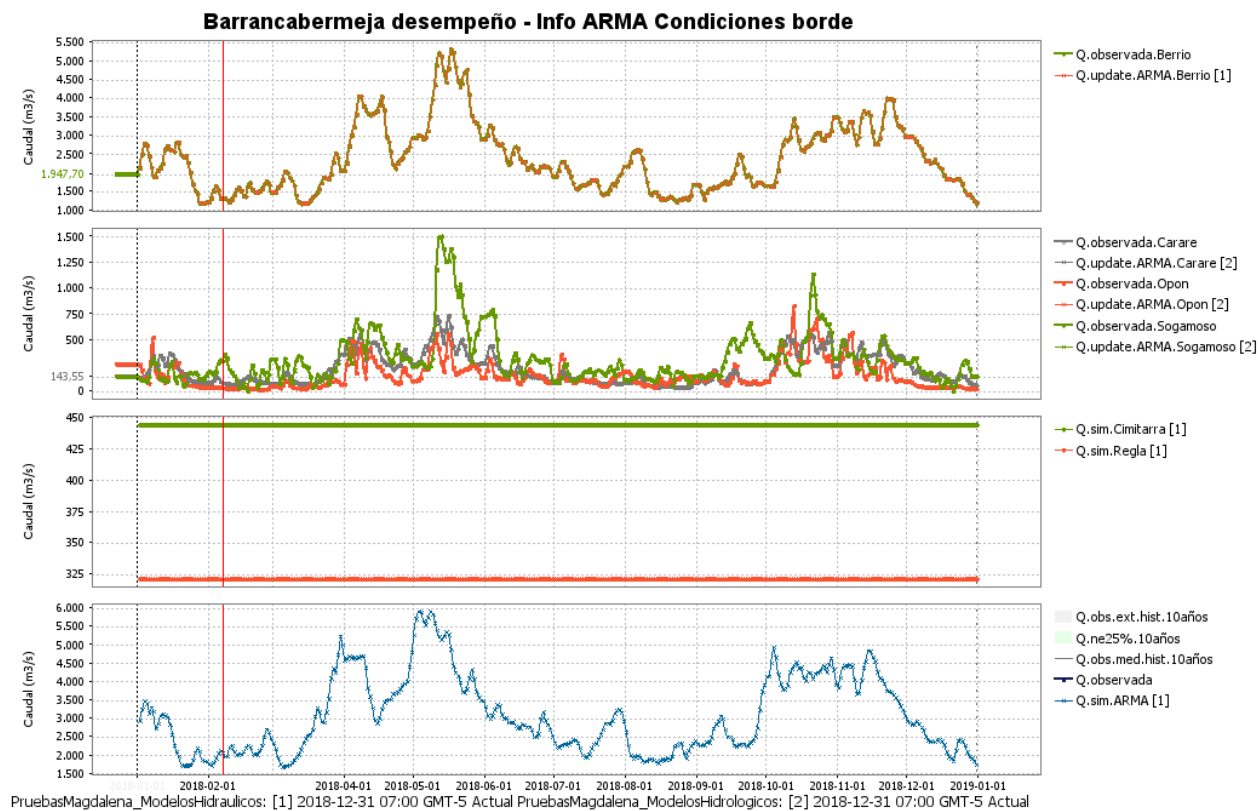


Figura 34 – Condiciones de frontera de caudal de la plataforma FEWS

Los ríos Cimitarra y Cocorna no se dispone de largos registros históricos de caudales. Por lo que no se puede obtener una serie de promedios multianuales. Para estos dos ríos se empleó un cálculo que en base a la relación de áreas de cuenca se estima una serie de tiempo proporcional. Si bien esta es una aproximación, este es un paso adicional para tener una estimación que permita que las simulaciones en el río Magdalena tengan menor incertidumbre.

Para la cascada de procesos de pronóstico se realizaron configuraciones similares. Sin embargo, para estos casos por ser condiciones de pronóstico se impondrá las series de tiempo promedios multianuales.

2.4.1.6.3 Tercera prueba

Finalmente, durante la revisión de los resultados de los modelos acoplados (al FEWS Colombia) y desacoplados, se observó diferencias en los niveles en la estación de Sitio Nuevo, condición de borde aguas abajo. A pesar, que en las otras estaciones no existían diferencias. Después de varias revisiones, se llegó a la conclusión que el sistema FEWS Colombia estaba importando series de tiempo provenientes de un punto de cálculo del Mike11 distinto a los observados en el modelo desacoplado. Se observó que el modelo no tenía un punto de cálculo dentro del modelo

específicamente ubicado donde se encontraría Sitio Nuevo. Por lo tanto, se realizó el ajuste del modelo Mike11 incorporando una nueva sección transversal interpolada (realizado por Mario Moreno esta actividad), y se realizó el reajuste de la configuración del sistema FEWS, de tal manera que la información importada al FEWS representara la mayor cercanía a la estación representada.

2.4.2 Resultados

El proceso de actualización del sistema FEWS Colombia para el VMM del río Magdalena, consistió en el desarrollo y actualización de un conjunto de módulos para tratar información que sería empleada para realizar pronósticos hidrológicos. En total, se desarrollaron y actualizaron mas de 400 módulos correspondiente a las actividades de importación, procesamiento, corrección de errores, simulación hidrológica e hidráulica, tanto para la fase histórica (actualización) como para las fases de pronóstico.

Una vez realizados todos los ajustes, el sistema se puso a prueba múltiples veces buscando evaluar el sistema lo máximo posible antes de cargarlo en el sistema operacional. Se realizaron múltiples ejercicios para probar el sistema en múltiples condiciones. Se pudo apreciar el desempeño de los modelos, así como, el funcionamiento de la articulación de las cascadas en fase histórica (actualización o update) con su fase de pronóstico.

Se aprecia como los diferentes módulos cumplen sus funciones. Los modelos hidrológicos e hidráulicos ejecutan simulaciones en los términos en que se especificaron. Adicionalmente, módulos de correcciones de error se comportan como se espera.

De los resultados de los modelos y sus corridas que para todos los modelos hidrológicos se observa que existe una importante ventana de mejora a través de la calibración de los modelos. Los modelos se podrían ver robustecidos sustancialmente mediante la calibración más profunda que permita tener una mejor representación de las señales de caudal para cada una de las cuencas modeladas. La recalibración de los modelos debería enfocarse en una calibración detallada que evalúe la separación del flujo base y del flujo superficial. Se deberá tener especial atención a la reproducción de las señales provocadas en los hidrogramas provocados por la precipitación. Para ello, se recomienda no solo calibraciones automáticas de largo períodos de tiempo, sino una calibración refinada permita afinar como es la separación de los flujos.



Figura 35 Algunos resultados de los modelos hidrológicos dentro del sistema FEWS Colombia (Stand Alone). Se observa la reproducción histórica (a mano izquierda de la línea roja) y el pronóstico (mano derecha de la línea roja)

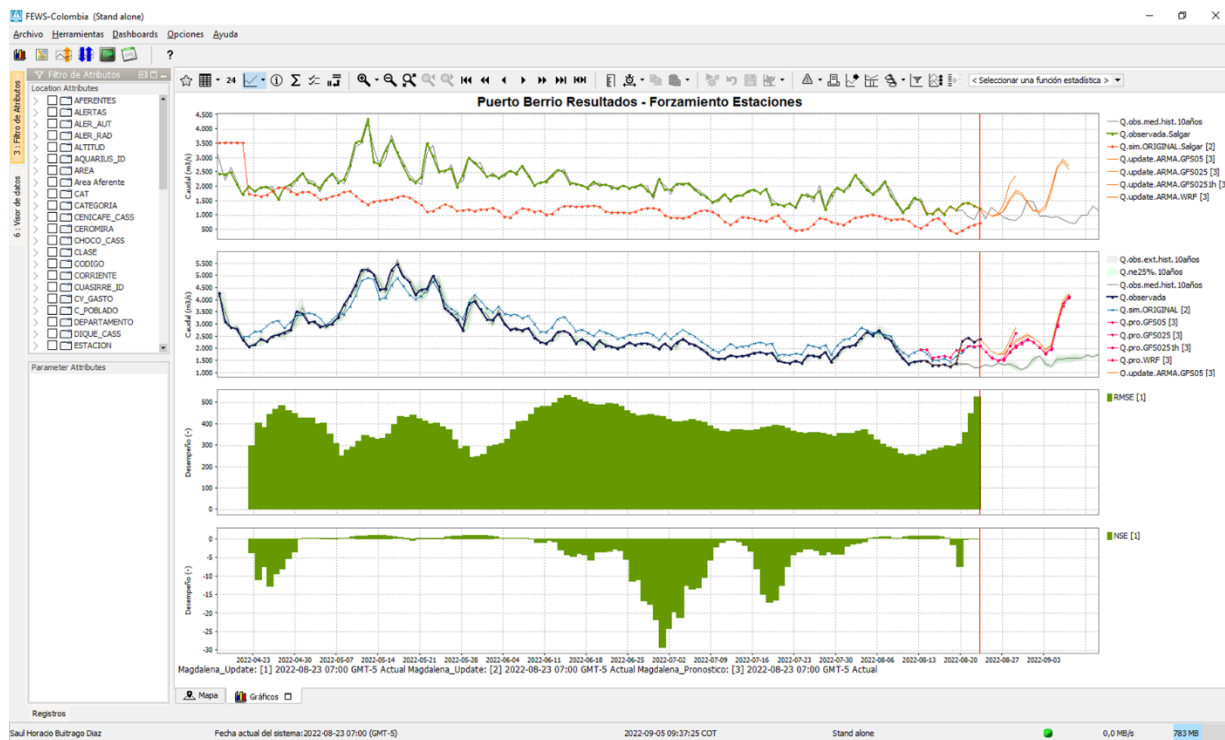


Figura 36 Algunos resultados de los modelos hidráulico dentro del sistema FEWS Colombia (Stand Alone). Se observa la reproducción histórica (a mano izquierda de la línea roja) y el pronóstico (mano derecha de la línea roja)

Los procesos de calibración deberían programarse de forma que se inicien desde aguas arriba y en dirección del flujo. De tal manera, que las nuevas calibraciones no asuman las incertidumbres propagadas desde aguas arriba.

Si bien no se realizó un análisis de incertidumbres, se infiere que la mayor parte de las incertidumbres encontradas en los resultados de los modelos hidráulicos deben provenir de la propagación de incertidumbres de los modelos hidrológicos (que alimentan las condiciones de borde). En menor medida de las condiciones iniciales de los modelos y de la propia estructura del modelo y sus parámetros. De hecho, se puede observar en el Producto IV cómo el modelo hidráulico actualizado, reproduce las señales hidrológicas de manera adecuada. Por lo tanto, antes de realizar cualquier recalibración al modelo hidráulico operacional se recomienda hacer las recalibraciones a los modelos hidrológicos como se menciona en los puntos anteriores.

2.5 Carga el sistema en el sistema operacional

Una vez realizado todas las pruebas funcionales dentro de un sistema Stand-Alone, se dispuso a hacer la carga del sistema dentro del sistema operativo. El componente operativo del Delft FEWS

posee una funcionalidad que permite hacer la carga de los archivos de configuración sobre el sistema operacional.

Tabla 2 Resumen de Módulos configurados y cargados sobre el sistema FEWS Colombia

Flujos de Trabajo	Modulos Nuevos Configurados	Instalaciones Adicionales de Software
Importar datos observado GRID		
Import_JAXA_GSMAP	3	X
Import_GLOH20_MSWEF	3	X
Import_GLOH20_MSWX	3	X
Import_GLOH20_MSWXTemp	8	X
Actualizar Magdalena		
HMS_Magdalena_Update	59	
GR4J_Magdalena_Update	24	X
ARMA_Magdalena_Update	35	
Performance_Magdalena_Update	1	
M11_Magdalena_Update	37	X
Performance_Magdalena_M11_Update	1	
Pronostico Magdalena		
HMS_Magdalena_DataPrep_Pronostico	11	
HMS_Magdalena_Pronostico	100	
GR4J_Magdalena_Pronostico	45	X
ARMA_Magdalena_Pronostico	140	
M11_Magdalena_Pronostico	41	X
ARMA_Berrio_M11_Pronostico	80	
M11_MagdalenaBerrio_Pronostico	40	X
ARMA_Barranca_M11_Pronostico	40	
ARMA_PtoWilches_M11_Pronostico	40	
ARMA_SitioNuevo_M11_Pronostico	40	
Total	751	-

Antes de realizar esta carga se realizó la articulación y verificación de las configuraciones realizadas dentro de un sistema stand alone perteneciente al administrador del FEWS Colombia, el cual es una copia fiel del sistema operacional. Este proceso de consolidación se llevó a cabo junto al administrador del sistema en el IDEAM, durante el proceso se realizaron ajustes menores a la configuración según las recomendaciones del administrador.

Este proceso de consolidación se realizó durante varias semanas y fue realizado de manera progresiva de tal manera que se fue evaluando cada módulo sobre la configuración operacional más reciente para verificar su funcionamiento, eliminar cualquier “bug” adicional que pueda existir

y finalmente ajustar el código para que funcione sobre los nuevos servidores operativos. En total se cargaron 751 nuevos módulos que representan todos los nuevos procesos sobre el Valle Medio del Río Magdalena.

De la misma manera se llevó a cabo la instalación en los servidores que albergan el sistema operativo de software adicional necesario para ejecutar los nuevos módulos, se debió hacer la instalación de software como Python y R con librerías especializadas.

2.6 Actualización de Manuales del FEWS Colombia

Finalmente, se realizó la actualización de los diversos manuales de uso del FEWS Colombia:

- FEWS Manual de Configuración V2023
- Manual de Pruebas Operativas para procesos implementados 2023
- Manual del usuario FEWS Colombia 2023

Los manuales son documentos abiertos que se encuentran en continua actualización. En cada uno se incluyó y se dio explicación de los procedimientos necesarios para configurar y hacer uso de los módulos. Se describieron los procedimientos a emplear para ejecutar los flujos de trabajo.

3 Conclusiones y Recomendaciones

A continuación, se da un resumen de las conclusiones y recomendaciones obtenidas a lo largo del proyecto.

3.1 Conclusiones

- Se hizo una revisión profunda de la cadena de procesos del sistema FEWS Colombia para el Río Magdalena. Se hicieron ajustes de incidentes y se pudo estructurar una cadena de procesos nueva que contó con las recomendaciones presentadas en el Producto IV del proyecto Medio del río Magdalena (VMM) en el marco del Acuerdo de Cooperación – AC No. 4 (3034153) derivado del Convenio Marco de Colaboración No. 5212957.
- La construcción de la nueva cadena de procesos consistió en el desarrollo, modificación, actualización e implementación de módulos específicos para la cascada encargada del pronóstico en el Valle medio del Río Magdalena. Se desarrollaron módulos nuevos en torno a la importación de nuevas fuentes de información (JAXA-GSMAP, GLOH20-MSWX, GLOH20-MSWEP), la implementación de procesos para la estimación de evapotranspiración potencial, desarrollo y acople de modelos nuevos hidrológicos conceptuales (GR4J) para las cuencas del río Opon y Sogamoso, articulación del modelo hidráulico actualizado entre el tramo Pto Berrio y Sitio Nuevo, estructuración de nuevos modelos de corrección de error ARMA, y desarrollo de todos los módulos de transformación adicionales requeridos en la articulación de la cascada de procesos.
- Se desarrollo un proceso de estimación de evapotranspiración basado en la ecuación de Hargreaves. El proceso fue desarrollado de tal manera que el sistema pueda realizar la estimación operativa. Para la estimación hace uso de información de temperatura proveniente de la fuente de datos GLOH20-MSWX. La evapotranspiración estimada incorporada dentro de la cascada de procesos de simulación hidrológica para el Valle Medio del Río Magdalena.
- Se pudo notar que los modelos hidrológicos son insensibles entre el empleo de evaporación climatológica y la evapotranspiración estimada mediante Hargreaves. Un análisis más profundo determinó que una de las razones de esto tiene que ver con los parámetros de calibración establecidos dentro de los modelos, lo que hace poco sensibles los modelos hidrológicos a la influencia de la evapotranspiración.

- Se realizó el acople de los modelos hidrológicos actualizados para el río Opon y Sogamoso desarrollados en el Producto IV del marco del Acuerdo de Cooperación – AC No. 4 (3034153). Estos modelos fueron desarrollados en lenguaje R. Para su articulación en el sistema FEWS Colombia, se generalizó el código de tal manera que pudiese ser utilizado dentro del sistema, esta generalización fue realizada en el lenguaje R. Adicionalmente, se configuró un módulo adaptador general dentro del FEWS (encargado de articular el sistema con los modelos). También se desarrollaron dos adaptadores, en lenguaje Python, que permiten transmitir y preparar la información para que sea consumida por los modelos hidrológicos, y una vez realizada la simulación preparar la información para que sea leída de vuelta por el sistema FEWS Colombia.
- Se incorporó el modelo actualizado DHI Mike11 desde Pto Berrio hasta Sitio Nuevo. Para ello se actualizó la configuración del adaptador Mike11 (rutina que trabaja como interfaz entre el sistema FEWS Colombia y el software DHI Mike11). Los ajustes de configuración consistieron en la actualización la configuración de condiciones de borde, así como, de la actualización de las progresivas de donde se van a tomar los resultados de Caudal y nivel del modelo.
- Se construyó la cascada de procesos para la estimación de caudales y niveles dentro del VMM del Río Magdalena. Para ello se configuraron más de 751 nuevos módulos dentro del sistema FEWS Colombia. En términos generales, el sistema realiza los siguientes procesos:
 - o Preprocesamiento de los datos de insumo (precipitación observada de estaciones, precipitación obtenida a través de información satelital, nivel y caudales cuasireales observados) para el modelo
 - o Preprocesamiento de la precipitación promedio por subcuenca para alimentar los modelos hidrológicos
 - o Simulación de modelos hidrológicos HEC-HMS y GR4J para las cuencas de los ríos Alto Magdalena, Carare, Negro, Opón, Sogamoso, Lebrija, en fase histórica para la actualización de los estados (iniciales) de los modelos.
 - o Ejecución de los modelos de corrección de error ARMA para cada una de las estaciones donde se estima caudales a través de modelos hidrológicos.

- Preprocesamiento de los datos para establecer las condiciones de borde de los modelos Mike11
 - Ejecución de los Modelo Mike11 para el tramo Salgar a Barrancabermeja
 - Modelo de corrección de error ARMA los resultados del modelo Mike11 para la estación Pto Berrío
 - Ejecución del Modelo Mike11 para el tramo Pto Berrío a Sitio Nuevo
 - Ejecución de módulos de cálculo de indicadores de desempeño (RMSE, NSE, R2, Error en el volumen, BIAS) de las simulaciones históricas.
- El uso de diferentes fuentes de información dentro del sistema FEWS conllevó a la configuración de varias cascadas de procesos (flujos de trabajo) que se ejecutarán de manera paralela. En modo histórico se ejecutan 5 cascadas de procesos cada una alimentada por una fuente de información distinta: estaciones de monitoreo (cuasireal) del IDEAM y los productos JAXA-GSMAP, GLOH20-MSWX, GLOH20-MSWEP. Adicionalmente, existe una 5 cascada compuesta por la unión, a través del promedio simple, de los productos antes mencionados.
- En el caso de las cascadas de procesos de pronóstico, de la misma manera que las cascadas históricas, se emplean múltiples fuentes de información. Las cascadas emplean el producto de pronóstico de precipitación desarrollado por el IDEAM, el pronóstico WRF. Adicionalmente, hace uso de los productos GFS de la NOAA. En total, se están empleando 4 productos de precipitación distintos de pronóstico. Por lo tanto, la combinación entre las cascadas históricas (para la actualización de los estados de los modelos) y los productos de pronóstico arroja que se debieron configurar 20 cascadas para pronóstico (5 cascadas históricas por 4 fuentes de información de pronóstico).
- Para todas las nuevas cascadas históricas y de pronóstico, se debió configurar los respectivos módulos dentro del FEWS Colombia de procesamiento de datos para preparar la información antes de incorporarse y como condiciones de borde a los diferentes modelos existentes (hidrológicos e hidráulicos). Se configuraron: interpolaciones espaciales, interpolaciones espaciales, agregaciones espaciales, agregaciones temporales, llenados de vacíos, uniones jerárquicas, ecuaciones personalizadas, cálculo de indicadores de desempeño, entre otras.

- Después de pruebas a las cascadas correspondientes al pronóstico hidrológico en el VMM, enfocada en los resultados de simulación del modelo hidráulico entre Pto Berrio y Sitio Nuevo, se hicieron correcciones en el proceso con el fin de obtener señales hidrológicas con las menores incertidumbres posibles. Algunos de los ajustes realizados son:
 - o Se ajustó las ventanas de simulación de los modelos hidráulicos en su fase histórica. Antes de la actualización los modelos corrían en una ventana que se extendía desde 10 días en el pasado hasta el presente (T0). Esta suposición modificaba artificialmente los resultados obtenidos. La ventana fue reducida a sólo 1 día en el pasado (2 pasos de tiempo). Esta modificación corrigió el error artificial que originaba la configuración anterior.
 - o Se actualizó la manera que se estiman las condiciones de borde que alimentan los modelos hidráulicos, específicamente, en los casos donde no existía un modelo hidrológico implementado (cuencas de los Ríos Nare, Miel, Cocorna, Cimitarra). Antes de la actualización, se estimaba un valor de caudal constante. Esta fue cambiada por la estimación de un valor promedio diario multianual en la estación a partir de registros históricos existentes en el FEWS Colombia. En el caso que no existiesen registros históricos a partir de los cuales se pudiese estimar los promedios diarios multianuales, se fijó una ecuación que permitiera estimar una serie de tiempo de caudales proporcional a partir de la multiplicación de la relación que existe entre las áreas de la cuenca y una serie de tiempo donde si existen registros históricos.
- Al evaluar los resultados de la cascada de procesos se puede observar que los modelos hidrológicos tienen una ventana importante de mejora. Los modelos hidrológicos pueden ser robustecidos mediante la calibración más detallada que se enfoque en reproducir las señales y separación entre caudal base y caudal superficial. Actualmente, muchos de los modelos (producto de calibraciones automáticas, aunque se requiere una valoración más detallada) funcionan mayormente con el componente de caudal base. Si bien con esta configuración los modelos reproducen las señales hidrológicas (con sus incertidumbres asociadas), una calibración más detallada mejoraría de manera importante los resultados de los modelos y las simulaciones hidráulicas.
- De los modelos hidrodinámicos se observa un comportamiento óptimo. Sin hacer evaluaciones de incertidumbre detalladas, se puede inferir que la mayor parte de las

incertidumbres de sus resultados deben provenir de la propagación de incertidumbres de los modelos hidrológicos que alimentan los modelos hidrodinámicos.

- La nueva configuración fue cargada al sistema operacional sin inconvenientes. Sin embargo, es importante considerar que esta debe ser observada de cerca por un tiempo para verificar que esté funcionando de manera adecuada.

3.2 Recomendaciones

- Si bien los procesos se han probado en profundidad dentro del sistema Stand Alone del FEWS Colombia y en el sistema operacional, siempre existe la posibilidad que existan pequeñas inconsistencias (“bugs”) que no se hayan podido auscultar. Para ello se recomienda, mantenerlo en observación en condiciones operativas (en un entorno de pruebas) de tal manera que se pueda verificar su óptimo funcionamiento. En términos generales, se recomienda que el sistema este bajo observación al menos 6 meses antes de establecer que el sistema es óptimo para formar parte del sistema operativo.
- Se observó que los modelos tienen una ventana para ser robustecidos. Se recomienda una calibración detallada de los modelos hidrológicos. Donde se contemple y se revise la manera como actualmente están haciendo la separación de flujos (superficial y base) dentro de la estructura conceptual del modelo. La recalibración debe estar enfocada en tratar de minimizar o maximizar, según sea el caso, los valores de índice de desempeño de los modelos para tanto períodos a largo plazo, como para eventos específicos. La valoración de índices de desempeño a largo plazo puede brindar una combinación de parámetros de calibración que quizás no son adecuados para la reproducción de señales en condiciones de pronóstico.
- Se recomienda no realizar recalibraciones del modelo hidráulico antes que se haya realizado una recalibración detallada de los modelos hidrológicos. Los resultados del modelo hidráulico de manera desacoplada del sistema FEWS Colombia (realizados en el Producto IV) muestran su adecuado desempeño. Una vez realizada las recalibraciones a los modelos hidrológicos, se puede verificar la pertinencia de someter el modelo hidráulico a procesos de mejora.
- Se debe considerar una vez se tengan los diversos modelos robustecidos mediante calibración, enfocarse en la calibración de los módulos ARMA para la predicción y

corrección de errores en puntos específicos de la cascada de pronóstico. Actualmente, los ARMA se encuentran trabajando bajo parámetros por defecto, por lo tanto, existe un espacio importante para la mejora de estos modelos de predicción del error.

- Si bien en el presente proyecto no se realizó una valoración de los campos de precipitación. Se debe considerar estudiar en el futuro la representación y el impacto de la estimación de los campos de precipitación obtenidas a partir de las estaciones de medición. De tal manera, que se puedan proponer mejoras en los procesos de estimación operativa de campos de precipitación.
- De la misma manera, se debe valorar la calidad de la información (de precipitación) obtenida de fuentes externas (JAXA, GLOH2O), dado que se tiene la impresión de que los productos externos sobreestiman los valores de precipitación. De esta manera, proponer procesos operativos que permitan hacer correcciones (de sesgo, por ejemplo) de estos productos, y que conlleven a mejores estimaciones de los estados (iniciales) y por ende de los pronósticos.
- La calibración de los modelos tiende a degradarse con el tiempo. Se recomienda considerar la recalibración de todos los modelos hidrológicos aproximadamente cada dos años, de tal manera que se puedan incorporar dentro de la calibración nueva información medida.
- Adicionalmente a la calibración y siguiendo con el estado del arte en la evolución del sistema operacional, se debería contemplar:
 - o La asimilación de datos en un sistema de pronóstico hidrológico es un proceso que combina observaciones de variables hidrológicas (como niveles de agua y precipitaciones) y un modelo numérico de cómo se espera que estas variables cambien con el tiempo. Este proceso se realiza para estimar el estado más probable del sistema hidrológico en un momento dado y predecir su evolución futura. La asimilación de datos permite mantener el modelo 'en la pista', corrigiéndolo constantemente con nuevas observaciones, lo que mejora la precisión de los pronósticos.
 - o Ensamblajes multimodelos, esto quiere decir el empleo de múltiples estructuras conceptuales en cuanto a modelos hidrológicos con las fuentes de información disponible. Con el fin de enfrentar las incertidumbres que puedan existir en cuanto a la falta de representación de los procesos físicos existentes en la cuenca por una

estructura conceptual de algún modelo hidrológico. La idea es emplear diversos modelos de tal manera que se pueda tener una representación y mejor entendimiento del comportamiento hidrológico sobre las cuencas (este tipo de enfoque es utilizado ampliamente al momento de evaluar las posibles trayectorias de huracanes en los sistemas de predicción climática).

- Transitar hacia un sistema de pronóstico con ensambles, donde en vez de tener un único forzamiento meteorológico (pronóstico) para una fecha específica, se tienen un conjunto de pronósticos (forzamientos) con igual probabilidad generados por los sistemas de predicción numérica del clima. Normalmente los sistemas de pronósticos del clima generan alrededor de 51 forzamientos (pronósticos) con la misma probabilidad, esto quiere decir que se puede obtener un entendimiento de las incertidumbres ocasionadas por el comportamiento caótico de la atmósfera.

4 Bibliografía

Adams, T., & Pagano, T. (2016). *Flood Forecasting: A global perspective*. Elsevier.

IDEAM. (2018). *Desempeño de Modelos de Pronóstico Hidrológico y evaluación de umbrales de Alerta Plataforma FEWS-Colombia en la Cuenca Magdalena - Cauca*. Bogotá.

IDEAM. (2018). *Presentación del Sistema FEWS Colombia*. Bogotá.

IDEAM. (2019). *FEWS COLOMBIA*. Obtenido de IDEAM:
<http://www.ideam.gov.co/web/agua/fews>

IDEAM. (2021). *Manual de Configuración del Sistema FEWS Colombia*.

IDEAM-ECOPETROL. (2021). *Producto 2: Avances en la evaluación del pronóstico hidrológico en las áreas de interés de Ecopetrol en el VMM*. Bogotá.

IDEAM-ECOPETROL. (2021). *Producto 4: Avances en la modelación hidrológica e hidráulica orientada a la caracterización de las áreas de Ecopetrol en el VMM*. Bogotá.

Werner, M., Schellekens, J., Gijsbers, P., van Dijk, M., van der Akker, O., & Heynert, K. (2013). *The Delft-FEWS flow forecasting system. Environmental Modelling and Software*.



El ambiente
es de todos

Minambiente



Bogotá, D.C. Colombia - Sur América
Sede correspondencia
Calle 25 D No. 96 B - 70 Bogotá D.C. Código postal: 110911
PBX (571) 3527160 Fax Server: 3075621 - 3527160 Opc.2
Línea Nacional 018000110012 - Pronóstico y Alertas (571) 3527180
Sede Puente Aranda: Calle 12 No 42B - 44 Bogotá D.C. PBX: 2681070
- www.ideam.gov.co