

MANUAL TÉCNICO DEL MODELO RREA: RESPUESTA RÁPIDA DEL ESTADO AMBIENTAL DE LAS MASAS DE AGUA SUPERFICIALES CONTINENTALES

Versión 3.0 Fecha enero 2021

Javier Paredes Arquiola

Grupo de Ingeniería de Recursos Hídricos

Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente

Universidad Politécnica de Valencia

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETO DEL PROGRAMA

El modelo RREA tiene como objetivo estimar el efecto de diferentes presiones ambientales sobre la calidad del agua de masas de agua superficiales continentales. Está pensado para su aplicación a escala de grandes sistemas de recursos hídricos en el ámbito de la planificación hidrológica. Su utilidad es muy variada permitiendo, por ejemplo: definir las condiciones fisicoquímicas en zonas masas no muestreadas, estimar la eficacia de las medidas de depuración o calcular la situación del sistema en diferentes escenarios (cambio climático, épocas de sequía, etc.)

Básicamente el programa estima concentraciones de contaminantes en las masas de agua superficiales teniendo en cuenta la carga contaminante que se genera en la cuenca vertiente de la masa, la contaminación que proviene de aguas arriba y la posible degradación que se produce en la propia masa de agua.

El programa ha sido desarrollado por el Grupo de Ingeniería de Recursos Hídricos (GIRH) de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV).

En el siguiente documento se explica los aspectos principales de la herramienta, datos necesarios, formulación, y archivos informáticos de entrada y salida para su uso.

2. CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DEL PROGRAMA Y DATOS NECESARIOS.

El modelo RREA permite estimar la evolución de la concentración de diferentes contaminantes que se puedan modelar con una cinética de primer orden en masas de agua superficiales continentales. Además del efecto de la presión de la contaminación el programa considera el posible efecto de detracciones de caudales.

Junto con la estimación de las concentraciones de los contaminantes el programa permite estimar el cumplimiento de caudales ecológicos en las masas de agua.

El programa ha sido desarrollado mediante Visual Net para aplicaciones para dar una mayor rapidez de ejecución.

En la siguiente figura se recoge un esquema con los datos esenciales y opcionales que conforman un modelo.

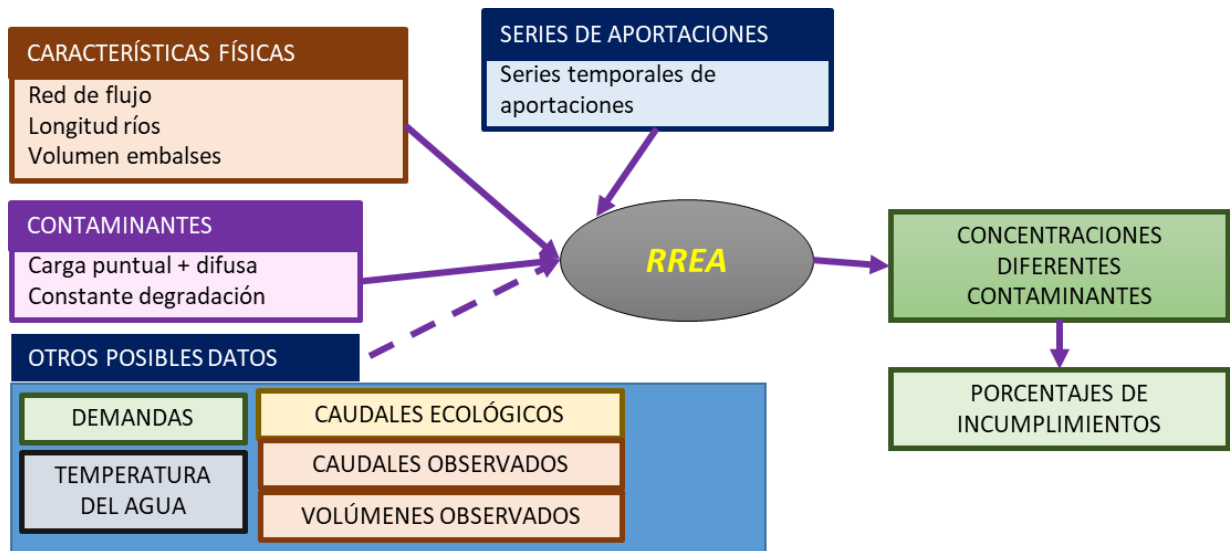


Figura 1. Esquema de datos de un modelo RREA.

A continuación, se explican los diferentes datos necesarios para el desarrollo de un modelo de estas características.

Los datos obligatorios son las características físicas, las aportaciones y los datos de los contaminantes. Como datos opcionales se pueden proporcionar datos de demanda de agua, temperatura de agua, caudales ecológicos, caudales y volúmenes observados.

2.1. Características físicas

Incluye la red de flujo de la cuenca, así como una característica física de la masa de agua.

Red de flujo: Para cada masa de agua es necesario definir un código que la identifique (nombre o similar), la masa de agua a la que vierte (si es salida del sistema 0), y el orden de flujo (las masas de cabecera serían orden 0, las de aguas abajo de estas serían de orden 1, etc.) Los lagos y embalses deben formar parte de la red de flujo.

Tipo de masa de agua: se admiten dos tipos. El tipo 1 corresponde a masas de agua de tipo río, el tipo 2 a masas de agua tipo embalse.

Características físicas de las masas de agua. Se refiere a la longitud (en km) de las masas de agua de tipo río o un volumen medio de almacenamiento (hm^3) del lago o embalse.

2.2. Series de aportaciones intercuenca en régimen natural

Como entrada indispensable al modelo es necesario definir una serie de aportaciones de caudales que se genera en la cuenca vertiente de cada masa de agua. La serie

temporal de caudales debe ser de un período común y completa (sin datos faltantes). Las aportaciones se definirán en unidades de hm^3/mes .

En general esta información se obtiene de algún modelo precipitación escorrentía de todo el sistema.

2.3. Información de los contaminantes

Una vez establecido los contaminantes que se quieren modelar es necesario proveer la siguiente información.

Cargas de contaminación por masa de agua. Para cada masa de agua, y contaminante modelado, se debe proporcionar la carga de contaminación recibida. La carga deberá ser introducida en unidades de kg/mes . Esta carga contaminante puede ser debida a vertidos puntuales y/o contaminación difusa, pero al modelo se proporciona de forma conjunta.

Constantes de degradación. Para cada masa de agua y cada contaminante modelado es necesario una constante de la velocidad de degradación del contaminante en esa masa de agua. Para todos los tipos de masas de agua las constantes de degradación se introducen en unidades de d^{-1} . Para el caso de los tramos de río el programa, internamente, cambia la constante de degradación a las unidades de Km^{-1} asumiendo una velocidad media del agua de $0.3\text{m}/\text{s}$. Las constantes de degradación suelen obtenerse por calibración y dentro de unos rangos bibliográficos según el proceso y contaminante que se esté modelando. Debido a que el modelo RREA está pensado para grandes escalas espaciales de trabajo los procedimientos tradicionales de calibración de los parámetros suelen tener que adaptarse a este condicionante.

2.4. Datos opcionales

Los siguientes datos no son necesarios para el desarrollo de un modelo básico, pero permiten mejorar la representatividad del modelo acercándonos a la realidad del sistema.

Demandas de agua. De forma opcional se puede incluir, para cada masa de agua una demanda que se extraerá del caudal circulante por la masa de agua. También se calcula la detracción de masa contaminante correspondiente. Las unidades de las demandas de agua son hm^3/mes .

El modelo admite dos opciones. En la primera se definen doce valores (uno para cada mes del año) de demanda. En la segunda se define un valor por cada mes simulado.

Si el valor es negativo se asume que es un retorno y representa una entrada de caudal. En este caso se asume que la concentración de entrada del caudal es similar a la del agua que proviene de aguas arriba.

Temperatura del agua. Para cada masa de agua se deben definir 12 valores mensuales de temperatura del agua. Este dato sirve para corregir la constante de degradación de cada contaminante según la temperatura del agua. Los datos deben introducirse en °C. En caso de que en alguna masa no se conozca este dato conviene poner 20°C todos los meses.

Caudales ecológicos. Por cada masa de agua y para cada mes del año se puede definir un caudal ecológico. EL programa permite estimar el cumplimiento del mismo cuando tras realizar los balances de caudal. Los caudales ecológicos deben ser introducidos en hm³/mes.

Caudales observados. El programa permite incorporar, para algunas masas de agua, series de caudales circulantes provenientes de registros históricos. Esto permite tener en cuenta que en algunas masas de agua los caudales circulantes reales son muy diferentes a los que se hubieran obtenido por régimen natural.

Volúmenes de embalse observados. Además, el modelo también permite incluir los registros temporales de volumen de los embalses que se quieran.

Importante: Para los datos de temperatura del agua y caudales ecológicos se debe proporcionar datos para todas las masas de agua y son 12 datos uno por cada mes del año. Para el dato de demandas se deben suministrar datos para todas las masas de agua, pero existe la opción de 12 valores o serie histórica. Finalmente, para los caudales y los volúmenes observados solo hace falta proporcionar datos para las masas de agua que se consideren y con una longitud de serie de dato similar a la de la simulación.

3. FORMULACIÓN GENERAL DEL MODELO

Una vez se ha creado un modelo de RREA al realizar una simulación el modelo parte de las siguientes hipótesis:

- Cada masa recibe el caudal que se genera en su subcuenca, así como el circulante de las masas de aguas arriba. Por otro lado, se pierde caudal debido a las demandas.
- Cada masa de agua recibe una carga contaminante debida a la contaminación que se produce en la cuenca propia, así como en las masas de agua arriba.
- La degradación de cada contaminante se rige por una cinética de primero orden.
- Las detracciones de caudal también eliminan masa contaminante.
- El cálculo se realiza para toda la serie temporal de aportaciones. Los cálculos de cada mes son independientes excepto para las masas de agua de tipo embalse en donde la concentración inicial es la obtenida del mes anterior.

A continuación, se explica la formulación que se utiliza en cada masa de agua. El programa comienza a calcular con las masas de cabecera (orden cero) y va avanzando el cálculo en función del orden de las masas.

En primer lugar, se calcula el caudal de agua que llega a la masa de agua que se están calculando. Para ello se tienen en cuenta la aportación de la cuenca propia y el caudal de las masas de agua que vierten a la masa. La primera ecuación indica la estimación del caudal que entra a una masa de agua para un mes determinado.

$$Q_{e,i} = Q_{gen,i} + \sum_{j=1}^n Q_{s,j}(j \rightarrow i) \quad (eq. 1)$$

Donde $Q_{e,i}$ representa el caudal de entrada a la masa i . $Q_{gen,i}$ es la aportación que se genera en la subcuenca de esa masa de agua superficial. Y el segundo sumando representa los caudales de salida de las masas de agua que vierten a la masa de agua i . Donde $Q_{s,j}(j \rightarrow i)$ significa caudales de salida de las masas de agua que vierten a la masa i .

El caudal de salida de la masa de agua se estima con la siguiente ecuación:

$$Q_{s,i} = Q_{e,i} - Q_{detr,i} \quad (eq.2)$$

Donde $Q_{s,i}$ es el caudal de salida de la masa " i "; $Q_{e,i}$ es el caudal de entrada de la masa i y $Q_{detr,i}$ es el caudal detruido en la masa i por demandas en ese tramo.

Para estimar la cantidad de contaminante que entra en una masa de agua se utiliza un procedimiento similar que se resume en la siguiente ecuación:

$$M_{e,i} = M_{gen,i} + \sum_{j=1}^n M_{s,j}(j \rightarrow i) \quad (eq. 3)$$

Donde $M_{e,i}$ es la cantidad de masa que entra a la masa de agua i ; $M_{gen,i}$ es la masa de contaminante que se genera en la cuenca de la masa i . El segundo término se corresponde con la masa de contaminante que sale de las masa de agua que vierten en la masa i . $M_{s,j(j \rightarrow i)}$ significa la masa de contaminante de salida de todas las masa j que vierten a la masa i .

Antes de calcular la degradación en la masa de agua se extrae la masa de contaminante que se lleva el caudal detrído por la demanda.

$$M_{e,i} = M_{e,i} \cdot \left(1 - \frac{Q_{detr,i}}{Q_{e,i}}\right) \quad (eq. 4)$$

Nota: si el caudal de detracción es superior a la inicial se considera como caudal de salida cero y la masa de contaminante que se traslada hacia aguas abajo nula.

Cálculo de degradación del contaminante.

Para **masas de agua de tipo río**, una vez se tiene estimada la masa de contaminante que entra en una masa de agua, la “masa de salida” se obtiene con la siguiente ecuación.

$$M_{s,i} = M_{e,i} \cdot e^{-KL} \quad (eq. 5)$$

Donde $M_{s,i}$ es la masa de contaminante que sale de la masa de agua i ; $M_{e,i}$ es la masa de contaminante que entra en la masa de agua i ; K es la constante de degradación del contaminante en la masa i (en unidades de km^{-1} asumiendo una velocidad del agua de 0,3 m/s); L es la longitud de la masa de agua (km).

Finalmente, el resultado de concentración del contaminante en la masa de agua i se obtiene como:

$$C_i = \frac{M_{s,i}}{Q_{s,i}} \quad (eq. 6)$$

Donde C_i es la concentración del contaminante en la masa de agua i .

En caso de que la **masa modelada sea de tipo embalse**, el modelo empleará la siguiente formulación. En primer lugar, se asume que el embalse mantiene un volumen constante fijado en los datos de iniciales. Este volumen se puede hacer variable de forma mensual utilizando la opción de volumen de embalse observado. En todo caso dentro del mes se considera que el volumen es constante.

Una vez estimada la masa de contaminante de entrada al embalse se calcula la concentración a final de mes con la siguiente ecuación.

$$C_{s,i} = C_{o,i} * e^{-\alpha t} + \frac{M_{e,i}}{V\alpha} (1 - e^{-\alpha t}) \quad (eq.7)$$

Donde, $C_{s,i}$ es la concentración del contaminante i al final de mes, $M_{e,i}$ la masa de entrada calculada previamente, V es el volumen del embalse, $C_{o,i}$ es la concentración del embalse a inicio de mes y α se calcula como:

$$\alpha = \frac{Q_{e,i}}{V_i} + K \quad (eq.8)$$

Donde $Q_{e,i}$ es el caudal de entrada al embalse, V_i es el volumen del embalse y K es la constante de degradación del contaminante modelado. Nota: la constante de degradación en el modelo se introduce en d^{-1} e internamente en el modelo, para el caso de embalses se cambia a mes^{-1} .

El valor de $C_{o,i}$ se obtiene del cálculo del mes anterior. Para el primer mes de la simulación se asume igual que la concentración de entrada al embalse.

Una vez calculada la concentración a final de mes del embalse la cantidad de masa de contaminante que circula aguas abajo se calcula como:

$$M_{s,i} = C_{s,i} * Q_{s,i} \quad (eq. 9)$$

Donde $C_{s,i}$ es la concentración del contaminante en el embalse a final de mes y $Q_{s,i}$ es el caudal de salida del embalse i . El caudal de salida se obtiene como diferencia del caudal de entrada y la demanda asociada.

4. ESTRUCTURA INFORMÁTICA DE ARCHIVOS.

En este apartado se describen los archivos de entrada y salida del modelo.

Archivo **“Ent_Control.csv”**. Contiene la información básica sobre la simulación del modelo. Es un archivo separado por “;” con la siguiente información:

- 1^{er} registro está compuesto por la etiqueta “Num_masas” seguido por un número entero que indica el número de masas del modelo.
- 2^o registro está compuesto por la etiqueta “Num_meses” seguido por un número entero que indica el número de meses de simulación.
- 3^{er} registro está compuesto por la etiqueta “Max_Orden” y a continuación un número entero que indica cual es el orden máximo de la red de flujo.
- 4^o registro: formado por la etiqueta “Num_Cont” seguida por un número entero indicador del número de contaminantes a modelar
- 5^o registro: formado por la etiqueta “Op_Demandas” seguida por un número 0 ó 1 indicado si se considera la opción de demandas o no.
- 6^o registro: formado por la etiqueta “Op_Qeco” seguida por un número 0 ó 1 indicado si se considera la opción de caudal ecológico o no.
- 7^o registro: formado por la etiqueta “Op_Temp” seguida por un número 0 ó 1 indicado si se considera la opción de temperatura del agua o no.
- 8^o registro: formado por la etiqueta “Op_Qobs” seguida por un número 0 ó 1 indicado si se considera la opción de caudal observado o no.
- 9^o registro: formado por la etiqueta “Op_Vobs” seguida por un número 0 ó 1 indicado si se considera la opción de volumen observado o no.

Archivo **“Ent_Contaminantes.csv”**. Archivo de texto separado por “;” en donde se tienen los siguientes registros (filas):

- 1^{er} registro está compuesto por la etiqueta “nombre” seguido de los diferentes nombres de los contaminantes a modelar.
- 2^o registro formado por la etiqueta “nombre archivos” seguida de los diferentes nombres de archivos de resultados de los contaminantes a modelar.
- 3^{er} registro está compuesto por la etiqueta “Temperatura” seguido de las diferentes constantes de corrección de temperatura de las diferentes cinéticas de degradación.
- 4^o registro: formado por la etiqueta “Umbrales” seguida por los valores por encima de los cuales se considera que la concentración incumple para cada uno de los contaminantes modelados.
- 5^o registro: compuesto por la etiqueta “Natural” seguida por los valores de concentración que se consideran aguas naturales para cada uno de los contaminantes modelados.

Archivo **“Ent_Masas.csv”** contiene la información básica sobre las masas de agua para su modelación. Se trata de un archivo de texto de tipo csv, separado por “;” en donde se almacena la siguiente información por columnas:

- Columna 1: Código de la masa de agua
- Columna 2: Masa de agua a la que vierte
- Columna 3: Orden de flujo de la masa de agua
- Columna 4: Longitud (Km) o volumen de embalse (hm^3) dependiendo del tipo de masa de agua
- Columnas 5 a 5+n (donde n es el número de contaminantes: Carga de los contaminantes para la masa de agua (en Kg/mes).
- Columna 5+n a 5+2n: constante de degradación de los contaminantes (en d^{-1}).

Cada fila representa una masa de agua y la primera fila tiene encabezados de las etiquetas de cada columna.

Archivo “**Ent_Aporta.csv**” contiene las series de aportaciones de las masas de agua del modelo. Se trata de un archivo de texto de tipo csv, separado por “;” en donde se almacena la siguiente información por columnas. El archivo tiene m+1 columnas siendo m el número de masas de agua.

- La primera fila contiene una etiqueta con la palabra Fecha y el resto de las columnas son el código de las diferentes masas de agua.
- Las 12 filas siguientes contienen una primera columna con la fecha de la serie temporal a simular y las siguientes m columnas contienen el valor de la aportación de la subcuenca de cada masa de agua (en Hm^3/mes) para la fecha del registro.

Los siguientes archivos son **solo necesarios si** en el archivo de control (Ent_control.csv) **se han indicado** que se van a utilizar las **opciones de demandas, caudal ecológico, temperatura del agua, caudales y volúmenes observados.**

Archivo “**Ent_Demandas.csv**” contiene la información básica sobre la demanda de agua de cada masa de agua. Se trata de un archivo de texto de tipo csv, separado por “;” en donde se almacena la siguiente información por columnas. El archivo tiene m+1 columnas siendo m el número de masas de agua.

- La primera fila contiene una etiqueta con la palabra mes y el resto de columnas son el código de las diferentes masas de agua.
- Las 12 filas siguientes contienen una primera columna con el mes del año (empezando en 10 y acabando en 9) y las siguientes m columnas contienen el valor de la demanda de agua para cada masa de agua y cada mes del año.

Archivo “**Ent_Qeco.csv**” contiene la información básica sobre los caudales ecológicos en cada masa de agua. Se trata de un archivo de texto de tipo csv, separado por “;” en donde se almacena la siguiente información por columnas. El archivo tiene m+1 columnas siendo m el número de masas de agua.

- La primera fila contiene una etiqueta con la palabra mes y el resto de columnas son el código de las diferentes masas de agua.
- Las 12 filas siguientes contienen una primera columna con el mes del año (empezando en 10 y acabando en 9) y las siguientes m columnas contienen el valor del caudal ecológico para cada masa de agua y cada mes del año.

Archivo “**Ent_Temp.csv**” contiene la información básica sobre la temperatura del agua de cada masa de agua. Se trata de un archivo de texto de tipo csv, separado por “;” en donde se almacena la siguiente información por columnas. El archivo tiene m+1 columnas siendo m el número de masas de agua.

- La primera fila contiene una etiqueta con la palabra mes y el resto de columnas son el código de las diferentes masas de agua.
- Las 12 filas siguientes contienen una primera columna con el mes del año (empezando en 10 y acabando en 9) y las siguientes m columnas contienen el valor de la temperatura del agua para cada masa de agua y cada mes del año.

Archivo “**Ent_Qobs.csv**” contiene las series de caudales observados de algunas de las masas modeladas. Se trata de un archivo de texto de tipo csv, separado por “;” en donde se almacena la siguiente información por columnas. El archivo tiene m+1 columnas siendo m el número de masas de agua con información sobre caudales observados.

- La primera fila contiene una etiqueta con la palabra Fecha y el resto de columnas son el código de las diferentes masas de agua.
- Respecto a las siguientes filas, la primera columna contiene las fechas de los registros a simular y las siguientes m columnas contienen el valor del caudal de salida de las masas (en Hm^3/mes) para la fecha del registro.

Archivo “**Ent_Vobs.csv**” contiene las series de volúmenes observados de algunas de los embalses modeladas. Se trata de un archivo de texto de tipo csv, separado por “;” en donde se almacena la siguiente información por columnas. El archivo tiene m+1 columnas siendo m el número de masas de agua con información sobre volúmenes observados.

- La primera fila contiene una etiqueta con la palabra Fecha y el resto de columnas son el código de las diferentes masas de agua.
- Respecto a las siguientes filas, la primera columna contiene las fechas de los registros a simular y las siguientes m columnas contienen el valor de volumen mensual registrado (en Hm^3/mes) para la fecha del registro.

Importante: *La información contenida en los diferentes archivos debe seguir el mismo orden que el definido en el archivo de masas de agua. Por ejemplo, las columnas de las series de aportaciones deben seguir el mismo orden que las filas de archivo Ent_masas.csv.*

Los **archivos de resultados** del modelo son:

El archivo **Sal_rrea.err** recoge un registro de las simulaciones realizadas y de posibles errores.

Las series temporales de caudales circulantes en cada masa de agua se recogen en el archivo **Sal_Caudales.csv**

El programa crea **un archivo de resultados para cada uno de los contaminantes modelados**. Las unidades de salida son mg/l. Los nombres de los archivos se definen en el archivo Ent_Contaminantes.csv.

Además, el archivo **Sal_Def_Eco.csv** contiene los déficits de caudal ecológico de cada masa de agua.

Finalmente, en el archivo **Sal_Porc_Fallos.csv** recoge una matriz con tantas filas como masas de agua y columnas como contaminantes. Para cada masa y contaminante el programa escribe el porcentaje de meses en que la concentración ha sido superior al umbral establecido en el archivo de contaminantes. Una columna adicional nos indica el porcentaje de meses en que esa masa ha tenido un caudal nulo.