

Simulación del comportamiento del sistema frontal del Rio de la Plata bajo escenarios hidroclimáticos

Una herramienta de ayuda a la planificación y monitoreo para la gestión de los servicios ambientales en la costa de Montevideo, Uruguay.

Gustavo J. Nagy^{1,2}, Nathalie Muñoz^{1,2}, José E. Verocai^{1,3}, Mario Bidegain^{1,4}

1: Grupo de Cambio Ambiental Costero, Oceanografía y Ecología Marina, IECA, Facultad de Ciencias, UdelaR, Montevideo, Uruguay, gustavo.nagy56@gmail.com

2: Proyecto GEF "Implementación de Medidas Piloto de Adaptación al Cambio Climático en Áreas Costeras del Uruguay", URU 07G32, Unidad de Cambio Climático, DINAMA-MVOTMA, Montevideo, Uruguay.

3: Departamento de Oceanografía, SOHMA, Armada Nacional, Montevideo, Uruguay.

4: Dirección Nacional de Meteorología (DNM), Montevideo, Uruguay.

Resumen

El objetivo de este proyecto es simular el comportamiento del sistema frontal del Río de la Plata, donde se mezclan las aguas fluviales de la cuenca del Río de la Plata y el agua del Océano Atlántico. La simulación permite comprender mejor la causalidad e interrelaciones de variabilidad sistémica a la escala mensual para planificar el monitoreo y gestión proactiva de los servicios ambientales turismo de sol y playa y pesca. La simulación se realiza para un periodo de 7 meses (Julio: mes 1 a Enero: mes 7) el cual cubre el inicio de la zafra pesquera (4) y de playa (5) y sus picos de actividad (6 y 7 respectivamente). La actualización continua de la variable auxiliar de primer orden índice El Niño Oscilación Sur (ENOS) SST 3.4 y del flujo de primer orden Caudal Fluvial acumulado de entrada (Q_F), entre los cuales hay un retraso fijado en 3 meses, permite mejorar el modelo. El caudal es clave para entender el desplazamiento del sistema frontal y la variación de la salinidad en Montevideo, así como la actividad de la flota pesquera y la calidad de las aguas de playa (flujo de coliformes debido a los aportes urbanos). La primera depende fuertemente del desplazamiento frontal, de la salinidad y del viento y la segunda de la salinidad y de las precipitaciones locales. Se prioriza la calidad de playa. Las simulaciones reproducen muy bien el rango de valores de la referencia histórica. La simulación de una intervención a nivel de la descarga pluvial para reducir al 0,001 % su carga de coliformes no llega a reducir su flujo ambiental a niveles aceptables para escenarios de alta descarga fluvial y precipitaciones. La razón coste/beneficio de tal intervención no se justificaría, por lo cual el mejorar el sistema de previsión, monitoreo, modelación, alerta temprana y la comunicación a usuarios sería la medida de gestión más costo-efectiva.

1. Introducción

1.1. Antecedentes.

La zona frontal del Río de la Plata (Figura 1) es una transición de aguas fluviales turbias aportadas por los grandes ríos Paraná y Uruguay a aguas marinas costeras verdes aportadas por el océano Atlántico (Figura 2).



Figura 1. Izquierda: El Río de la Plata y la zona frontal. Fuente: Brazeiro et al., 2004.

La zona frontal presenta una ubicación, extensión y forma variable según las condiciones hidroclimáticas (caudal fluvial) y vientos predominantes. En ella se ubica la discontinuidad de salinidad y turbiedad (color) denominada sistema frontal (SF, Figura 2), siendo sus límites espaciales definidos por las discontinuidades de color satelital denominadas frente de turbiedad principal (rio arriba) y marino secundario (rio abajo). El sistema frontal se caracteriza por sus servicios ambientales, los cuales son muy sensibles a sufrir impactos asociados a su desplazamiento espacio-temporal (Framiñán y Brown 1996; Guerrero et al. 1997; Nagy et al., 2002, 2008 a,b; IdeM, 2010, Nagy et al. 2013).

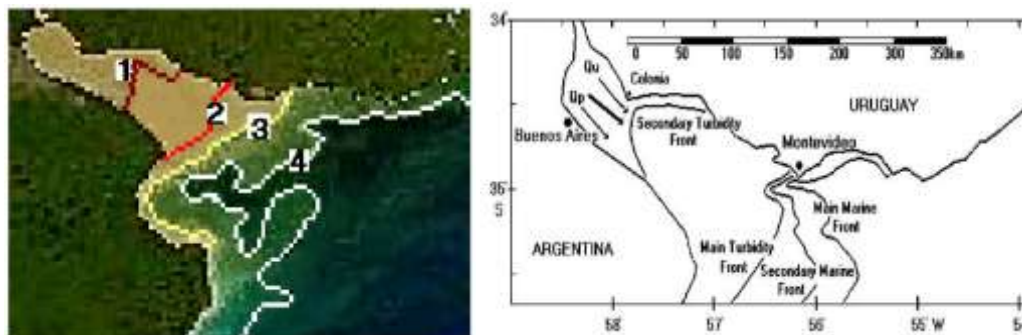


Figura 2. Frentes color (MODIS Aqua) del Río de la Plata. Izquierda: El sistema frontal es delimitado entre las líneas 2- Frente de Turbiedad Principal y 3- Frente Marino Secundario (ubicación típica o modal). Derecha: Esquema de flujos canalizados de Q_u y Q_p y ubicación de frentes durante un periodo de caudal moderado. La ubicación es referida en Km río abajo de Colonia (DRC). Fuente: Nagy et al. 2008a.

1.2. El Problema

El desplazamiento frontal, medido en km río abajo de Colonia (km DRC) es causado por la variación de los caudales de entrada al Río de la Plata - Q_{RP} : Río Paraná: Q_P + Río Uruguay: Q_U - (Figura 2, derecha), los vientos y la marea a las escalas respectivas (Guerrero et al., 1997; Nagy et al., 2002, 2008a, b). El Q_{RP} típico que determina la ubicación del frente modal (Figura 1, Figura 2 izquierda) se ubica entre $22-28 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$, con un 25% aportado por Q_U . En crecientes y años el Niño Q_{RP} supera $30 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ y en bajantes y años La Niña suele ser menor a $20 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$. Los caudales medios anuales han aumentado desde 1971 (García y Vargas 1998), más en primavera y para Q_U (Nagy et al., 2008 a, c; Bidegain et al., 2011; Verocai, 2012), aunque se han mantenido estables y aún disminuido levemente en la última década (UCC, 2012). La ubicación modal del frente (Figura 1 y 2, izquierda) está dentro del SF, el cual se localiza usualmente a la altura de Montevideo y en él ocurren el desove y captura de especies comerciales (ej. corvina) y la temporada de playa entre octubre y marzo. Existen riesgos asociados al desplazamiento frontal excesivo: reducción de la captura, proliferación de cianobacterias y/o coliformes a salinidades $\leq 5 \text{ g/l}$.

La vulnerabilidad debida a presiones climáticas y la gestión de la cuenca es externa, debido a su gran extensión ($3,1 \times 10^6 \text{ km}^2$ y 5 países), por lo cual poco se puede hacer a nivel local (Nagy et al. 2013). El conocimiento previo de las causas y magnitud del desplazamiento no incluyen un modelo amigable y comprensivo de la incertidumbre aplicable en gestión. Hasta el presente la experiencia y las lecciones aprendidas se basan en una gestión reactiva. La simulación propuesta aspira a contribuir a aumentar la comprensión de las relaciones causales y elementos clave del sistema a efectos de una mejor previsión y diseño de acciones para reducir el impacto. Se podrá mejorar la planificación del diseño observacional de las oscilaciones y de las acciones de control, lo que tendrá un impacto positivo en la gestión proactiva de las vulnerabilidades internas de los sectores turismo de sol y playa y pesca artesanal (ambos dependen de instituciones diferentes y a escalas de administración diferente - agencia nacional y gobierno local - sin coordinación). Esto impactaría positivamente en la preparación de la temporada y planificación del monitoreo y eventuales vedas y regulaciones.

1.3. Objetivos

“Observar como el sistema frontal modelado se comporta normalmente y luego como cambios en variables físicas clave y/o políticas alteran ese comportamiento en relación a los servicios ambientales en la costa de Montevideo”.

Se presenta el diagrama causal de las relaciones entre variables del sistema (CLD) y se enfatiza en la calidad de playa, para la cual se presenta el diagrama de niveles y flujos (SFD) considerando alternativas de planificación, monitoreo, gestión e intervención.

Los objetivos secundarios (e instrumentos para ello) son:

1. Aplicar el pensamiento sistémico para describir el sistema frontal, sus variables, flujos, niveles, relaciones causales, elementos clave y limitativo.
2. Analizar dos problemas (impactos) asociados al desplazamiento del sistema frontal, la pesca artesanal de la corvina y la calidad de playas (turismo de sol y playa).
3. Simular con dinámica de sistemas las condiciones que generan impacto, identificar las variables clave y posibles acciones de observación del proceso y de control (o reducción) de los impactos.
4. Anticipar con fines de planificación pro-activa para desarrollar cambios y adaptaciones en las intervenciones de gestión a nivel del monitoreo, alerta temprana, preparación,

vigilancia, comportamiento y reglamentaciones para reducir impactos y aumentar el beneficio de la pesquería y el uso y disfrute del turismo de sol y playa.

Se plantea el Diagrama Causal (CLD) general y un diagrama de niveles y flujos (SFD) para la temporada de turismo de sol y playa en Montevideo, simulando las forzantes clave, regulaciones y prácticas. Para simplificar se usa el caudal total ($Q_F = Q_{RP} + Q_U$), lo que da un buen resultado.

2. Marco teórico, metodológico y resultados.

2.1. Marco teórico.

Aunque la simulación con dinámica de sistemas (SDS) no es prioritariamente predictiva, permite una comunicación explícita, por lo cual una proyección futura del modelo puede hacerse de forma razonablemente precisa. A menudo no hay la suficiente información histórica cuantitativa del sistema analizado y el problema asociado, por lo cual no se alcanza el máximo nivel de previsión. En los modelos de gestión lo primordial es establecer que “*la alternativa x es mejor que la alternativa y*” y no hay tanta necesidad de precisión ya que las comparaciones son igualmente útiles (García, 2012).

Sin embargo, el contar con una buena base de información conceptual y cuantitativa permite definir los elementos y relaciones esenciales del sistema y su posible evolución frente a cambios en las variables externas naturales o la intervención humana (gestión). Esto es relevante en un sistema como el discutido en este trabajo, donde el factor externo (clima) es central y las acciones para modificar el estado real al estado deseado son muy limitadas. Esto no limita la importancia del análisis y de las acciones posibles en tanto que se logren los objetivos con una relación coste/beneficio favorable para el ambiente y la explotación sostenible de sus servicios.

Aunque las tendencias actuales no se prolonguen necesariamente en el futuro, es razonable pensar que se mantengan un cierto tiempo útil para un plan de gestión a corto plazo y, más importante, los patrones representados por las relaciones causales sirven para entender los procesos y plantearse preguntas. Aquí el lapso de interés es mensual y estacional, aunque se aporta secundariamente a la comprensión de la gestión climática, hidrológica y ambiental a escala interanual.

Si bien no se encontró en la literatura ejemplos de aplicación de la SDS similares al propuesto, existen ejemplos de su uso como herramientas de análisis y gestión del cambio climático, variabilidad climática y desastres de origen hidrometeorológico en el campo de la ingeniería ambiental y de recursos hídricos en relación al clima.

A título de ejemplo se destacan:

- i) “A System Dynamics Approach for Climate Change Impact Analysis in the Snake River Basin” (Hoekema, 2011), donde se aplica la dinámica de sistemas (software Powersim) para modelar sobre la base de un antiguo modelo numérico escrito en FORTRAN para la gestión de recursos hídricos y
- ii) “Dynamic Resilience to Climate Change Caused Natural Disasters in coastal Megacities: Quantification Framework” (Simonovic y Peck, 2013), donde se usa el software VENSIM. Ambas son aplicaciones de la dinámica de sistemas a problemas de Recursos Hídricos o Desastres Naturales en relación al Cambio y la Variación Climática, donde la SDS aporta a las

alternativas de gestión a la vez que permite un análisis de las interrelaciones causales y donde “¿Qué pasaría si...?” ...se aplica a información climática observada y modelada e intervenciones de gestión.

2.2. Marco metodológico.

Se desarrolla un diagrama causal con las relaciones positivas y negativas más importantes del sistema frontal y sus servicios (recuadro 1 y figura 3).

Recuadro 1: Relaciones Causales del sistema frontal.

Hay relaciones positivas conocidas, algunas con cierta aproximación cuantitativa y otras solo tendenciales; en algunos casos se conocen umbrales en la interacción.

Relaciones positivas: 

1. Caudal Fluvial (Q_F) → desplazamiento (rio abajo, km DRC) del sistema frontal
2. Vientos offshore (240-310°) → desplazamiento (rio abajo, tendencial) del sistema frontal
3. Caudal Fluvial (Q_F) → aumenta el nivel del agua (tendencial, semicuantificado)
4. Precipitaciones ($\geq 20\%$ anomalia) → aumenta el nivel de coliformes

Relaciones negativas: 

1. Caudal Fluvial (Q_F) → disminuye la salinidad
2. Vientos onshore (70-130°) → desplazamiento (rio arriba, km DRC) del sistema frontal; si superan 8 m/s (umbral) impiden la captura.
3. Salinidad (≥ 5 ppm) → disminuye el nivel de coliformes; buena condición para la captura.
4. Salinidad (≥ 10 ppm) → elimina (naturalmente) impactos en turismo y a la vez impacta negativamente en la captura. Es un umbral.

Los umbrales son limitantes funcionales. El desplazamiento frontal por fuera del espacio usual reduce la pesca y desplaza la zona de captura.

Los antecedentes permiten conocer que la variable clave es el caudal fluvial (Q_F) por lo que se busca otras variables forzantes e internas (manipulables) cuya modificación sea clave para la sensibilidad del sistema y los problemas ambientales. Si bien la dependencia de factores climáticos y la extensión de la cuenca hidrográfica del Río de la Plata hace imposible tomar medidas a nivel local que modifiquen al sistema frontal, un mejor conocimiento de su comportamiento y de los tiempos (“timing”) y retrasos entre las relaciones (Figura 3), son de gran ayuda a la gestión.

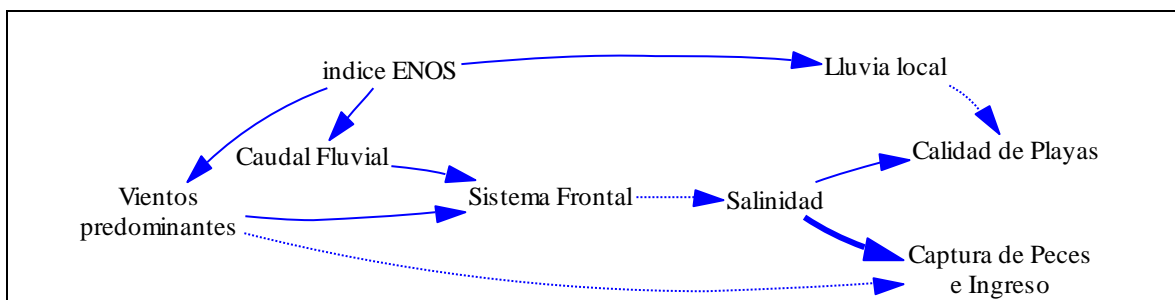


Figura3: Diagrama causal del Sistema Frontal del Río de la Plata. Flecha continua (relación +); flecha a rayas relación (-) y flecha gruesa (relación +o-). Fuente: Nagy et al. 2013.

Las acciones de gestión pueden subdividirse en: i) monitoreo; ii) preparación; iii) seguimiento y iv) intervención (limitación del acceso al público al agua). El monitoreo se centra en el seguimiento secuencial de la variabilidad climática El Niño Oscilación Sur (ENOS). Para ello usamos a la anomalía de la temperatura superficial del mar (SST por sus siglas en inglés) en la región del Océano Pacífico ecuatorial llamada 3.4. La variación SST 3.4 se correlaciona fuerte, positiva (+) y significativamente con las precipitaciones y caudales fluviales en la cuenca del Río de la Plata y en Montevideo con un retraso de pocos meses. Los caudales a su vez se correlacionan fuerte, (+) y significativamente con el desplazamiento del sistema frontal (SF) con un cierto retraso (mensual). Este puede ser medido directamente en km o indirectamente por la salinidad (g/L) en la costa de Montevideo. A su vez estos cambios de posición y de salinidad afectan a los dos servicios ambientales considerados durante el periodo de primavera-verano austral entre Octubre y Marzo (Nagy et al., 2003, 2008; IdeM, 2010; UCC, 2013; Nagy et al. 2013): i) la pesca artesanal en la costa Oeste de Montevideo y ii) la calidad de las playas.

La ubicación del sistema frontal (SF) y su desplazamiento (DF) se monitorea a escala casi diaria mediante imágenes satelitales MODIS Aqua. La frecuente perturbación nubosa determina que la escala más apropiada para este seguimiento sea la semanal (Severov et al. 2003), siendo posible promediarla a escalas mayores (mensual, anual). La ubicación del SF (km DRC) constituye la “memoria clave” del sistema.

(agua dulce turbia → SF: agua salobre semi-turbia → agua marina costera verde)

El caudal fluvial es el flujo (km^3/mes) clave del sistema que explica la ubicación y desplazamiento del sistema frontal, la salinidad y turbiedad del agua en él, río arriba y abajo. La salinidad importa directamente por su control sobre el nivel de coliformes y secundariamente por que ejerce un control sobre la turbiedad del agua que es subsidiaria de la salinidad ya que a salinidades $> 10\text{-}12$ g/L el agua es verdosa al Este (río abajo, km DRC) del sistema frontal.

La modelación de la pesca y sus impactos es más compleja que la de calidad de playas, por lo cual aquí se hará una simulación de la segunda. La primera presenta varios “feedbacks” para los cuales no se dispone aún de toda la información, mientras la calidad de playas es casi lineal, aunque se introduce una opción de gestión externa. Las relaciones básicas presentadas en el diagrama de causalidad (CLD) de la figura 3 permiten definir y mostrar algunas variables de interés para todo el sistema, además de mostrar algunas de sus complejidades y umbrales que son esenciales al enfoque metodológico seguido.

La captura de la pesca artesanal depende de la ubicación del SF ya que la navegación desde las bases fijas en la costa a los caladeros de pesca, lo cuales se desplazan con los caudales y vientos, aumenta el tiempo y el coste en combustible de las embarcaciones de pesca (esfuerzo), a la vez que puede estar limitado por la potencia del motor, la seguridad y fundamentalmente por las regulaciones que les prohíben alejarse de la costa. Además, la captura durante condiciones en que el SF está alejado de su ubicación modal, suele acompañarse de anomalías de vientos. Durante El Niño (fase cálida del ENOS con anomalías SST 3.4 positivas), cuando aumenta el caudal, hay mayor frecuencia de vientos del cuadrante E-S y se ha demostrado que cuando el viento SE es mayor a 8 m/s no hay pesca y la conducta de los pescadores es no salir a pescar hasta al menos un día después que el viento amaina, aunque también se ha demostrado que 1 día post evento si hay pesca (Norbis, 1995). O sea que una variable clave en la relación captura/esfuerzo de las unidades de pesca es un cambio de comportamiento de los patrones de pesca, lo cual exige su confianza en el sistema de monitoreo y de alerta temprana y/o una mejora en la seguridad y eficiencia de las unidades (Nagy et al. 2008 b; 2013).

Aunque el viento es clave a la escala de eventos, resulta complejo incluirlo en una modelación de paso mensual (time-step: 1 mes). Por ello se lo simplifica expresándolo como un balance entre el predominio de vientos axiales al sistema (“onshore y offshore”), los cuales desplazan al SF. Otro problema es que la captura no depende de manera directa de la salinidad sino de un entorno de ella asociada a la ubicación modal ideal del SF, o sea que tanto salinidades muy bajas en años El Niño o muy altas en años La Niña, reducen o limitan la pesca. Por ello, se definirá un entorno aproximado de “buena pesca” y umbrales de “mala pesca”. El primero se asocia a los años normales climáticamente, usualmente neutros según los índices de la variabilidad El Niño Oscilación Sur (ENOS).

La calidad de playa tiene un comportamiento relativamente más simple, directo (con relaciones lineales y no lineales), donde a mayor salinidad hay casi certeza de buena calidad debido a la baja concentración de coliformes fecales (ufc/1000 ml/L) que no sobreviven con la salinidad > 5 g/L (o menos). Los coliformes son aportados por las descargas acumuladas del emisario submarino (CES) y los desagües pluviales urbanos (CPC). La variable auxiliar secundaria relevante en calidad de playa es la precipitación local en tiempo real (la del nivel cuenca se transforma en caudal con retraso de varios meses). Cuando llueve fuerte en Montevideo se limita el acceso al agua para baño debido a un aumento de la descarga pluvial de coliformes, siendo esta regulación de 1 día. A fin de simplificar su incorporación en el paso mensual del modelo, se analizaron las precipitaciones en términos de cantidad absoluta, anomalía mensual, o eventos de lluvia fuerte. Las primeras son objetivas y continuas, pero los eventos discretos son los que determinan el exceso de carga de coliformes y la inhabilitación de playas, por lo cual se asocian más al concepto de umbral, gestión de riesgos y a las opciones de planificación e intervención.

Los caudales son un muy buen indicador de la presencia de coliformes con un retraso de meses (se fija 2 meses a fines de simulación). Esto tiene la ventaja de ser más cercano al tiempo de la gestión que el indicador SST 3.4, es más potente y además, deja un margen mayor de tiempo para la planificación que la salinidad, cuya variación es sin retraso (0) o 1-2 meses previo al tiempo real de la gestión. Sin embargo, en esta simulación no se utilizará primariamente al caudal, aunque es la variable clave del sistema, sino que se basará en el índice ENOS SST 3.4 pues permite iniciar la simulación con suficiente antelación para la planificación y monitoreo. Así SST 3.4 deviene la variable de primer orden. Luego se introduce el caudal como dependiente con retraso y se simula con él, lo cual permite diversidad de opciones de simulación y la verificación con inclusión de datos reales a partir del mes 3 o 4 para la simulación confines de gestión.

La secuencia del monitoreo y observación se inicia en Julio (mes 1), sigue con el inicio de las zafra de pesca (octubre: 4) y temporada de playa (noviembre: 5) y termina al fin de esta en Marzo (mes 9), lo cual exige simulación continua hasta el mes 5. Se hará sólo una en el mes 1. Un mes crítico es octubre pues durante El Niño suele aumentar significativamente el caudal, lo cual impacta negativamente la pesca y el inicio de la temporada de playa y Enero, cuando se produce otro pico mayor (a contra pelo de la bajante máxima usual de enero), por lo cual la anomalía puede ser máxima, aunque su impacto no se manifiesta hasta el fin de la temporada por el retraso (“delay” o “lag”). Por ello, una simulación en el mes 4 acompañada del monitoreo satelital del SF es también clave.

La secuencia de indicadores mínimos para la simulación: SST 3.4 → QF → km DRC del SF → salinidad → coliformes o captura compone los elementos relevantes y comunes del sistema a ser simulados, con la adición de la anomalía de la lluvia local (groseramente previsible con los valores de SST 3.4) y vientos para la calidad de playa y captura respectivamente. La captura es influida además por un conjunto de variables físicas, de comportamientos y regulatorias que interactúan entre si y dependen de las variables físicas, factores socioeconómicos e institucionales/legales. Esta complejidad debe ser reducida en la medida de lo posible para una

simulación razonable de la actividad de la flota, su captura e ingreso. Aunque el desplazamiento frontal es un descriptor relevante del sistema no es indispensable para la simulación, si para entender el contexto.

Las condiciones de la simulación, tiempos, unidades, niveles, flujos, variables auxiliares y retrasos para la planificación y monitoreo de la calidad de playas (SF-CP.1) se presentan en el Model Setting donde se redujo al mínimo posible los elementos participantes:

En esta simulación se plantea una creación de un modelo en el mes 1 del proceso (Julio) como ayuda a la planificación. Por ello la lógica secuencial se sigue desde la variable clave SST 3.4 la cual permite tener una idea razonable de la evolución de los meses 4 a 6. Además, se utiliza la consecuencia primaria de la variación de SST en el sistema, la variación del caudal fluvial, introducido para simular la salinidad y la calidad de playa. La información de SST 3.4 es disponible en tiempo real con retraso < 1 mes mientras que el caudal se dispone con un retraso de 2-3 meses. O sea que es razonable empezar la simulación con SST para la planificación y reforzarla con la observación del caudal y de la ubicación del sistema frontal en los meses 3-5 para una estimación correcta de los meses 5-7. En la práctica esta secuencia se seguirá mensualmente y se incorporarán datos observacionales (caudales, ubicación del SF, salinidad) que permiten mejorar significativamente el modelo paso a paso (Mensual) para que sea de ayuda a la gestión. Por ello, este trabajo es esencialmente una ayuda a la planificación y monitoreo y la simulación un input al proceso de gestión.

Model Settings: Valor inicial: 1; Valor final: 7; paso temporal: 1 mes.

Niveles¹

1. Salinidad (Unidad: g/L)
2. Coliformes (ufc/1000 ml/L)
3. Captura de Peces (Cajas de Pesca). No simulado aquí.

Flujos

1. Caudal fluvial (km³/mes)²
2. Desplazamiento Frontal (km/mes). Simulado y mostrado pero no utilizado.

Variables auxiliares

1. SST 3.4 (° C) (de primer orden).
2. Precipitación local (% anomalía o ocurrencia de eventos > 10 mm) (de segundo orden).
3. Retraso SST-Q_F: 2 a 3 meses (se usa 3).
4. Retraso SST-Salinidad: 3 a 6 meses (se usa 4 aunque no se lo aplica finalmente).
5. Retraso Q_F-Salinidad: 1 a 2 meses (se usa 1).
6. Retraso Q_F-Coliformes: 1 a 3 meses (se usa 2 aunque no se lo aplica finalmente).

Nota: i) La acción de los retrasos se limita a 1 mes, ya que la simulación se corre cada mes y se tiene un nuevo SST mensual. Asimismo, en una futura versión SF-CP.2 así como en la versión de todo el sistema, se incluirá un retraso que represente la mejor relación con un conjunto de meses previos (de 3 a 6 meses por ejemplo). En las figuras se presentan como si fueran permanentes a efectos de simplificación, o sea que luego de alcanzado su efecto se estabiliza; ii) no se utilizarán todos los retrasos en la simulación analizada pero se presentan pues fueron consideradas todas antes de ser retenidas.

¹ La ubicación del Sistema Frontal (Unidad: km) podría ser un nivel pero se lo convierte en flujo.

² El caudal fluvial puede ser una variable auxiliar de primer orden si la simulación se hace sin SST 3.4.

2.3. Resultados.

2.3.1. Sub-modelo ENOS-Caudal

Primero se definió la relación entre la variable auxiliar de primer orden (ENSO SST 3.4) con el flujo de primer orden (caudal fluvial) y su retraso (3 meses), lo que se representa en el sub-modelo (i) de la figura 4.

El Sistema Frontal es un “acumulador de memoria” por lo cual de hecho es un nivel de un valor medio (referencia histórica) de 138 km DRC (acotado para la simulación en 20 km de mínima y 280 de máxima) y puede ser resuelto como una ecuación regresiva ($y=a+bx$) o con (lookup) $f(Q_F)$. Sin embargo, debido a su desplazamiento continuo por razones multi causales (caudales, vientos y marea) se lo transforma para la simulación en un flujo: Desplazamiento Frontal (DF). Se estima el efecto de Q_F (km^3/mes) sobre un valor inicial de 20 km DRC correspondiente a un mínimo para el valor inicial mínimo de SST 3.4 ($= 0$) y $Q_F = 28.312 \text{ km}^3/\text{mes}$; 138 km DRC se corresponde a SST 3.4 $=2$ y Q_F medio $60.842 \text{ km}^3/\text{mes}$; también se puede usar la ubicación observada del SF en los meses 2,3...n. Este análisis introduce un análisis espacial no usual en SDS para lo cual se introduce el uso de sistemas de información geográfica (SIG).

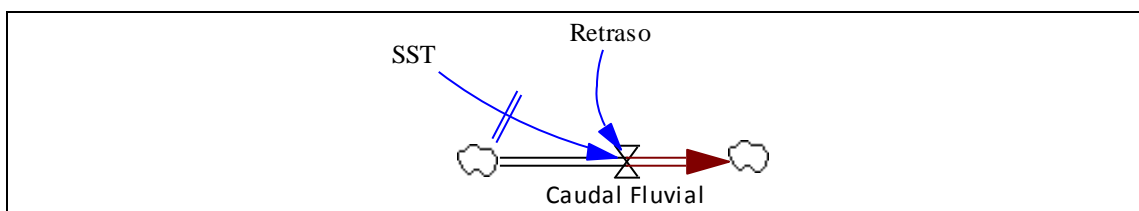


Figura 4. Sub-modelo (i) ENOS-Caudal.

Ecuaciones para la creación del modelo de simulación SFD

Variables Auxiliares

SST 3.4. Esta variable auxiliar varía usualmente entre -2 y $+2^\circ\text{C}$. Se convirtió (SST_{conv}) este rango de anomalía en valores positivos con una escala entre 0 y 4 (extendida a 0-7 donde (0,0) si es con lookup).

Flujos

Caudal Fluvial (River Inflow). Se puede utilizar la ecuación de la recta de regresión $y = a + bx$, (ec.1) o lookup (ver nota abajo),

$$(ec. 1): Y = 28312 + 16.265 X$$

Donde $28.312 \text{ km}^3/\text{mes}$ (a) es el valor inicial (sin valor inicial si es con lookup)

Unidad: km^3/mes .

Valor inicial: $28.312 \text{ km}^3/\text{mes}$ correspondiente al mínimo SST 3.4 $= 0$ ((sin valor inicial con lookup donde (0,0) (7,121824)) en As Graph).

Retrasos

SST 3.4 $\rightarrow Q_F$ (retraso de información de 3^{er} orden, $f(\text{SMOOTH3I})$): 3

Unidad: meses

Nota 1: Se puede optar por trabajar con tabla (As Graph) y lookup donde para que (0,0) se debe empezar con un valor de SST 3.4 menor y no observado naturalmente equivalente a -3.5°C , siendo la secuencia de valores empíricos (SST 0-7) con lookup (ec.2).

ec. 2: ((0,0),(1,17885),(2,34214),(3,45840),(4,69984),(5,86314),(6,103680),(7,121824))

En la figura 5 se muestra la evolución del caudal en función de SST 3.4 (SSTconv +2) con “tabla importada” (regresión lineal $y=a+bx$, ec.1). La función de retraso para información (variable SST) sobre el caudal es SMOOTH3I (tercer orden X,T,N, donde la simulación empieza en 3).

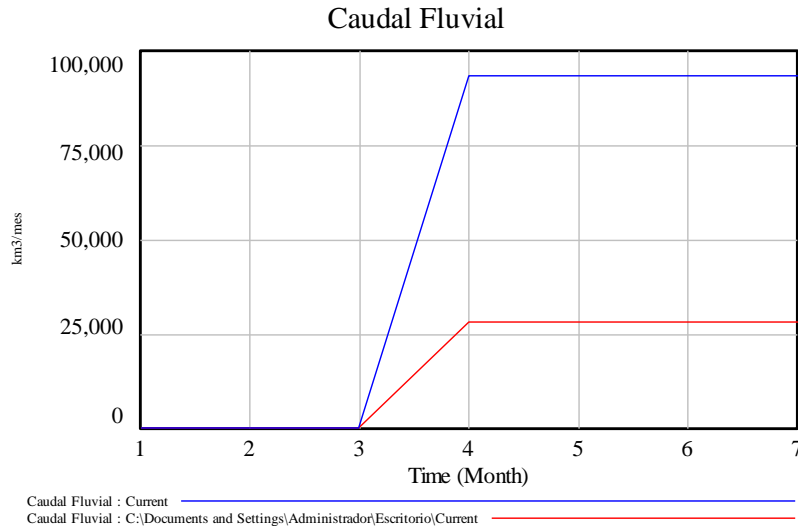


Figura 5. Retraso de 3 meses del Caudal Fluvial para escenarios mínimo (SST 0,1) y máximo (SST 4,1) para el mes 4, con ecuación externa de regresión lineal ($y=a+bx$), asumiendo SST constante.

Con lookup en escala SST 0-7 el valor inicial sería 0 km DRC. En la figura 6 se ve la evolución del caudal para un SST +2°C (SST_{conv} 5) con un retraso f(SMOOTH3I) de la información de la teleconexión de 3 meses.

Debido a que hay una dispersión de valores empíricos en la relación cartesiana x (SST) y (QF) se debería introducir una función Random, pero como dicha dispersión no es independiente del valor de x (la dispersión es muy grande entre SST 3.4 \approx 1.5-2.5, moderada entre 1.5-1.8 y 2.5-2.8 y baja entre 0-1.2 y 2.8-4.0), esto exigiría usar tres valores de aleatoriedad creciente desde sólo 0.1 a \approx 0.25. Se prefiere simplificar la simulación en este caso y asumir un comportamiento Δx , Δy constante.

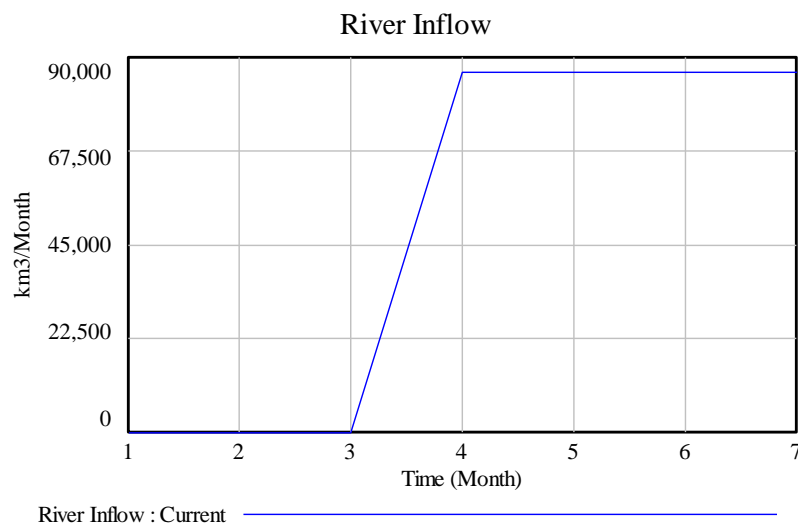


Figura 6. Retraso de 3 meses del caudal para un SST_{conv} de 5 (+2) con lookup.

2.3.2. Sub-modelo biogeofísico de calidad de agua de playa

En una segunda etapa se introduce el nivel sistema frontal (km), la evolución de la salinidad y de las precipitaciones en Montevideo. Aquí hay un retraso material entre el flujo caudal y la salinidad del entorno 1-2 meses. Este retraso es función no lineal de Q_F variando del entorno de días a semanas si $Q_F \gg Q_F$ medio a ≥ 2 meses si $Q_F \ll Q_F$ medio. Asumiendo la limitación del paso temporal de 1 mes, durante el periodo estudiado el retraso elegido es 1 mes. Lo ideal es hacer ambas corridas al igual que en el retraso SST- Q_F . Por razones de simplicidad y por ser más ajustada a la realidad se utilizará solo la ecuación 1 (modelo regresivo importado, Figura 5).

La calidad del agua de playa es definida por la concentración de coliformes fecales/mes el cual se define en la simulación como "Flujo ambiental de coliformes" (FAC) que corresponde a la concentración (nivel) en agua escalada a paso mensual. La calidad (aptitud de baño) se define de manera binaria: Apto si [coliformes] < 1000 ufc/1000 ml/L y No Apto si [coliformes] > 1000 ufc/1000 ml/L a la escala de evento muestreado (2 días por semana más el día siguiente a un evento de precipitación fuerte). Por ello es razonable definir rangos mensuales que representan una escala discreta de calidad desde muy pocos a muchos eventos de no aptitud en el mes. Para ello se define aquí una escala de 1 a 5 con rangos de Calidad: 1 (muy buena)= 0-200 (buena); 2= 200-500 (moderada); 3= 500-1000 (regular); 4= 1000-3000 (mala) y 5=> 3000(muy mala) ufc/1000 ml/L, siendo de interés (umbral o limite) 1000 ufc/1000 ml/L convertido a un valor representativo del paso mensual. Estas concentraciones son función de la salinidad, la cual gobierna primariamente la tasa de mortalidad de coliformes (M) y de la ocurrencia de eventos de precipitaciones fuertes, los cuales se simulan a paso mensual usando como extremo la mayor anomalía mensual de lluvia registrada en el período (Figura 7).

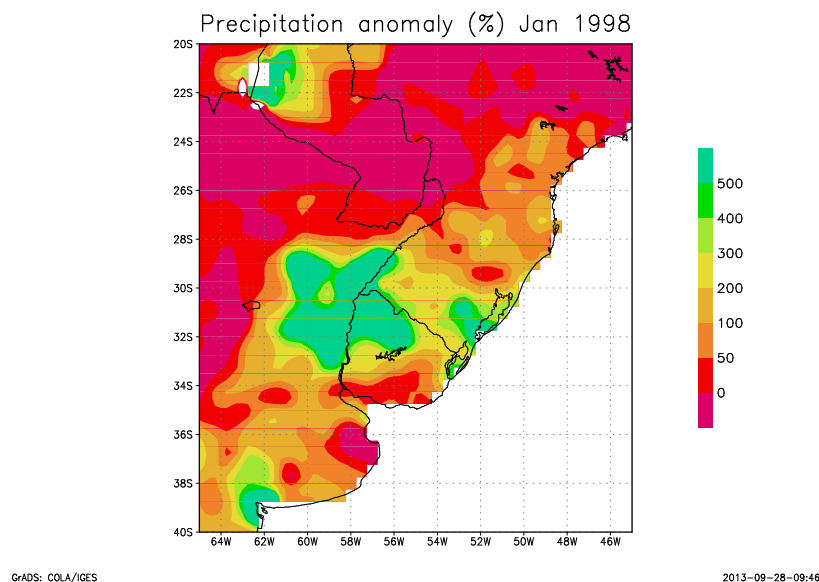


Figura 7. Anomalía de lluvia (%) sobre la cuenca del Río de la Plata en Enero de 1998. Fuente: Nagy et al. (2013).

Si bien el rango salino mensual de temporada puede variar de 10 a 23g/L, se modela para el rango de interés 1-12,5 g/L lo que facilita una aproximación lineal. Para la definición de las precipitaciones en la simulación se exploraron varias posibilidades: precipitación acumulada /mes o eventos (> 5, > 10 o > 25 mm/día)/mes. Tanto la precipitación acumulada como los eventos >10 mm/día mostraron muy buena correlación con el flujo ambiental de coliformes

extremo en la temporada 1997-98 ($r^2= 0.88$). Por ejemplo, la anomalía sobre Montevideo en diciembre 1997 y Enero de 1998, luego de muy altos valores de SSTconv (3.5-4.3) fue entorno a + 90-110% lo que se asimila a 1,9 y 2,1 (anomalía muy fuerte).

Dado que lo que explica el exceso de coliformes en este caso es la precipitación local y su impacto “carga pluvial de coliformes” aportada por los desagües pluviales, la cual es monitoreada al día siguiente con inhabilitación del acceso al agua de playa, se prefirió seleccionar los eventos transformados a la escala mensual de la simulación (eventos /mes).

Aunque la correlación precipitación-coliformes en la temporada “97-98” fue mayor que la de salinidad-coliformes y aun revirtió su signo, el exceso del nivel carga pluvial de coliformes persiste más tiempo (se acumula) por una menor mortalidad a bajas salinidades.

El diagrama de niveles y flujos sin y con el flujo proveniente del emisor submarino se muestra en la figura 8.

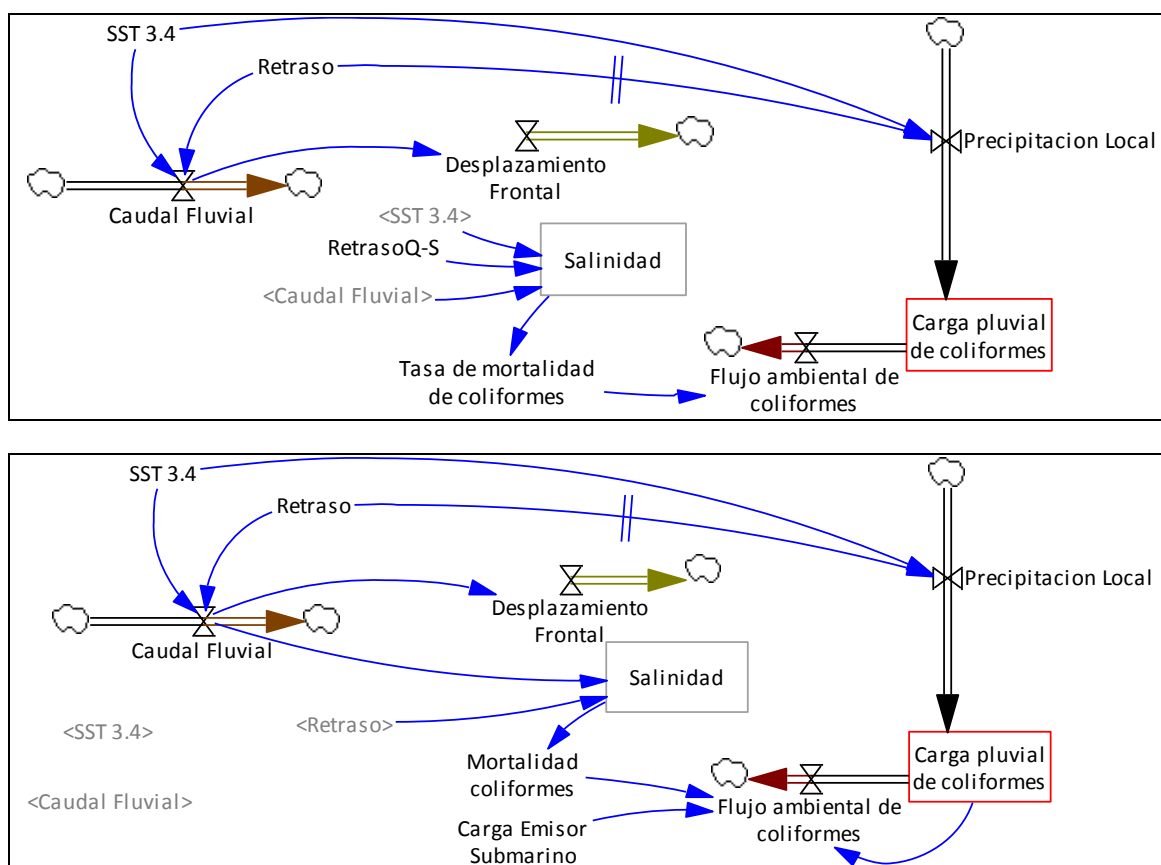


Figura 8. Diagrama de niveles y flujos biogeofísicos de calidad de playa. I) Arriba: SDF basado en SST sin estimación de la carga del emisor submarino (CES) y ii) SDF basado en Q_f con estimación de CES.

Ecuaciones

Las variables, niveles y flujos definidos en la sección anterior se mantienen igual. Se agregan:

Variables Auxiliares

Mortalidad de coliformes (M)

Unidad: coliformes /mes

$$M = (\text{Salinidad} * 0.074) + 0.104$$

La mortalidad (M) es función de la salinidad y se aproximó a 0,999 (99,9%) para una salinidad 12,1 (límite superior de la simulación Q_F -Salinidad para este modelo) pues se asume asintótica, con un mínimo 0,001 para salinidad 0,1.

Carga del Emisor Submarino (CES)

Unidad: Coliformes/mes

Constante: 150.000

Niveles

Salinidad

Unidad: g/L

ec (3) Salinidad= ($Q_F * -0,002$) + 21,468³

Retraso: Q_F -Sal: 1 mes (si fuera prioridad el trabajar con caudales bajos podría ser 2 meses).

Si se corre como f (SST):

ec (4) $y = (-4,925 * SST_{conv}) + 20,75$

Retraso SST-Sal: 4 meses (no utilizado finalmente).

Carga pluvial de coliformes (CPC)

Unidad: 1000 ufc/1000 ml/L

CPC= Precipitación Local* 8000 -

(Flujo ambiental de coliformes*0.0001)

Valor inicial: 810

Flujos

Desplazamiento Frontal (DF) a partir de una ubicación variable) (UF)⁴.

Unidad: km/mes

Ec. (5): $y = (0.003 * Q_F) - 75,29$

Valor inicial: Se puede dejar el valor inicial de SF-CP_1 (20 km) o introducir el valor de la ubicación observada del Frente de Turbiedad Principal del SF (ver Figura 2) del mes 3 (Octubre), ya que esto da un nivel de base realista sobre el que actúa Q_F forzando el flujo de desplazamiento⁵ y la ubicación en km correspondiente. El Q_F puede ser el observado del mes 1 (realista en la praxis monitoreo-modelación-gestión) o simulado en función del Q_F estimado como f (SST), lo que útil para planificación mientras se espera el input de datos (lo que tiene un retraso del orden de los proceso físicos). Para ello el modelo regresivo lineal simplificado se construye con los desplazamientos extremos (20-280 km) y ubicación media del SF (138 km) y los caudales correspondientes. Para SST 1 (Julio) se puede tomar como valor inicial el Q_F+2 (Setiembre) asumiendo que el efecto del retraso SST- Q_F (+ 3, efectivo en octubre), comienza en el mes +2 (como es representado en las figuras 5 y 6). Se asume que no hay retraso entre ambos flujos (Q_F) y (DF) al paso mensual.

Valor Inicial: 110 km (observado)

Se optó por introducir tabla lookup ((0,0), (28313,20; 60842,138), (103690,280)) en vez de importar la ecuación lineal (Figura 10). Se analiza también el desplazamiento forzado para SST (0) y (4) a partir del valor inicial 20 km y la situación real observada en octubre 2013 (110 km) forzado con el SST (0).

³ La ecuación de regresión se obtuvo a partir de los 15 datos de años El Niño, La Niña y neutros.

⁴ Aunque no se utiliza finalmente en la simulación es un nivel (UB) y flujo (desplazamiento clave en el sistema) y se considera útil presentar su variación.

⁵ En esta simulación se usan datos presentes de la ubicación del SF al 6 de octubre de 2013.

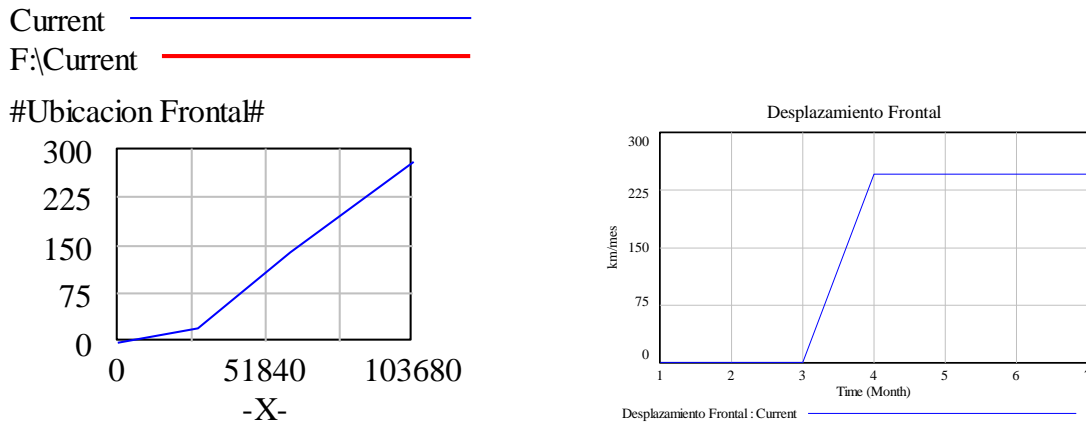


Figura 9. Ubicación frontal (Km DRC, izquierda) determinada por el flujo de desplazamiento (km³/mes, derecha) para el rango de caudales inducidos por SST (con SST 0 a 4 en mes 1) según Lookup Q_F (km³/mes)-UF (km).

Precipitación Local (PL)

Unidad: Eventos (precipitación > 10 mm)/mes (Figura 10)

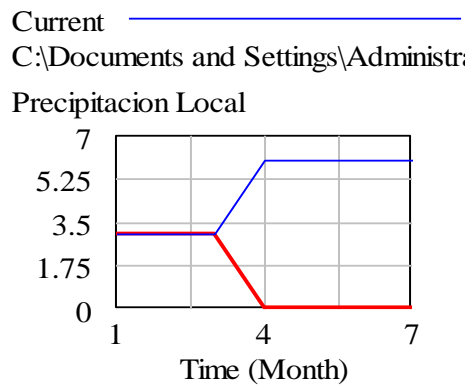
Ec. (6): $(PL) = a+bx = x(SST3.4)*b(1.5) + a(0.002)$

Flujo ambiental de coliformes (FAC)

Unidad: ufc/1000 ml/L /mes

$((Carga\ pluvial\ de\ coliformes + Carga\ Emisor\ Submarino) * Mortalidad\ coliformes / 100)$

--



Retraso

Current: 3 C:\...and Settings'
 "SST 3.4"
 Current: 4 C:\...and Settings'

Figura 10. Corrida de Precipitación local con retraso de información f (SMOOTH3I, SST3.4*1.5+0.002, Retraso, 3). Arriba (azul): SST3.4= 4 (similar a enero 1998); Abajo (rojo): SST3.4=0.

Retrasos

Unidad: mes

SST-Sal(de información)= 4 (explorado pero no utilizado finalmente)

SST 3.4 -PL (de información)= 3

Q_F-Coliformes (material) = 2-3 (explorado pero no utilizado finalmente, aunque muy potente si se empieza la simulación en mes 4-5)

2.3.3. *Corridas.*

Se efectuaron más de 100 corridas y ajustes de valores del nivel Carga Pluvial de Coliformes (CPC) y Carga del Emisor Submarino (CES) hasta que se encontraron los niveles, auxiliares, flujos y valores que, para las condiciones de caudales fluviales, salinidad y eventos de precipitación asociados a la variación de SST, ajustaron muy bien para los rangos salinos y flujos ambientales de coliformes (FAC) de interés ambiental.

Las simulaciones representan muy bien las cargas y flujos (mensuales) encontradas en la referencia histórica para todo el rango de valores, especialmente para los rangos de interés que generan preocupación: baja salinidad y eventos de precipitación fuerte. La simulación reproduce casi a la perfección los valores máximos de la temporada 1997-98, asociada a una anomalía (+) extrema de eventos de precipitación y baja salinidad media, así como las condiciones medias. No se usaron valores reales de cargas sino que se simularon a efectos de ajustarse al modo histórico y aprender del ejercicio.

Las corridas permitieron definir que los eventos de precipitación son de primer orden durante eventos anómalos (+) y por lo tanto la importancia de su previsión, comunicación y eventualmente reducción de impactos, como medidas progresivas de gestión a la ya existente de vigilancia e inhabilitación de las aguas de playa post-evento. Sólo así se explica la anomalía excesiva del flujo ambiental 1997-98 y elevó el mismo a variable clave, lo que no se pensaba a priori (a pesar de su relativa obviedad).

El proceso de construcción del diagrama causal fue esclarecedor para definir los elementos importantes y eliminar ruido o perturbaciones a la simulación. La construcción de los diagramas de nivel y flujo fue más compleja, tanto su definición como la formulación de las ecuaciones y selección de funciones o tablas. Las corridas fueron la etapa más laboriosa y también esclarecedora de las limitaciones y conveniencia del uso de determinadas variables, niveles y flujos a efectos de la simulación (describiendo razonablemente bien al sistema). También sugieren implícitamente la existencia de feedbacks y posibles alternativas de gestión con impacto real para disminuir el impacto de la carga pluvial de coliformes, peligrosa cuando coincide con salinidades < 6 g/L.

En la figura 11 se muestran las corridas del aporte urbano y el flujo ambiental de coliformes en función de la precipitación local para un evento El Niño fuerte (SST_{conv} = 4 = SST 3.4 =2).

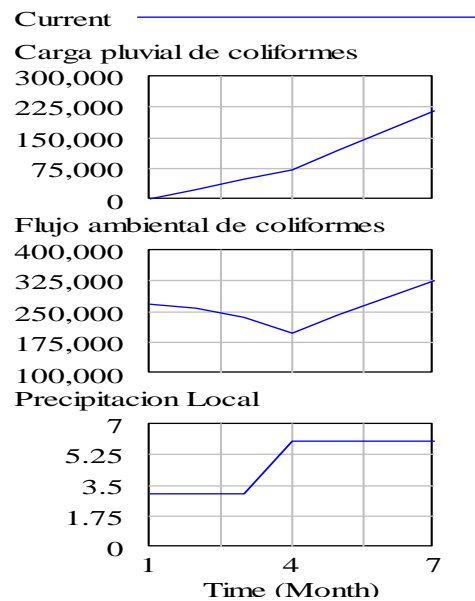


Figura 11. Carga pluvial y flujo ambiental de coliformes para la precipitación local para escenario SST= 4.

En la tabla 1 se muestran los valores correspondientes a las corridas para el rango de variación de SST_{conv} entre 0 y 4. El FAC para el valor medio 2 es algo inferior al rango de referencia histórica (50-100), mientras que para SST 3-4 los resultados son algo mayores (3000-6000) debido a la inclusión de la estimación de eventos de precipitación, lo cual es plausible y es el riesgo real. Si se usa un valor de flujo ligeramente menor el ajuste es aún mejor pero puede subestimar situaciones críticas.

Tabla 1. Resumen de valores de las corridas para SST_{conv} 0,1,2,3 y 4. Los límites de QF-salinidad fueron establecidos para simular el rango salino 0,1 a 12,1 (Mortalidad de coliformes creciente de 0,001 a 0,999). Carga del Emisario ($1,5 \cdot 10^5$ coliformes/mes); Carga Pluvial de Coliformes ($8 \cdot 10^3$ coliformes/evento, escalado a paso mensual). Se agregan los valores umbrales de SST asociados a posibles FACs de 500 y 1000ufc/1000 ml/L.

SST _{conv} (°C)	Q _F (km ³ /mes)	Salinidad (g/L)	Nº Eventos Precipitación > 10 mm ⁶	Flujo Ambiental de Coliformes (FAC) / mes	FAC equivalente (coliformes/día)
0	28.312	≥12,1*	≤1	126	4
1	44.577	12,1	≥1	>126	4
2	60.842	6,1	3	1171	39
3	77.107	3,1	>4	140.497	4.683
4	93.372	0,1	≥6	187.280	6.243
>2,5	>70.000	<5	≥3		≥500
>2,8	>75.000	<4	≥4		≥1.000

*El valor real para este caudal es una salinidad > 20, pero escapa de los límites del modelo.

2.3.4. Opciones de Intervención

De todo lo expuesto queda claro que las opciones de mejora de la planificación, monitoreo, gestión de riesgos y reducción de impactos son la/las:

⁶ En futuras simulaciones se valorará diferencialmente el flujo de eventos >5, > 10, > 25 y > 50 mm.

- Alerta temprana y simulación desde el mes 1.
- Incorporación mes a mes de datos observacionales disponibles (imágenes satelitales de la posición del sistema frontal, caudales fluviales, salinidad).
- Continuación del programa de vigilancia y comunicación durante la temporada con incorporación de previsión y alerta a escala diaria/semanal.
- Acciones para reducir la carga de coliformes contaminantes, ya sea en el emisor submarino (tratamiento terciario muy costoso) o aplicación de sustancias naturales (por ej. NaCl) a la descarga pluvial para reducir el flujo ambiental a menos de 1000 ufc/ml/L a las escalas de interés (eventos de precipitación fuerte y/o salinidades menores a 5 g/L).

En la figura 12 se introduce la simulación en el diagrama de niveles y flujos para reducir al FAC a escala mensual interviniendo con adición de sales naturales en función de la simulación y el uso de la previsión meteorológica en tiempo real. El coste de la infraestructura necesaria y de la operación y mantenimiento no se estima pero se asume es sensiblemente menor al tratamiento terciario del emisor. Esto se basa en que es más posible la ocurrencia de una temporada con fuerte anomalía de eventos de precipitaciones fuertes (incidencia en la carga pluvial) que salinidades medias ≤ 3 g/l, lo que nunca ha pasado en los meses pico (5-6) de la temporada entre 1997-98 y 2012-13.

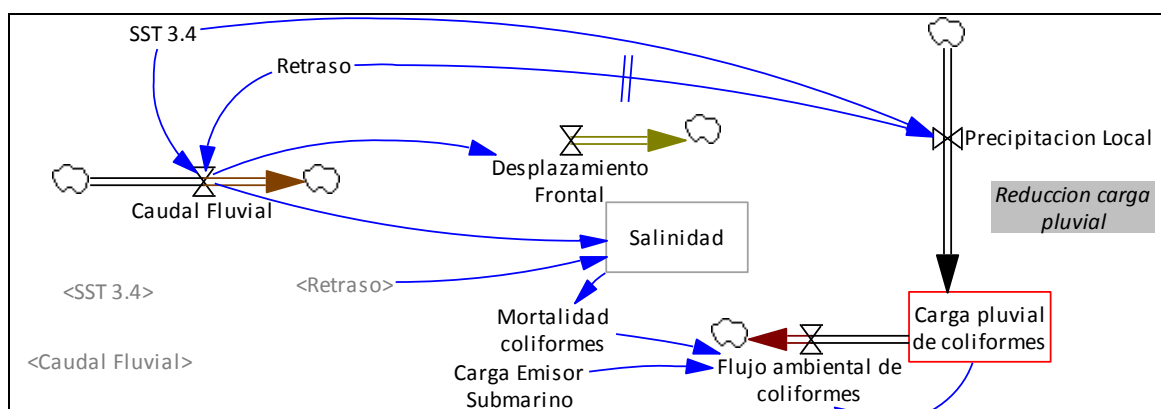


Figura 12. Simulación de intervención para reducir la carga pluvial y el flujo ambiental de coliformes.

El flujo ambiental de coliformes para el escenario SST 3.4 (4) en el mes 4 con intervención en la carga pluvial se muestra en la figura 13. El valor simulado es 67.479 ufc/ml/L/mes, siendo el umbral deseable de 30.000 ufc/ml/L/mes. Sin intervención el valor es seis veces el límite.

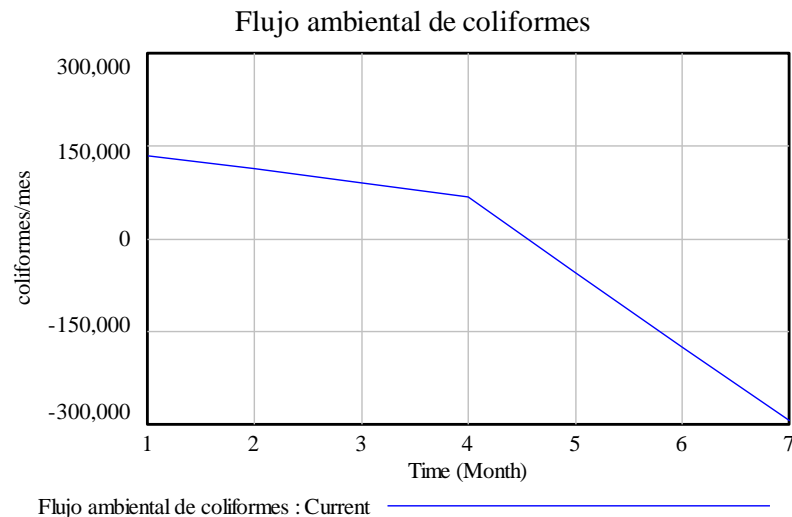


Figura 13. Flujo ambiental de coliformes (67.479 ufc/ml/L/mes) con medida correctiva en las pluviales.

3. Conclusiones

Los resultados del modelo permiten simular muy bien la calidad del agua para eventos de alta descarga fluvial y baja salinidad, aproximando incluso la co-ocurrencia de precipitaciones muy fuertes. La simulación sugiere que para condiciones anómalas positivas de precipitación local y muy bajas salinidades mensuales medias (Salinidad ≤ 3 g/L, lo que implica muchos días con salinidad cercana a 0,1 g/L cuando la mortalidad es casi nula), los esfuerzos deberían concentrarse en las etapas de previsión, monitoreo, planificación, seguimiento y comunicación a la población.

La simulación muestra que no es posible reducir el flujo de coliformes a niveles deseables pero si asegurar que solo lo superan bajo condiciones extremas que solo se registraron 1 vez en 16 años (1997-98), pero con menor intensidad que en esa oportunidad. O sea que la decisión depende de la factibilidad y la razón beneficio/coste.

Parece ser muy alto el coste para lograr un beneficio que no asegura calidad de playa toda la temporada bajo todas condiciones hidroclimáticas y meteorológicas extremas.

También la simulación sugiere que el alto coste de reducir los aportes del emisario submarino no garantizaría la calidad absoluta sino no se hace lo mismo con las pluviales.

4. Bibliografía

Bidegain M, Verocai JE, de los Santos M, Rodríguez C, 2011. Escenarios Climáticos y de Eventos Extremos sobre la Dinámica de la Zona Frontal del Río de la Plata. Reporte FC al Proyecto GEF URU/07/G32, UCC-DINAMA-UNDP. "Implementando medidas piloto de adaptación al cambio climático en áreas costeras del Uruguay", 91 pp.

- Brazeiro A, Acha ME, Mianzán HW, Gómez-Erache M, Fernández V, 2004. "Aquatic Priority areas for the Conservation and Management of the Ecological Integrity of the Río de la Plata and its Maritime Front". Sc. Report Freplata Project 1-2.2, PNUD /GEF RLA/99/G31.
- Framinán, M.B., Brown, O.B. 1996. "Study of the Rio de la Plata turbidity front Part I: spatial and temporal distribution". Cont. Shelf Res. 16, 1259–1282,1996.
- García, N.O., W. Vargas. 1998. "The Temporal climatic variability in the Rio de la Plata Basin displayed by the river discharges". Climatic Change, 38:359-379.
- Hoekema DJ, 2011. "A System Dynamics Approach for Climate Change Impact Analysis in the Snake River Basin".A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Civil Engineering, Boise State University,May 2011.
- Martin García, J, 2012. Dinámica de Sistemas. Ejercicios. Tercera edición ampliada y revisada, Barcelona, España. ISBN 84-607-9304-4
- Guerrero, R.A., Acha, E.M., Framiñan, M.B., Lasta, C.A., 1997.Physical Oceanography of the Rio de la Plata estuary, Argentina.Cont. Shelf Res. 17, 727–742, 1997.
- IdeM, 2010.Programa de Monitoreo de Agua de Playas y Costa de Montevideo. Informe 2009-10 (Feola G, B Brena, J Risso, S Sienna, G Saona, ME Echezarreta). Departamento de Desarrollo Ambiental. Servicio Laboratorio de Calidad Ambiental. Intendencia de Montevideo.
- Nagy GJ, N Muñoz, JE Verocai, M Bidegain, B de los Santos, L Seijo, GFeola, B Brena, JRisso, J Martín García,2013.*Climate Science, Monitoring, and Management in the Rio de la Plata Estuarine Front*", Climate/KLIMA/Clima on-line Conference, November 4-8 2013,and "International perspective on climate change: Latin America and Beyond", Edited by W Leal, Springer-Verlag, Germany.
- Nagy GJ, L Seijo, JE Verocai, E Brugnoli, M Bidegain, (enviado a publicar a Costas, UNESCO, N° 208), "Enfoque, conocimiento y medidas para enfrentar los Riesgos Ambientales al Clima Presente en la Zona Frontal del Río de la Plata, Uruguay".
- Nagy GJ, DN Severov, V A Pshennikov, M De los Santos, J Jlagomarsino, K Sans, E G Morozov., 2008a.Rio de la Plata Estuarine System: Relationship between River Flow and Frontal Variability. Adv. Space Res. 41:1876-1881. Elsevier,
- Nagy GJ, M Bidegain, R M Caffera, W Norbis, A Ponce, V Pshennikov, D N Severov., 2008b, "Fishing strategies for managing climate variability and change in the Estuarine Front of the Rio de la Plata", in Leary, N. et al. (Eds), Climate Change and Adaptation, Earthscan, London.
- Norbis,W, 1995. "Influence of wind, behaviour and characteristics of the croaker (*Micropogoniasfurnieri*) artisanal fishery in the Rio de la Plata (Uruguay)". Fisheries Res. 22:43–58, 1995.
- Severov DN, GJ Nagy, V Pshennikov, 2003. SeaWIFS fronts of theRio de la Plata estuarine system. Geophys. Res. Lett. 5, 01914, 2003.

Verocai, J E. 2012. Modelo de eventos mínimos y máximos del desplazamiento del frente principal de turbiedad y del nivel medio del mar en la costa del Río de la Plata (2000-2009). Reporte del Proyecto GEF URU/07/G32, UCC, DINMA, 10 pp.

Unidad de Cambio Climático (UCC). 2012. Dinámica acuática del Frente Salino. Ficha Técnica del Proyecto GEF URU/07/G32, UCC-DINMA, Montevideo, Uruguay, 6 pp.

--



<http://dinamica-de-sistemas.com/>

Distribuidor Oficial Vensim:

<http://atc-innova.com/>

Libros

Cursos Online



[Ejercicios](#)



[Curso Básico Intensivo en Dinámica de Sistemas](#)



[Avanzado](#)



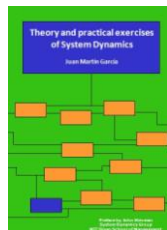
[Curso Superior en creación de modelos de simulación](#)



[Conceptos](#)



[Modelos de simulación en ecología y medioambiente](#)



[English](#)



[Planificación de empresas con modelos de simulación](#)



[Português](#)



[System Thinking aplicado al Project Management](#)