



## XI Congreso Nacional de AIDIS

Cambios, desafíos y soluciones:

El rol de la Ingeniería Ambiental en el desarrollo sostenible

25 al 27 de octubre de 2022

Cámara Mercantil de productos del país



### IMPLEMENTACIÓN DE UN MODELO DE CALIDAD DE AGUA CON LA HERRAMIENTA SWAT EN LA CUENCA DEL RÍO NEGRO

#### **Florencia Hastings \***

Ingeniera Civil, perfil hidráulico – ambiental, estudiante de la Maestría en Ciencias Agrarias (FAGRO - UdelaR). Dirección Nacional de Calidad y Evaluación Ambiental, Ministerio de Ambiente, Montevideo, Uruguay - Consultor Iniciativa para el Río Negro

#### **Pablo Kok**

Dirección Nacional de Calidad y Evaluación Ambiental, Ministerio de Ambiente, Montevideo, Uruguay.

#### **Mercedes Gelós**

Dirección Nacional de Calidad y Evaluación Ambiental, Ministerio de Ambiente, Montevideo, Uruguay – Consultor proyecto PNUD – URU/19/002

#### **Ángel Tejera**

Dirección Nacional de Calidad y Evaluación Ambiental, Ministerio de Ambiente, Montevideo, Uruguay - Consultor Iniciativa para el Río Negro



**TEMA:** 4 Gestión de Recursos Hídricos

Contacto: [florencia.hastings@ambiente.gub.uy](mailto:florencia.hastings@ambiente.gub.uy)

#### **RESUMEN**

Se presenta el proceso de implementación del modelo SWAT (Soil Water Assessment Tool) en la cuenca del Río Negro, período 2011-2021, y los principales resultados alcanzados. El trabajo estuvo a cargo del equipo técnico de la Dirección Nacional de Calidad y Evaluación Ambiental del Ministerio de Ambiente, e implicó la revisión y análisis de datos e información de entrada que fue sistematizada para toda la extensión de la cuenca. El modelo fue calibrado y validado en la cuenca alta del Río Negro (aguas arriba del embalse de Rincón del Bonete) obteniéndose un ajuste en general muy bueno para los estadísticos hidrológicos utilizados. Para calidad de agua se realizó una calibración blanda que implicó una revisión sobre la producción de biomasa a partir de registros nacionales, una revisión de las estimaciones de pérdida de suelo y de los coeficientes de exportación de nitrógeno y fósforo para las diferentes rotaciones según los usos de suelo definidos. También se trabajó en el ajuste de los resultados de nitrógeno total, fósforo total y sólidos suspendidos totales como parámetros de análisis de la calidad del agua utilizando los monitoreos de calidad de agua como referencia, lográndose representar estas variables de manera adecuada. La herramienta obtenida permite generar diferentes tipos salidas con un potencial uso operativo para la gestión de calidad de agua.

**Palabras Clave:** Modelación de calidad de agua, Gestión integrada de recursos hídricos, SWAT.



25 al 27 de octubre de 2022

Cámara Mercantil de productos del país

## INTRODUCCIÓN

La cuenca del Río Negro abarca una superficie de 70.714 km<sup>2</sup>, casi en su totalidad se extiende sobre territorio uruguayo y tiene sus nacientes en el territorio brasileño. Su cauce principal tiene una extensión aproximada de 750 Km y es el principal curso de agua interior del Uruguay. El Río Negro tiene una importancia estratégica en cuanto a la generación eléctrica en el Uruguay ya que cuenta con un sistema 3 represas hidroeléctricas sobre su cauce principal.



**Figura 1: Cuenca del Río Negro.**

El uso de suelo predominante en la cuenca corresponde al campo natural con un pastoreo extensivo (baja carga animal), abarca aproximadamente el 58% de cobertura en la cuenca alta del Río Negro. Se identifican a su vez otros usos de suelo como son: agricultura con pasturas, agricultura continua, bosque nativo, forestación, cultivo de arroz, entre otros. En la extensión de la cuenca existen algunas ciudades relevantes y diversas localidades. En cuanto a los emprendimientos productivos, se corresponden principalmente con la actividad agroindustrial, destacándose importantes frigoríficos, plantas de producción láctea y otros emprendimientos del rubro. Vinculado a estas actividades y en función de los monitoreos de calidad de agua, se identifican algunas situaciones de contaminación vinculadas al exceso de nutrientes en cursos de agua. Se observan en algunos cuerpos de agua, episodios de floraciones algales asociadas a este exceso de nutrientes.

Las herramientas de modelación de cantidad y calidad de agua constituyen un insumo clave como instrumento de gestión ambiental. Permiten generar un análisis integrado de diferentes dimensiones relevantes que ayudan a representar y conocer el impacto antrópico sobre el ambiente, vinculado esencialmente a las prácticas de uso y manejo de suelo como también a vertidos puntuales. Mediante la implementación de escenarios se logra contar con insumos relevantes para la cuantificación y evaluación de medidas para la gestión y definición de políticas públicas. El uso de estas herramientas por parte de instituciones de gestión ha tenido avances relevantes en el último tiempo y busca consolidar su funcionamiento operativo a partir de un trabajo conjunto con instituciones de investigación y desarrollo. Para ello resulta clave contar con información y datos de calidad que estén disponibles y almacenados de forma sistemática.

Para la implementación del modelo de calidad de agua en la cuenca del Río Negro se hizo especial énfasis en representar las condiciones de exportación de nutrientes y su transporte del suelo al agua. Se trabajó en la implementación del modelo SWAT (Soil Water Assessment Tool) desarrollado por la Universidad Texas A&M y el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA), en la cuenca del Río Negro en el período 2011-2021. Se realizó un proceso de calibración y validación para la cuenca alta del Río Negro. Considerando algunas limitaciones asociadas a la falta de información relacionada al monitoreo ambiental de algunas variables, se recorre un camino de trabajar sobre una calibración blanda y multi criterio verificando algunos resultados intermedios conocidos.

## METODOLOGÍA

La implementación del modelo se realiza incorporando la información de entrada para la totalidad de la cuenca del Río Negro, pero trabajando los procesos de calibración y validación solamente en la cuenca alta. Esta zona tiene una superficie de 3.933.833 ha, que representa el 56 % del total de la cuenca. En la Figura 2 se muestra la cuenca del Río Negro y la cuenca alta, donde 295.471 ha se localizan en territorio brasileño y en la Tabla 1 la distribución de los usos de suelo. El modelo implementado se discretizó en 34 subcuencas para la cuenca alta.

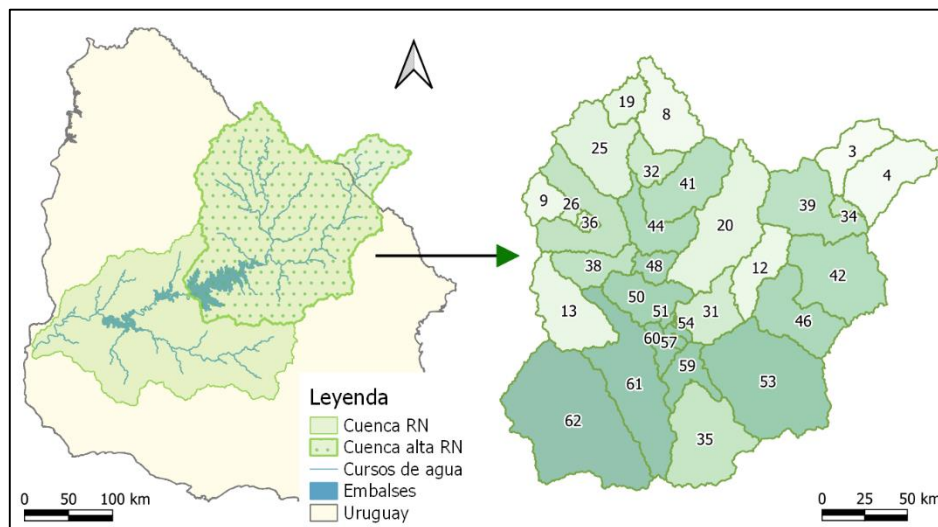


Figura 2: Cuenca alta del Río Negro (izquierda) y subcuencas del modelo SWAT (derecha).

Para la cuenca alta se trabajó en diferentes etapas de ajuste recorriendo las diferentes componentes incluidas en el modelo. En primer lugar, se calibró la cantidad de agua considerando los monitoreos de caudal disponibles a paso diario. En el caso de la calidad de agua, donde la cantidad de datos de monitoreo es baja, un abordaje de calibración blanda y multicriterio permite asegurar que los componentes principales del modelo estén representados adecuadamente (Nelson, 2018). Existen salidas del modelo que es importante verificar aunque no se dispongan de observaciones para realizar una calibración formal. En este sentido se analizaron los resultados de producción de biomasa para diferentes tipos de cultivos para los que se cuenta con series de producción, se verificaron las estimaciones de pérdida de suelo que se pueden contrastar con valores promedio anual resultado de la investigación local y la exportación de nutrientes (fósforo total, PT y nitrógeno total, NT) con las estimaciones de los coeficientes de exportación según uso del suelo. Finalmente, se realiza un trabajo específico vinculado a la visualización y análisis de los resultados de exportación de nutrientes y su concentración en los cursos de agua.

Tabla 1: Usos de suelo de la Cuenca alta de RN.

Uso del suelo	Descripción	Area(ha)	% Cuenca
GRAS	Campo natural	1757873	58.1
AGRP	Agricultura con pasturas	468460	15.5
MONT	Bosque nativo	291399	9.6
EUCA	Forestación	274716	9.1



<b>AGRC</b>	Agricultura continua	77186	2.5
<b>AGRB</b>	Agricultura en territorio brasileño	63088	2.1
<b>ARR</b>	Cultivo de arroz	39400	1.3
<b>WATR</b>	Agua	25034	0.8
<b>LECH</b>	Agricultura predios lecheros	18562	0.6
<b>URBN</b>	Centros urbanos	10822	0.4
<b>BARR</b>	Suelo desnudo	1059	0.0

#### **Calibración de caudales**

Para la calibración de caudales se utilizaron datos diarios de diez Estaciones de monitoreo pertenecientes a UTE. El período de calibración fue 2011- 2018 y se utilizó el período 2019-2021 para la validación. El software utilizado fue SWAT Calibration Uncertainties Program (SWAT-CUP) (Abbaspour, 2012) con el algoritmo SUFI 2.

#### **Verificación del módulo de cultivos**

Las simulaciones del módulo de cultivo fueron verificadas a partir de los datos promedio de los rendimientos en grano para el caso de cultivos extensivos, y de biomasa para campo natural y pasturas. Los datos observados provienen de las instituciones nacionales DIEA y DGF - MGAP, INIA y ACA. Se trabajó en el ajuste de los principales parámetros del crecimiento de los cultivos de manera de representar adecuadamente estos ciclos.

#### **Verificación del módulo de exportación de sedimentos**

En Uruguay el modelo USLE/RUSLE (Ecuación Universal de Pérdida de Suelo/ Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada) es ampliamente utilizado para estimar la erosión promedio anual. Se cuenta con el software EROSION 6.0 (DGRN-MGAP) para estimar la erosión de referencia, donde están incluidos los factores determinados mediante estudios experimentales locales. Por otra parte, el modelo SWAT determina la exportación de sedimentos, a paso diario, utilizando la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Modificada (Williams, 1975). En esta componente se realiza una verificación de las estimaciones de exportación de sedimentos con los diferentes métodos de manera de lograr resultados representativos para el sistema en estudio.

#### **Verificación de los resultados de calidad de agua**

Para verificar los resultados del módulo de calidad de agua se cuenta con los datos del monitoreo de DINACEA disponibles en el Observatorio Ambiental Nacional. Se seleccionaron las estaciones que se encuentran en la cuenca alta del Río Negro, que además coinciden con alguno de los cierres de las subcuencas, en la Figura 3 se muestran las Estaciones seleccionadas. Cuatro de las estaciones (RN1, RN2, RN3, RN6) son las más antiguas y se dispone de un total de 30 datos de muestreos, el resto de las estaciones iniciaron desde 2016 en adelante y se dispone de 11 o menos datos.

#### **Mapas de exportación y salidas tipo**

Para el desarrollo de esta componente se trabaja en el análisis espacial y temporal de la exportación de nutrientes obtenida. También se generan salidas para subcuencas específicas donde se determina las condiciones promedio y sus rangos de variación, curvas de permanencia y % de tiempo que se cumple con objetivos o umbrales de calidad de agua. Estas salidas se elaboran de manera exploratoria de manera de identificar potenciales usos de la herramienta implementada.

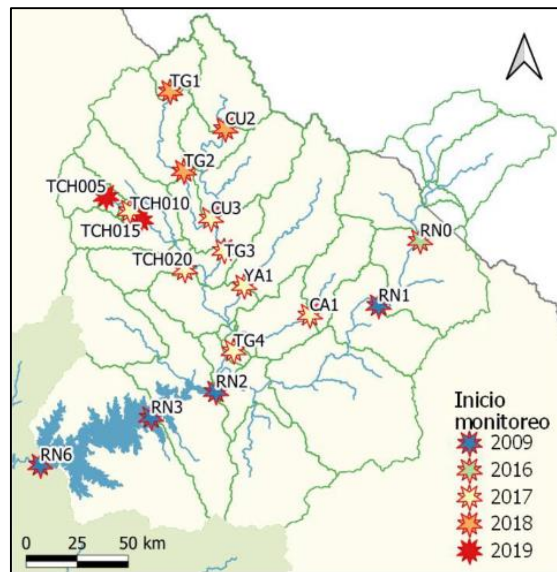


Figura 3: Localización de las Estaciones de monitoreo de calidad de agua (DINACEA-MA).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la calibración de caudales siete de las diez estaciones presentan un ajuste muy bueno ( $NS > 0.75$ ), según los criterios establecidos en Moriasi et al. (2007), tanto en la calibración como en la validación.

En la verificación de los módulos de cultivo se trabajó por separado con cada uso de suelo, se muestra a modo de ejemplo el proceso correspondiente al campo natural (GRAS) por ser el uso con mayor proporción en la cuenca. En este caso se tomaron como referencia para la verificación los datos de producción de biomasa anual promedio para la Unidad geomorfológica Cuenca Sedimentaria del Noreste (MGAP-DIEA, 2020). Se modificaron algunos parámetros del pastoreo: la dotación de ganado en pastoreo fue calculada a partir de los datos de la Declaración Jurada de DICOSE-MGAP (0,75 UG/ha) y se consideró otra menor (0,6 UG/ha) para los meses de invierno (mayo a agosto), el consumo de biomasa del pastoreo se estimó en un 2% del peso del ganado y las excretas (expresadas en peso seco) en un 35 % del consumo por pastoreo. Además, se modificaron nueve parámetros de la fenología del cultivo dentro de los rangos de las referencias bibliográficas. En la Figura 4 se presentan los resultados obtenidos antes y después de los ajustes implementados.

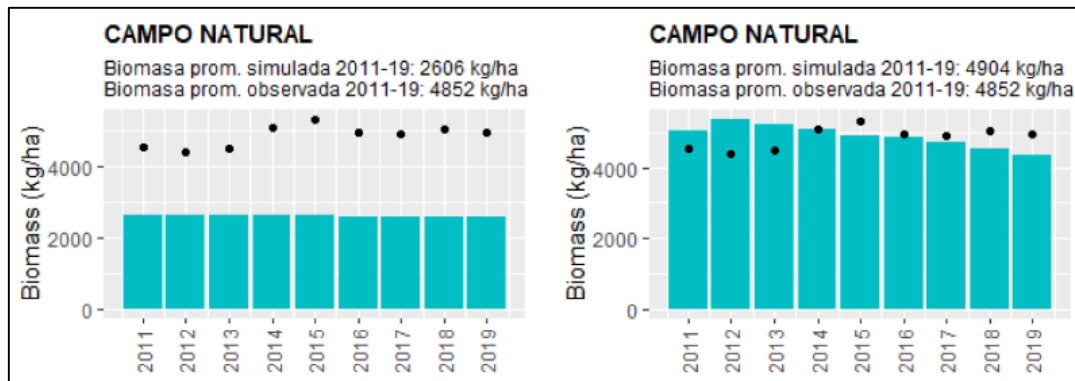
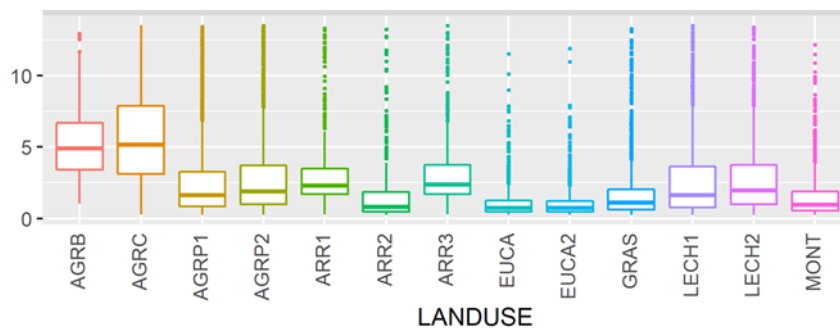


Figura 4: Resultados de los ajustes para campo natural (derecha, luego de ajustar parámetros).

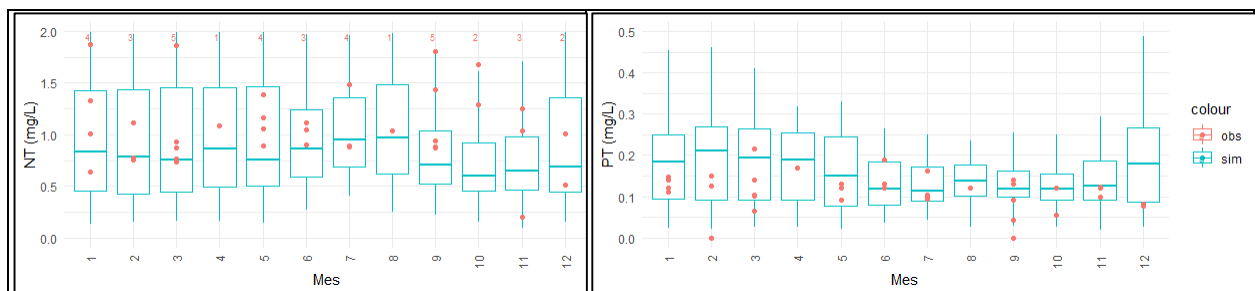


La pérdida de suelo promedio simulada para campo natural (2011-2019) es de 1,3 Mg/ha y los valores de referencia son 2,4 Mg/ha según EROSION 6.0 y 1,86 Mg/ha (con una desviación estándar de 1,49 Mg/ha) valores promedio para el Uruguay reportados por DGRN-MGAP. Por lo cual los valores simulados se considera que se encuentran en el rango de los estimados por los otros modelos. En la **Figura 5** se muestran gráficos boxplots con la exportación de sedimentos simulada según uso de suelo.



**Figura 5: Exportación de sedimentos simulada (Mg/año) según uso de suelo (2011-2021).**

De manera general y cualitativa se logró un buen ajuste para los parámetros SST, PT y NT, en la mayoría de las Estaciones los gráficos boxplots (mediana y rango inter-cuartil) de los valores simulados y observados son similares. Se observan algunas singularidades, en el caso de los SST se tiende a subestimar los valores simulados en las Estaciones del curso principal. De manera ilustrativa se muestran los resultados para NT y PT en la estación RN2 en la Figura 6.



**Figura 6: Resultados de ciclo anual promedio para NT (izquierda) y PT (derecha) simulado y datos observados (Estación RN2, período 2011-2021).**

Para las salidas de exportación a nivel de cuenca se puede trabajar de diferente manera el resultado obtenido. A continuación, se presenta en la Figura 7 un ejemplo de salida que muestra la exportación de PT por unidad de superficie que se obtiene como resultado de la modelación. Un análisis complementario que resulta de utilidad consiste en agrupar la salida de exportación según un uso específico de suelo y también visualizar la variabilidad anual o estacional de estos resultados.

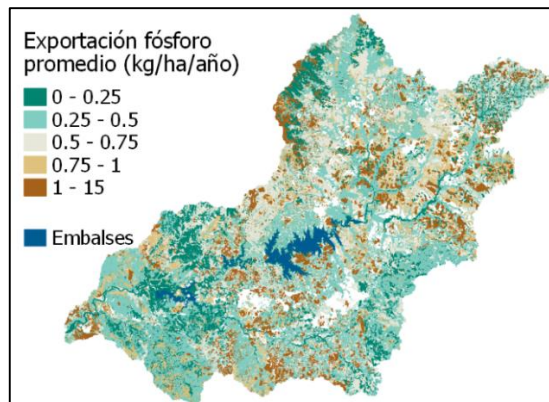


Figura 7: Exportación promedio de PT (kg/ha/año).

Una forma de resumir la calidad del agua en un período de tiempo es mediante curvas de permanencia. Estas curvas muestran cual es el valor del parámetro que ha sido igualado o excedido en un periodo de tiempo (expresado como frecuencia acumulada o permanencia). En la Figura 8 se presentan los resultados de nutrientes en el punto RN2 como ejemplo de salida.

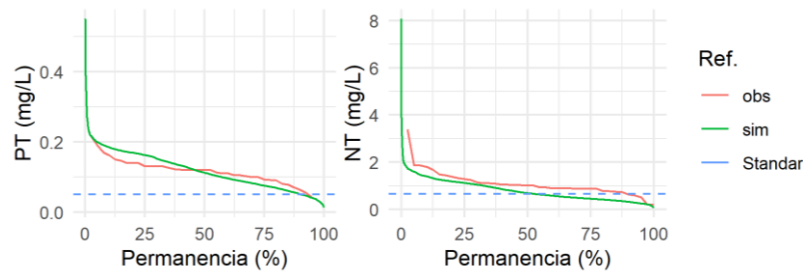


Figura 8: Curvas de permanencia para PT (izquierda) y NT (derecha) en RN2 (2011-2021).

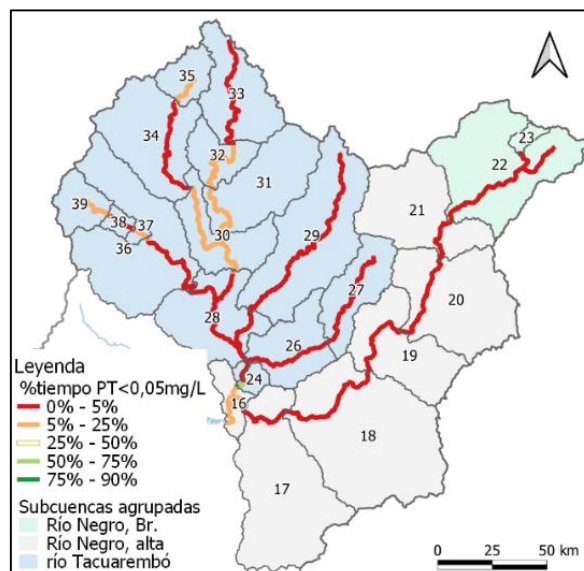


Figura 9: Porcentaje del tiempo que se cumple con estándar de PT por tramos.



## XI Congreso Nacional de AIDIS

Cambios, desafíos y soluciones:

El rol de la Ingeniería Ambiental en el desarrollo sostenible

25 al 27 de octubre de 2022

Cámara Mercantil de productos del país



Por último, a partir de los valores de referencia de los estándares de calidad se puede estimar que frecuencia del tiempo se cumplió con el estándar. En la Figura 9 se muestra un mapa elaborado a partir de las curvas de permanencia para la cuenca alta representando la concentración mediana de PT para cada tramo de curso de agua y el porcentaje del tiempo que se cumple con los estándares de calidad (Mesa Técnica del Agua, 2017).

## CONCLUSIONES

El abordaje implementado permitió obtener un modelo confiable en cuanto a los resultados obtenidos en cantidad y calidad de agua. Dentro de las salidas del modelo se destacan: cuantificación de la exportación de nutrientes desde la cuenca a los cursos de agua según uso del suelo; análisis de sensibilidad de algunos de los datos de entrada al modelo e identificación de datos faltantes que son de relevancia para la adecuada representación del sistema, curvas de permanencia de calidad de agua en diferentes sitios de la cuenca donde solo existe un monitoreo esporádico (cada tres meses).

Se logra implementar una herramienta con un fuerte potencial para asistir en la toma de decisión en la gestión de calidad de agua. En el caso de estudio se obtuvo un resultado de modelación de calidad de agua que ajusta de manera satisfactoria los principales parámetros de nutrientes analizados y esto se basa en un proceso de calibración y validación con buena performance para cantidad de agua y buenos resultados en la estrategia de “calibración blanda” en las otras componentes del modelo SWAT.

## REFERENCIAS

- Abbaspour, K.C. (2012) SWAT-CUP-2012. SWAT Calibration and Uncertainty program—A User Manual. Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Dübendorf.
- Arnold, J., Kiniry, J., Srinivasan, R., Williams, J., Haney, E., Neitsch, S., 2012. Water Assessment Tool, input / output documentation. Texas Water Resources Institute.
- Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (1996). Serie Técnica N°80: Producción y manejo de pasturas. ISBN: 9974-38-068-5.
- Mesa Técnica del Agua: Aubriot, L., Chalar, G., De León, L., Goyenola, G., Lizarralde, C., Míguez, B., Perdomo, C., Quintans, F., Rodó, E., Teixeira de Mello, F. (2017), Establecimiento de niveles guía de indicadores de estado trófico en cuerpos de agua superficiales, Informe técnico, Disponible en (accedido 25/07/2022): <https://www.ambiente.gub.uy/oan/documentos/DCA-MesaT%C3%A9cnicaAgua-MVOTMA-propuesta-NIVELES-GUIA-N-P-Clo-grupo-t%C3%A9cnico-FINAL-20,03,171.pdf>.
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., Veith, T. L., 2007. Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. Transactions of the ASABE 50, 885900. doi:10.13031/2013.23153.
- Nelson, Amanda & Moriasi, Daniel & Talebizadeh, Mansour & Steiner, Jean & Gowda, Prasanna & Starks, P. & Tadesse, Haile. (2018). Use of soft data for multicriteria calibration and validation of Agricultural Policy Environmental eXtender: Impact on model simulations. Journal of Soil and Water Conservation. 73. 10.2489/jswc.73.6.623.
- Williams, J. R. (1975) Sediment yield prediction with Universal Equation using runoff energy factor. In: Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yields and Sources, 244–252. ARS-S-40, Agricultural Research Service, US Department of Agriculture.