

**ANEJO 2. ADAPTACIÓN DEL  
MODELO DE SIMULACIÓN DE LA  
CALIDAD GESCAL A UN ENFOQUE  
ESTOCÁSTICO DE LA MODELACIÓN  
(ACTIVIDADES 2-1, 2-2 Y 2-3)**

# Introducción

El programa GESCAL permite el desarrollo de modelos de la simulación de la calidad del agua de masas de agua y a escala de cuenca. Desde su desarrollo, ha sido muy aplicado a nivel nacional en diferentes cuencas españolas debido a la necesidad que existía de una herramienta de este tipo. De esta amplia aplicación ha surgido la importancia de considerar las incertidumbres y los riesgos en su aplicación. Esto viene motivado fundamentalmente por la variabilidad de sus datos, sobre todo en la carga y volumen de vertidos, así como por la incertidumbre hidrológica. Para abordar este problema se plantea el desarrollo de una ampliación del módulo que permita aplicar la técnica de Monte Carlo en la simulación de modelos de calidad.

El objetivo principal de esta parte del proyecto INTEGRAME es desarrollar una herramienta que, asignando las distribuciones a las diferentes fuentes de datos, permita la simulación múltiple de un modelo previamente realizado y posteriormente interpretar los resultados para obtener probabilidades de concentración en diferentes puntos del sistema modelado.

Para todo ello, se tiene que analizar un caso de aplicación, analizar la variabilidad de los datos, desarrollar una herramienta que permita la generación de números aleatorios con diferentes distribuciones de probabilidad y la simulación múltiple del modelo GESCAL. Además, la herramienta deberá ser completada con un postprocesador que recoja los resultados de las múltiples simulaciones y haga un tratamiento estadístico de los mismos, dando así como resultado final unas probabilidades del suceso.

Los sub objetivos planteados en este apartado son:

1. Análisis de un tramo de río piloto con problemas de calidad del agua: Caso del río Manzanares.
2. Análisis y caracterización estadística de las variables de entrada al modelo: vertidos, cargas de contaminación y caudales.
3. Desarrollo de la herramienta de simulación múltiple de GESCAL mediante técnicas de Monte-Carlo.
4. Aplicación de la herramienta al caso real: caso del río Manzanares.

En este anejo se presentan las tareas con las que, en el segundo año de proyecto, se inició el camino para la consecución de este objetivo. Las tareas llevadas a cabo hasta la presente justificación abarcan la mayor parte de los tres primeros sub objetivos y se deja para el último año de proyecto el refinamiento de los mismos así como la aplicación práctica del módulo desarrollado.

# Actividad 2.1. Análisis de un tramo de río piloto con problemas de calidad del agua: Caso del río Manzanares

## Descripción de la cuenca del río Manzanares

El Manzanares es un río situado en la zona centro de la Península Ibérica, afluente del Jarama, que a su vez es afluente del Tajo. El Manzanares nace en la sierra de Guadarrama y pasa por la ciudad de Madrid, zona por la cual el cauce se encuentra canalizado. Desemboca en el río Jarama en el término municipal de Rivas-Vaciamadrid, en el embalse del Rey. Su longitud total desde el nacimiento hasta la desembocadura es de 92 km.

Desde su nacimiento baja como curso bravo de montaña, de aguas limpias y torrenciales, hasta Manzanares el Real, donde se remansa debido al embalse de Santillana.

El río Manzanares forma parte de la vertiente meridional del Sistema Central, por lo que mantiene una abundante escorrentía superficial en su sector más elevado, que canaliza a través de una red de arroyos que forman su cabecera. Las variaciones de caudal que sufre el río a lo largo del año revelan que los aumentos y disminuciones del volumen de agua que discurre por el lecho no son muy importantes ni frecuentes comparado con otros ríos de la península, lo que en parte es debido a la regulación introducida por las dos presas hidráulicas realizadas en este río: embalse de Santillana y embalse de El Pardo.

El embalse de Santillana se trata de un embalse cuyo uso es de abastecimiento, siendo una de las fuentes de agua potable más importantes de la Comunidad de Madrid.

El embalse de El Pardo se encuentra localizado dentro de la Zona de Especial Protección para las Aves (ZEPA) conocida como "Monte de El Pardo", de acuerdo con el Catálogo de Embalses y Zonas Húmedas de octubre de 1991, y revisado en septiembre de 2004. La ZEPA *Monte El Pardo* se encuentra incluida en el Lugar de Importancia Comunitaria (LIC) de la cuenca del río Manzanares, y posee valor faunístico y paisajístico. El uso del embalse de El Pardo es doble: riego y cumplir el caudal ecológico del río.

La cuenca del río Manzanares se puede dividir en dos grandes partes: la cuenca de cabecera (apenas modificada antrópicamente) y la cuenca media-baja (esta zona es la que mayores presiones antropogénicas sufre de toda la Demarcación del Tajo). Esta última parte es la que centrará nuestro estudio, puesto que será una zona sobre la que tendrán que imponerse importantes medidas correctoras. Esto es:

- **Cuenca de cabecera:** Río Manzanares desde su nacimiento hasta el embalse de El Pardo, incluyendo el río Navacerrada. En esta zona la calidad del río no se encuentra muy alterada debido a que las presiones antropogénicas no son muy importantes.
- **Cuenca media-baja:** Río Manzanares desde el embalse de El Pardo hasta su confluencia con el río Jarama, aguas arriba de la presa del Rey. En esta zona el río recibe el vertido de seis grandes estaciones depuradoras procedentes de la ciudad de

Madrid produciendo una merma importante en la calidad del agua. Además sufre los vertidos de otras dos estaciones depuradoras vertientes en el arroyo Culebro.

La cuenca baja del río Manzanares se emplea como desagüe, donde se vierten gran parte de los caudales depurados tras el uso de la población de la zona. El río atraviesa la ciudad de Madrid, y junto a su cauce existen seis plantas de tratamiento de aguas residuales y pluviales, que llegan a las estaciones depuradoras a través de la red de colectores de la ciudad. Estas Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (EDAR) que vierten directamente sobre el río Manzanares son:

- Viveros de la Villa
- La China
- La Gavia
- Butarque
- Sur
- Sur Oriental

El arroyo Culebro, situado en la cuenca baja del Manzanares, confluye con el Manzanares entre las estaciones depuradoras Sur y Sur Oriental, en Getafe. En este arroyo se encuentran las estaciones depuradoras de:

- Arroyo Culebro cuenca media-alta.
- Arroyo Culebro cuenca baja.

Hay que destacar que esta última estación se puso en funcionamiento en noviembre de 2008, periodo no incluido en nuestro modelo, por lo que no será modelada.

El caudal que el arroyo Culebro aporta al Manzanares se debe, en su mayoría, al caudal vertido por las estaciones depuradoras situadas junto al arroyo.

## **Situación actual del río**

### **Datos disponibles y fuentes de información**

Para el análisis de la situación actual del río, y el posterior desarrollo de un modelo mecanicista es necesario disponer de una serie de datos. Entre otros datos, para la realización del análisis de la calidad actual del río, así como para la realización del modelo se ha empleado la siguiente información:

- Sistemas de Información Georreferenciada (SIG)
- Estaciones de aforo (EA)
- Sistemas Automáticos de Información Hidrológica (SAIH)

- Red Integral de Calidad de las Aguas (red ICA)
- Red de Sistemas Automáticos de Información de Calidad del Agua (red SAICA)
- Datos de vertidos de las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (EDAR)

Estos datos provienen principalmente de tres fuentes distintas de información: la Comisaría de Aguas de la Confederación Hidrográfica del Tajo (CHT), de la información disponible en la página web de la Confederación Hidrográfica del Tajo ([www.chtajo.es](http://www.chtajo.es)) y de página web del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX).

A continuación se detalla la información disponible y la fuente de la información de cada uno de los distintos tipos de datos citados anteriormente.

### *Sistemas de Información Georreferenciada (SIG)*

Se dispone tanto de información general de la cuenca del Tajo, así como de información detallada perteneciente únicamente al río Manzanares. A través de esta información se puede localizar geográficamente cada uno de los puntos singulares de la cuenca del Manzanares. Los siguientes datos de información georreferenciada han sido obtenidos de la página web de la Confederación Hidrográfica del Tajo (CHT). La información disponible es:

- Estaciones de Aforo (EA)
- Sistemas Automáticos de Información Hidrológica (SAIH)
- Red Íntegra de Calidad de las Aguas (red ICA)
- Red de Sistemas Automáticos de Información de Calidad de las Aguas (SAICA)
- Masas de agua
- Provincias y Municipios
- Áreas Hidrográficas

Además de esta información, la Comisaría de Aguas de la CHT proporcionó la siguiente información auxiliar para el tramo final del río Manzanares:

- Cauce
- Canales
- Puentes
- Caudal del Dominio Público Hidráulico
- Curvas de nivel cada 1 y 5 metros
- Caudal máximo de avenida de 100 y 500 años

Gran parte de esta información junto con su localización, se incluye en la Figura 2.

### *Estaciones de Aforo (EA)*

Las estaciones de aforo son instalaciones empleadas para medir los caudales circulantes por ciertos puntos del río.

En el tramo de estudio se disponen de tres estaciones de aforo actualmente en funcionamiento. Estas estaciones de aforo son: Mingorrubio, Parque Sindical y Rivas-Vaciamadrid. En la información GIS aparecen un mayor número de estaciones de aforo, pero éstas no se encuentran actualmente en funcionamiento. Además de las EA se dispone del aforo realizado de las sueltas del embalse de El Pardo, donde se mide el caudal saliente por el mismo.

Los datos disponibles tanto de las EA como de las salidas del embalse, proceden de la página web de la CHT para los valores del periodo 2001-2006. Estos valores están medidos en  $\text{hm}^3/\text{mes}$ . El resto de datos de aforo de caudales (años 2007-2008), tanto de las EA como de las salidas del embalse, han sido proporcionados por la Comisaría de Aguas de la CHT, cuyas unidades de medida del caudal son  $\text{m}^3/\text{s}$ . La disponibilidad de datos de las estaciones de aforo es de un valor al mes.

La localización espacial de las EA se puede observar en la Figura 2 del final del punto 3.1. A continuación se muestra una tabla con las distintas estaciones de aforo en activo, sus coordenadas y el periodo de funcionamiento. Además se incluye la información correspondiente a las salidas del embalse El Pardo.

<b>Número</b>	<b>X UTM</b>	<b>Y UTM</b>	<b>Nombre</b>	<b>Año de inicio</b>	<b>Cota (m)</b>	<b>Cauce</b>
263	433.299	4.488.075	Salidas El Pardo	1973	Máx. Nivel: 629	Río Manzanares
243	433.108	4.487.210	Mingorrubio	1985	605	Río Manzanares
070	436.715	4.479.240	Parque Sindical (Madrid)	1912	588	Río Manzanares
177	452.966	4.464.022	Rivas- Vaciamadrid	1929	535	Río Manzanares

**Tabla 1. Salidas del embalse y estaciones de aforo en funcionamiento.**

Estos datos se han obtenido de la página web del CEDEX (<http://hercules.cedex.es>).

### *Sistema Automático de Información Hidrológica (SAIH)*

El Sistema Automático de Información Hidrológica (SAIH) es capaz de captar, transmitir, procesar y presentar información del estado hidrológico e hidráulico de la cuenca, incluyendo el conocimiento puntual del funcionamiento de los dispositivos y obras de control que en ella se ubican.

Estos sistemas de información proporcionan volúmenes de caudal en m<sup>3</sup> que circulan por el cauce cada segundo. Los datos analizados de caudales son los promedios: horario, diario y mensual, medidos en dichas unidades.

En cuanto a este tipo de información, se poseen datos de caudales cada quince minutos, desde el día 1 de octubre de 2006 hasta el 31 de enero de 2009. Se dispone de dos estaciones SAIH: una localizada en la salida del embalse de El Pardo y la otra situada en Rivas.

La información procedente del SAIH ha sido proporcionada por el Área de Explotación de la Dirección Técnica de la Confederación Hidrográfica del Tajo, con las fechas señaladas anteriormente.

De la página web del SAIH de la CHT se obtiene la siguiente información (<http://saihtajo.chtajo.es>) de las estaciones.

Código	X UTM	Y UTM	Nombre	Cota (m)	Cauce
E_21	433.268	4.488.018	Salidas El Pardo	632	Río Manzanares
AR_18	452.950	4.464.075	Rivas-Vaciamadrid	553	Río Manzanares

**Tabla 2. Datos SAIH disponibles.**

De la misma manera que en los casos anteriores, su localización se puede observar en la Figura 2 del punto 3.1.7. de la memoria.

### *Red Íntegra de Calidad de las Aguas (red ICA)*

La red de Calidad de las Aguas, realiza un control sistemático de la calidad físico-química y microbiológica de las aguas superficiales mediante muestreos de frecuencia mensual. Esta red lleva a cabo un seguimiento específico de diferentes factores que sirven para conocer la calidad de las aguas.

En cuanto al inventario de las estaciones de la red ICA en la cuenca baja del río Manzanares encontramos, en la actualidad, 6 estaciones. De estas estaciones, 5 están situadas en el cauce del río Manzanares y la otra estación está situada en el arroyo Culebro, afluente del río Manzanares.

Las estaciones localizadas en el cauce del Manzanares, ordenadas de aguas arriba hacia aguas abajo, son: El Pardo, Parque Sindical, San Fermín, Villaverde y Rivas-Vaciamadrid. La estación de la red ICA situada en el arroyo Culebro es la estación de Getafe. De esta última estación es importante citar que, tras la construcción de la estación depuradora de Culebro bajo, cambió su posición en el arroyo Culebro. Pasó de aguas arriba de la nueva depuradora de la cuenca baja de Culebro a aguas abajo de la misma. Sin embargo, este cambio de localización no afecta a nuestro análisis, pues el periodo analizado es anterior a dicha modificación.

De estas estaciones de la red ICA se tiene información de las siguientes concentraciones de contaminantes:

- Amonio ( $\text{mgNH}_4^+/\text{l}$ )
- Conductividad a 25°C ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )
- DBO<sub>5</sub> ( $\text{mgO}_2/\text{l}$ )
- DQO ( $\text{mgO}_2/\text{l}$ )
- Fósforo total ( $\text{mgP}/\text{l}$ )
- Fosfatos ( $\text{mgPO}_4^-/\text{l}$ )
- Nitrógeno Kjeldhal ( $\text{mgN}/\text{l}$ )
- Nitrógeno total ( $\text{mgN}/\text{l}$ )
- Nitratos ( $\text{mgNO}_3^-/\text{l}$ )
- Nitritos ( $\text{mgNO}_2^-/\text{l}$ )
- pH (ud. pH)
- Sólidos suspendidos ( $\text{mg}/\text{l}$ )
- Temperatura ambiente y del agua (°C)
- Oxígeno disuelto ( $\text{mg}/\text{l}$ )

El periodo de datos disponibles de la red ICA es desde octubre de 1999 hasta diciembre de 2008. Estos datos han sido proporcionados por la Comisaría de Aguas de la CHT. También, se ha obtenido información auxiliar de las estaciones de la red ICA de la página web de la CHT ([www.chtajo.es](http://www.chtajo.es)).

Además de esta información, la Comisaría de Aguas ha proporcionado una aplicación “ICA-TAJO” en la que se puede consultar la concentración de cualquier contaminante medido en la red ICA en la estación y periodo deseados.

En la siguiente tabla se recogen las estaciones utilizadas para el diagnóstico de la calidad, además se adjunta las coordenadas UTM de su localización y el cauce en el que están situadas, obtenidas de la página web de la CHT ([www.chtajo.com](http://www.chtajo.com)).

Número	Cód. ICA	X UTM	Y UTM	Nombre	Municipio	Cauce
63	TA 53405001	433.060	4.487.19 8	El Pardo Manzanares	MADRID	Río Manzana



						res
64	TA 55905001	436.721	4.479.22 9	Parque Sindical Manzanares	MADRID	Río Manzana res
65	TA 55905002	441.605	4.470.45 1	San Fermín Manzanares	MADRID	Río Manzana res
66	TA 55905003	442.233	4.468.19 0	Villaverde Manzanares	MADRID	Río Manzana res
67	TA 58205003	455.431	4.463.73 8	Rivas- Vaciamadrid Manzanares	RIVAS- VACIAMADRI D	Río Manzana res
69	TA 53405001	447.616	4.460.78 8	Getafe Culebro (antigua)	GETAFE	Arroyo Culebro

**Tabla 3. Estaciones ICA utilizadas para la obtención de perfiles medios de calidad.**

### *Red de Sistemas Automáticos de Información de la Calidad de las Aguas (red SAICA)*

Los Sistemas Automáticos de Información de Calidad de las Aguas constituyen el complemento de las redes de muestreo periódico (red ICA) al proporcionar un control continuo y sistemático de los niveles de calidad en las aguas. Además, participan en el control y vigilancia de los vertidos más significativos, tanto industriales como urbanos. Se produce un barrido automático de información de las estaciones cada 15 minutos. La información se recoge en el panel de control video-wall, y existen pantallas de gestión de alarmas, en caso que se detectase algún problema.

En el caso de la cuenca baja del río Manzanares existe una única estación de la red SAICA, localizada en Rivas, en la parte final del tramo, tras el vertido de todas las estaciones depuradoras y antes de alcanzar el embalse del Rey. Es la última estación del tramo y posteriormente no se produce vertido controlado alguno, por lo que se consideran los valores medidos como los valores de calidad al final del tramo.

De esta estación se extrae la siguiente información:

Número	X UTM	Y UTM	Nombre	Municipio	Cauce
306	455.865	4.464.359	Rivas	MADRID	Río Manzanares

**Tabla 4. Estación SAICA empleada para caracterizar la calidad de río Manzanares.**

La red SAICA, como se ha citado anteriormente, proporciona una información continua cada 15 minutos. Para la estación de Rivas se dispone de datos desde el 1 de enero de 2007 hasta el 31 de diciembre de 2008. Los datos medidos en la estación son:

- Temperatura del agua (°C)
- Conductividad ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )
- pH
- Oxígeno disuelto ( $\text{mgO}_2/\text{l}$ )
- Amonio ( $\text{mgNH}_4^-/\text{l}$ )
- Turbidez
- Nivel del agua (cm)

A partir del nivel del agua se calcula el caudal circulante, aunque éste es poco fiable, y puesto que disponemos de la información de la estación de aforo y del SAIH, no tendremos en cuenta esta medida.

Mediante los datos cada quince minutos de las concentraciones se ha obtenido un valor promedio diario. Estos datos diarios serán empleados en nuestro análisis diario. Para el análisis mensual se ha realizado el promedio del mes. También se dispone de los valores mensuales de la red ICA.

Los datos procedentes de la red SAICA han sido proporcionados por la Comisaría de Aguas de la CHT.

### *Datos de las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (EDAR)*

Una Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR), es una planta que recoge el agua residual de una población y/o de una industria, y de la escorrentía de la lluvia a través de unos colectores y, después de una serie de tratamientos y procesos, la devuelve a un cauce receptor (río, embalse, mar...).

Las aguas residuales urbanas son aquellas generadas por diferentes actividades humanas se pueden clasificar por su origen en: aguas negras, aguas grises (proceden de agua de la bañera, lavabo...) y aguas blancas o pluviales. Se denomina agua industrial a aquellas que derivan de cualquier actividad industrial y/o comercial no relacionada directamente con los usos sanitarios. Para nuestro estudio, trataremos únicamente aguas urbanas.

En nuestro tramo de estudio existen actualmente 8 grandes estaciones depuradoras. Del total de las estaciones, 6 de ellas vierten el agua tratada directamente sobre el cauce del río Manzanares. Estas EDAR son, ordenadas desde aguas arriba a aguas abajo: Viveros, La China, La Gavia, Butarque, Sur y Sur Oriental. Las otras dos grandes estaciones depuradoras vierten el agua sobre el arroyo Culebro, afluente del río Manzanares. Estas depuradoras son las situadas en la cuenca media-alta y cuenca baja de Culebro. Esta última EDAR, como se ha indicado

anteriormente, fue puesta en funcionamiento en un periodo posterior al periodo de estudio, por lo que no se ha tenido en cuenta en el modelo.

La fecha de construcción de cada estación es distinta, por lo que en cada EDAR la cantidad de datos disponibles no es la misma. A continuación se muestra un cuadro que recoge los principales vertidos urbanos incluidos en el estudio, incluyendo características de los mismos.

<i>Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR)</i>	<i>Año de autorización</i>	<i>Cauce receptor</i>	<i>Volumen máximo de vertido (m<sup>3</sup>/año)</i>
Viveros	1983	Río Manzanares	69.379.200
La China	1983	Río Manzanares	117.477.075
La Gavia	2003	Río Manzanares	63.072.000
Butarque	1983	Río Manzanares	111.887.465
Sur	1985	Río Manzanares	204.796.390
Sur Oriental	1985	Río Manzanares	25.228.800
Culebro Cuenca Alta	2005	Arroyo Culebro	47.304.000
Culebro Cuenca Baja	2007	Arroyo Culebro	63.072.000

**Tabla 5. Principales vertidos urbanos considerados en el tramo de estudio.**

Los vertidos no son constantes a lo largo del periodo modelado y sufren fluctuaciones de caudal vertido, puesto que al entrar en funcionamiento nuevas estaciones depuradoras o al producirse una remodelación de las mismas, el caudal vertido por las nuevas estaciones varía.

Se disponen de dos grandes grupos de datos de los vertidos: volúmenes de caudal y concentraciones de contaminantes.

Los datos iniciales de volúmenes de las EDAR datan del año 2002. Se disponen de datos medios anuales de volumen de vertidos, medidos en m<sup>3</sup>/año, durante el periodo 2002-2006. Estos datos han sido facilitados por la CHT, y proceden del Ayuntamiento de Madrid, encargado de la gestión de estas estaciones depuradoras durante este periodo.

A partir del año 2007 la gestión total de todas las depuradoras situadas en el Municipio de Madrid (Viveros, La China, La Gavia, Butarque, Sur y Sur Oriental), pasa a formar parte del Canal Isabel II (CYII). A partir de este periodo se dispone de una cantidad mayor de datos.

Se dispone, además, del aforo de caudales diarios vertidos por las estaciones depuradoras situadas en el Municipio de Madrid (las citadas anteriormente) sobre el Manzanares. Estos datos se encuentran aforados en m<sup>3</sup>/día.

Paralelamente, se dispone del vertido promedio mensual de todas las estaciones del tramo de estudio, incluyendo los vertidos sobre el arroyo Culebro. Este caudal se encuentra aforado en m<sup>3</sup>/mes. Estos caudales, tanto mensuales como diarios, han sido proporcionados por la Comisaría de Aguas de la CHT.

En cuanto a concentraciones de vertidos se distinguen dos grandes periodos: previo a septiembre de 2006 y posterior a esta fecha. Los datos previos a septiembre de 2006 son escasos. Se encuentran aforadas, desde enero de 2002, las concentraciones de los siguientes constituyentes:

- DBO<sub>5</sub>
- Nitrógeno total
- Sólidos suspendidos

Además también se tienen datos de conductividad desde enero de 2004. El resto de contaminantes estudiados (amonio, oxígeno disuelto, fósforo total, nitrógeno orgánico y nitratos) no han sido medidos.

Estas concentraciones han sido medidas en las EDAR de Viveros, La China, Butarque, Sur y Sur Oriental. La periodicidad de muestreo ha sido mensual.

En el periodo que abarca desde septiembre de 2006 hasta febrero de 2009, los datos de concentraciones medidos aumentan considerablemente. Se disponen de mediciones cada 15 días (salvo excepciones) de las EDAR que en el periodo analizado están en funcionamiento. En nuestro estudio se han empleado datos hasta septiembre de 2008 (inclusive).

En este caso se ha medido:

- Amonio
- Sólidos suspendidos
- Conductividad
- Fósforo total
- DBO<sub>5</sub>
- Nitrógeno total

De la misma manera que en el periodo anterior, tampoco se han medido concentraciones de oxígeno disuelto, nitrógeno orgánico ni nitratos.

Los datos de concentraciones de ambos periodos han sido aportados por la Comisaría de Aguas de la CHT.

## Esquema de la cuenca baja del río Manzanares

A continuación se muestra la figura resumen citada anteriormente de los datos disponibles, a la que se hace referencia en este documento.

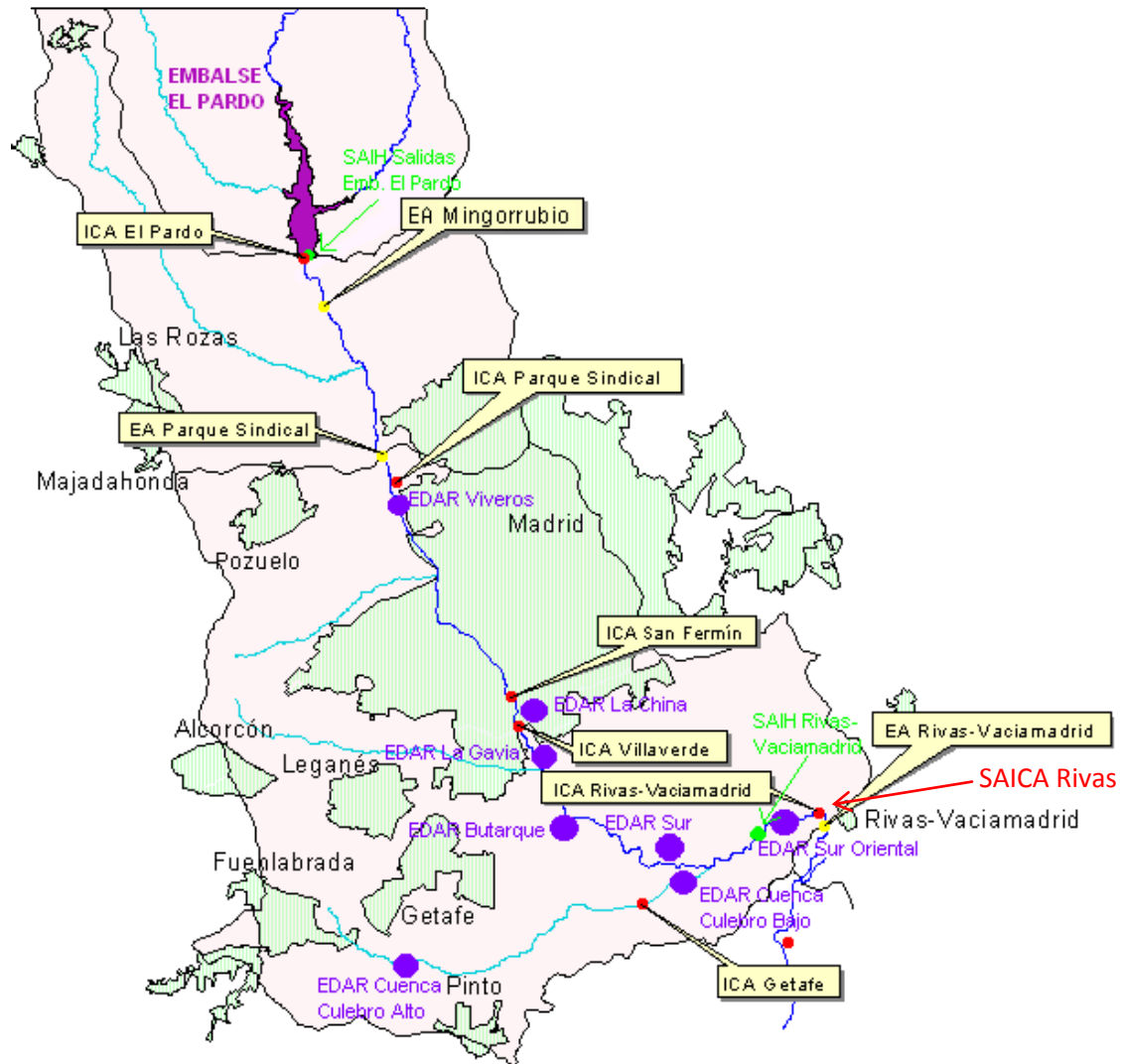


Figura 1. Mapa de la cuenca baja del río Manzanares

A continuación se resume esquemáticamente la cuenca media-baja del río Manzanares:

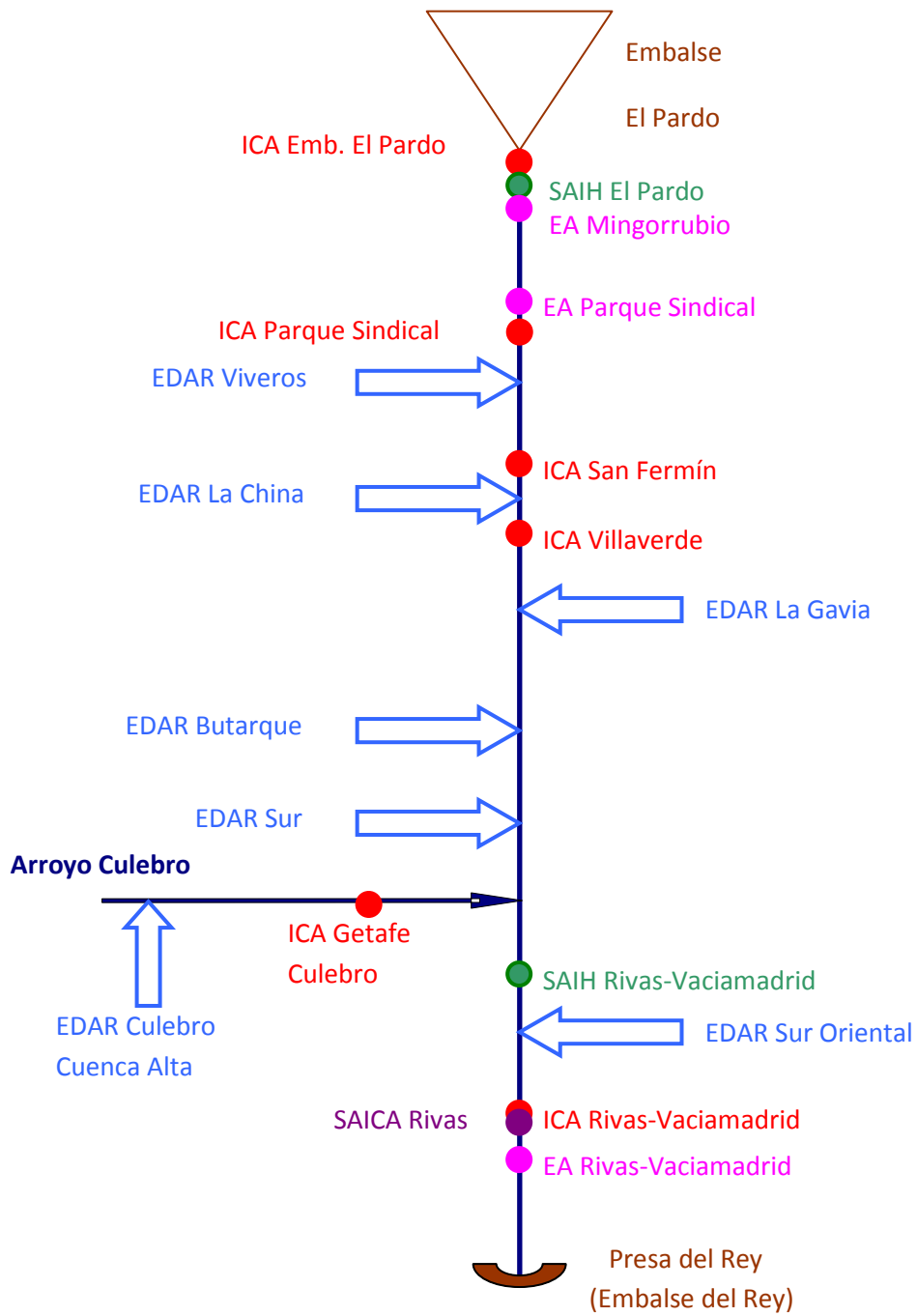


Figura 2. Esquema cuenca media-baja del río Manzanares

## **Descripción de la problemática. Zonas de fuertes presiones puntuales**

El río Manzanares es un río atípico en cuanto a su calidad se refiere. Es uno de los ríos más contaminados de España. En él se vierten las aguas residuales depuradas y la red de colectores pluviales procedentes del Municipio de Madrid y sus alrededores. El mayor problema en la cuenca media-baja del río Manzanares radica en los vertidos, tanto en número como en volumen, que se dan sobre el río. Estos vertidos proceden de las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (EDAR) localizadas en el Municipio de Madrid y en los alrededores. En concreto se trata de seis estaciones depuradoras vertientes directamente sobre el cauce del río Manzanares, junto con otras dos EDAR (aunque en el periodo estudiado tan sólo estaba en funcionamiento una) vertientes sobre el arroyo Culebro, afluente del Manzanares en su cuenca baja. Dichas EDAR ya han sido citadas en un punto anterior de la memoria. Cada vertido de las EDAR es una fuerte presión puntual sobre el río.

El tramo analizado abarca desde la presa de El Pardo hasta la presa del Rey. Inicialmente las sueltas (o caudal de salida) de la presa de El Pardo son relativamente bajas, están en torno a un metro cúbico por segundo. La función de la presa de El Pardo es de regulación de caudales y riego, por lo que tan sólo se deja pasar el caudal ecológico que necesita el río en la zona catalogada como ZEPA, por tanto la presa no suelta toda el agua que recibe aguas arriba del embalse. Esto provoca que el caudal de sueltas del embalse sea constante y no existan grandes diferencias entre meses secos y meses húmedos.

Como se ha citado anteriormente, en el periodo de estudio siete grandes depuradoras vierten sus aguas residuales tratadas sobre el río Manzanares, por lo que calidad del mismo será altamente mermada. El volumen de caudal total tratado por las EDAR y vertido posteriormente sobre el río es del orden de diez veces superior al caudal circulante por el río, es decir, a las sueltas del embalse. Este hecho provoca que la capacidad de depuración de las aguas naturales se vea fuertemente reducida y apenas sea eficaz. Además, debido a la cercanía entre las EDAR, la recuperación natural del río es prácticamente nula. Este es el principal motivo y problema de la contaminación del río.

La situación en el río Manzanares es la contraria a la que se da casi en todos los ríos comunes. Lo habitual es que en un río caudaloso se tenga un pequeño vertido de altas concentraciones de contaminantes. De esta manera, los contaminantes se diluyen en el gran caudal circulante reduciendo los efectos negativos sobre el cauce. Sin embargo, en este caso el caudal circulante por el río es bastante escaso, mientras que los vertidos son de un orden de magnitud superior. Esto provoca el efecto contrario, es decir, que el caudal circulante tenga calidad de vertido ligeramente diluido. A medida que van vertiendo más estaciones depuradoras sobre el río, esta pequeña capacidad de depuración natural del río desaparece.

### **Obras de restauración del cauce del Manzanares**

Además de esta situación de fuertes presiones puntuales producidas por los vertidos de las EDAR, existen otras fuentes que actualmente empeoran la calidad del río. Una de ellas es la realización de obras de ingeniería civil en las márgenes del río Manzanares, a su paso por el

Municipio de Madrid. Algunas de estas obras ya han sido finalizadas y otras aún se encuentran en ejecución, pero durante el periodo de estudio la mayoría se encontraban realizándose. Estas obras son principalmente las de soterramiento de la carretera M-30 a lo largo de seis kilómetros, a su paso por el Municipio de Madrid y paralelas al cauce del río.

Tras la finalización del soterramiento, se ha procedido a la restauración de las márgenes del río, con lo que el río Manzanares tiene una zona localizada de contaminación a su paso por Madrid.

El resultado de estos movimientos de tierras se aprecian en el aumento de los sólidos suspendidos medidos en la estación de San Fermín durante el año 2006, alcanzando valores anormales superiores a 500 mg/l. Este efecto se describirá posteriormente.

### **Diagnóstico de calidad actual**

Para la realización de un modelo de calidad, es interesante disponer de un conocimiento previo de la evolución de la calidad del agua, tanto temporal como espacial. Además es interesante conocer las principales características que influyen en la calidad.

En este estudio se realiza un análisis espacio temporal de la calidad del agua en el río Manzanares y su afluente, el arroyo Culebro, entre los embalses de El Pardo y del Rey. Para ello se han utilizado los datos de la red Integrada de Calidad de Aguas (red ICA) en activo en la Confederación Hidrográfica del Tajo. El objetivo es caracterizar la calidad en la cuenca, su evolución espacial y temporal tanto estacional como a lo largo de los años. El estudio de la calidad del agua es fundamental para analizar la realidad del sistema, evaluar los focos contaminantes y el posterior desarrollo de modelos de calidad.

Las concentraciones de contaminantes a analizar en este diagnóstico de calidad son: oxígeno disuelto, DBO<sub>5</sub>, fósforo, conductividad y formas de nitrógeno (amonio, nitratos y nitrógeno orgánico).

Es importante tener en cuenta el agua sale del embalse con una calidad influenciada por el efecto que el embalse tiene sobre la misma. Esto es debido a que la toma de salida del agua se encuentra en el hipolimnion del embalse, donde algunas concentraciones pueden estar ligeramente alteradas. Sin embargo, las condiciones de la calidad del agua son buenas puesto que aguas arriba del embalse El Pardo la influencia antrópica sobre el río es muy baja. Aguas abajo del embalse, este efecto se va disipando y el río recupera su calidad "natural". Se considera que la influencia del embalse sobre la calidad ha desaparecido a su paso por el Parque Sindical. El volumen medio de salida del embalse, salvo avenidas, es de aproximadamente 1 m<sup>3</sup>/s.

Tras el paso por el Parque Sindical, y antes de entrar en el Municipio de Madrid, se produce el primer vertido de una EDAR sobre el río. El vertido medio de la EDAR de Viveros de la Villa es del orden de 1 m<sup>3</sup>/s, con lo que el aporte sufrido por el río es el mismo que el caudal que circulaba previamente por el mismo, duplicando su volumen. La calidad total del agua del río descende puesto que el vertido es de aguas previamente tratadas, con una calidad inferior al caudal circulante previo al vertido. En la estación de la red de calidad de las aguas de San



Fermín recoge el efecto que tiene el vertido de Viveros, que ya ha sufrido una cierta degradación, sobre el Manzanares. En esta estación también se recoge el efecto del tramo de canalización del río Manzanares a su paso por el Municipio de Madrid, así como las obras llevadas a cabo a orillas del río, los posibles vertidos incontrolados y la contaminación propia de un río urbano a su paso por la ciudad.

La siguiente estación de la red ICA siguiendo el orden descendente del curso del agua se trata de Villaverde. Esta estación está situada aguas abajo del vertido de la EDAR de la China, por lo que la influencia de este vertido en la estación es muy elevada. Además, el volumen vertido por dicha EDAR es mayor de  $2 \text{ m}^3/\text{s}$ , como en el caso anterior, el caudal de vertido medio posee el mismo volumen de caudal circulante. Este hecho influye disminuyendo la calidad del río. En este punto del río, la proporción agua natural por agua depurada es 1:3, por lo que el descenso de la calidad del agua será más evidente.

El tramo final será el considerado desde la estación de la red ICA de Villaverde hasta el punto final del tramo de estudio. En este tramo no existen más estaciones intermedias de control de calidad de las aguas. El gran inconveniente de este tramo es que se produce el vertido de 4 grandes depuradoras sobre el río Manzanares (La Gavia, Butarque, Sur y Sur Oriental), más el aporte del caudal vertido por la EDAR del arroyo Culebro alto (y en la actualidad también del Culebro bajo) sobre el arroyo Culebro.

En el citado arroyo existe una estación de control de la calidad, pero puesto que la intención de la CHT no es la de simular el arroyo Culebro, la estación de calidad situada en el mismo, será considerada como un input en el modelo, e informará de la calidad de los aportes del arroyo. El arroyo Culebro confluye con río Manzanares entre las EDAR Sur y Sur Oriental.

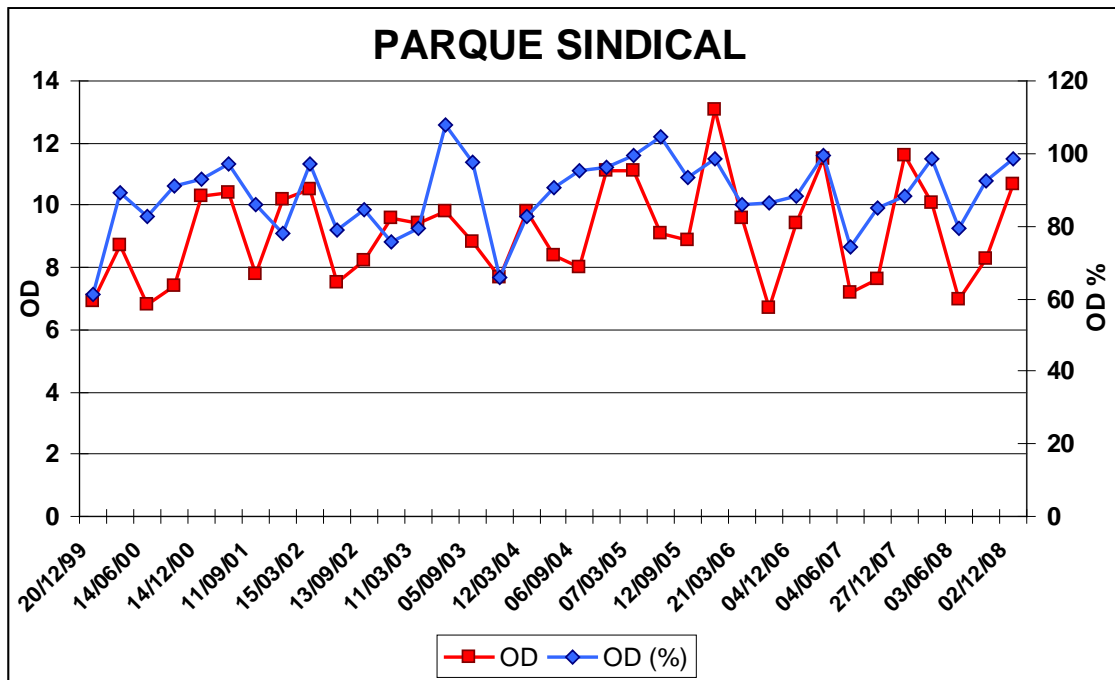
En el tramo final, el volumen total de estos vertidos es de aproximadamente  $6.5 \text{ m}^3/\text{s}$ , frente al caudal previamente circulante de  $4.5 \text{ m}^3/\text{s}$ . La ausencia de otras mediciones de calidad en el tramo produce una gran incertidumbre en este tramo del río siendo muy complejo un análisis en profundidad. Se considera que la estación de Rivas mide la calidad del agua en el punto final del tramo, puesto que no se realizan más vertidos autorizados en el resto del tramo. Como es lógico pensar, la estación de calidad de Rivas, mide la situación más desfavorable del río en cuanto a calidad del agua se refiere. En este punto, la proporción entre el agua "natural" salida del embalse y los vertidos de las EDAR es de 1:10, es decir, por cada  $\text{m}^3/\text{s}$  que sale del embalse, se vierten  $10 \text{ m}^3/\text{s}$  de agua tratada previamente en una estación depuradora.

A continuación se hace una descripción con mayor detalle de la situación actual del río de las concentraciones de contaminantes citadas anteriormente.

### *Oxígeno disuelto (OD) y Demanda Biológica de Oxígeno (DBO5)*

Tradicionalmente se ha considerado el oxígeno disuelto como el parámetro más significativo a la hora de evaluar la salud de un ecosistema. Una de las principales causas de disminución de oxígeno disuelto es la degradación de la materia orgánica. Por ello en general se analizan ambos parámetros de forma conjunta. En aguas naturales (poco contaminadas) las concentraciones de oxígeno disuelto deben ser cercanas a la concentración de saturación dependiendo esta de la temperatura, salinidad, presión atmosférica y presión parcial del agua.

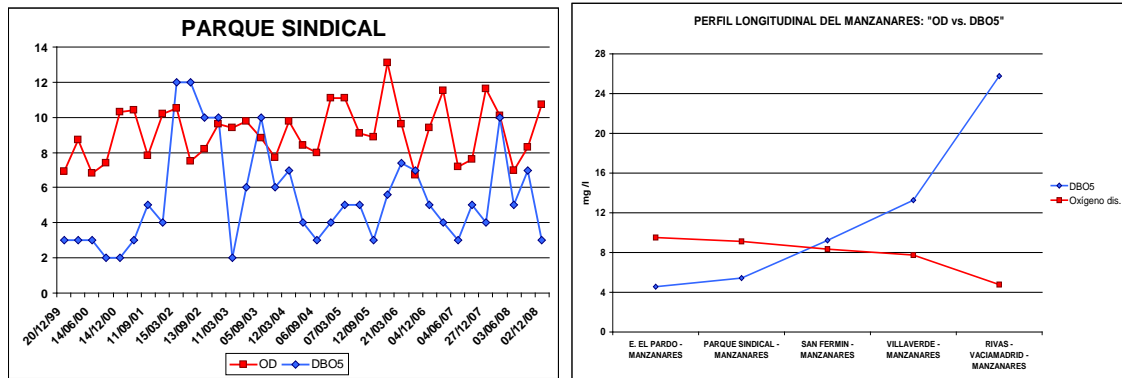
Como se aprecia en el siguiente gráfico, previo al vertido de la EDAR de Viveros, la concentración de oxígeno disuelto se encuentra cercana a la saturación. Los valores de OD superan los 7 mg/l a lo largo de todo el periodo, manteniendo buenas condiciones de oxígeno.



**Figura 3. Concentración de OD y OD (%) en la ICA Parque Sindical**

Los valores mínimos de OD se alcanzan los meses de verano, mientras que los máximos se alcanzan los meses de invierno. Esto es debido a la dependencia del OD con la temperatura, puesto que a mayores temperaturas la concentración de OD desciende, ocurriendo lo contrario cuando las temperaturas son bajas. En esta estación se mantienen unas concentraciones de OD medias de  $9 \pm 1$  mg/l durante todo el periodo, así como concentraciones entorno al 80-90% de OD (%).

En cuanto a  $DBO_5$  se refiere, cabe destacar que esta concentración en la estación de Parque Sindical está fuertemente influenciada por el embalse de aguas arriba. Existen grandes fluctuaciones de las concentraciones de  $DBO_5$  medidas en esta estación. Cuanto mayor es la concentración de OD, la concentración de  $DBO_5$  aumenta, y viceversa. Hasta el año 2002 las concentraciones de  $DBO_5$  medidas son muy bajas inferiores a 5 mg/l, sin embargo, durante el citado año las concentraciones medidas aumentan considerablemente a valores superiores a 10 mg/l. Tras este periodo parece estabilizarse a valores medios de 5 mg/l, con máximos de 10 y mínimos de 3 mg/l.



**Figura 4. Concentración de OD (mgO<sub>2</sub>/l) y DBO<sub>5</sub> (mgO<sub>2</sub>/l) en la ICA Parque Sindical**

**Figura 5. Perfil longitudinal del río Manzanares: Concentración de OD y DBO<sub>5</sub>.**

Si se realiza un perfil longitudinal del tramo analizado, se observa que conforme se van realizando los vertidos sobre el cauce del río Manzanares, la concentración de oxígeno disuelto va descendiendo hasta alcanzar peligrosamente la anoxia en la estación de Rivas. El efecto contrario sucede con la concentración de DBO<sub>5</sub>, puesto que sufre un fuerte crecimiento a lo largo del río.

Si analizamos el resto de estaciones de la red ICA se puede apreciar cómo la influencia de estos vertidos produce el perfil longitudinal anterior, reduciéndose progresivamente la cantidad de OD en el río y aumentando la cantidad de DBO<sub>5</sub>.

Si se observa la gráfica de la concentración de OD en las estaciones de calidad del agua, se ve como conforme se avanza hacia aguas abajo la concentración de OD va descendiendo ligeramente hasta alcanzar los valores mínimos en la estación de Rivas. Todo lo contrario se puede observar en la gráfica de la concentración de DBO<sub>5</sub>, en la que a medida que las EDAR vierten sobre el río, la concentración de DBO<sub>5</sub> aumenta.

Tras el vertido realizado por la depuradora de Viveros, se distingue en San Fermín un ligero descenso de la concentración de OD, tomando valores medios ligeramente superiores a 8 mg/l. La concentración de DBO<sub>5</sub> aumenta muy ligeramente, alcanzando un máximo en los meses de verano de 2007, periodo en cual alcanza valores de 30 mg/l. Estas variaciones son debidas a la concentración y volumen de vertido de la EDAR de Viveros.

La influencia del vertido de la China se observa en la estación de Villaverde, en la que debido al citado vertido, así como a su cercanía con la estación de calidad, se empeora la calidad del agua. Se alcanzan concentraciones de vertido medias de OD ligeramente inferiores a 8 mg/l. Puntualmente se alcanzan concentraciones bajas, aunque en ningún caso se llega a valores por debajo de 4 mg/l, por lo que no se alcanzarán situaciones de anoxia. En esta estación la concentración de DBO<sub>5</sub> no supera los valores de 20 mg/l en ninguna medición realizada a lo largo del periodo. El valor promedio de la estación es de unos 13-14 mg/l, superior a los valores medios de la estación ICA anterior (entorno a los 10 mg/l). Sin embargo, los valores son mucho más constantes y no se alcanzan picos tan fuertes como los medidos en San Fermín. De esto se deduce que el vertido de la China es más constante que el de Viveros.

La estación de Rivas es la que mide las condiciones más desfavorables, puesto que ya han vertido sobre el Manzanares la totalidad de las estaciones depuradoras. La concentración de oxígeno disuelto toma valores muy bajos. Existen gran cantidad de mediciones por debajo de 4 mg/l, mientras que también existen multitud de situaciones en la que se alcanza la anoxia (concentraciones inferiores a 2 mg/l). En estas condiciones, la posibilidad de respiración de los organismos es prácticamente nula, por lo que la vida no es posible en este punto del tramo. En esta parte del río se produce un aumento de las concentraciones de DBO<sub>5</sub> totalmente injustificado. Estas altas concentraciones medidas no se corresponden con los aportes que las estaciones depuradoras realizan sobre el cauce. En la estación de calidad del agua anterior no se superan los 20 mg/l de concentración de DBO<sub>5</sub>, siendo los vertidos producidos entre ambas estaciones no superiores a 20 mg/l de materia orgánica (DBO<sub>5</sub>). Este hecho nos hace pensar que existe una fuente muy fuerte y descontrolada de DBO<sub>5</sub> en el tramo final del río. Como se ha citado anteriormente, sería considerable incluir alguna estación intermedia de medición de la calidad en dicho tramo para disminuir la incertidumbre existente en este tramo e intentar localizar, o al menos cercar, la fuente externa de DBO<sub>5</sub>.

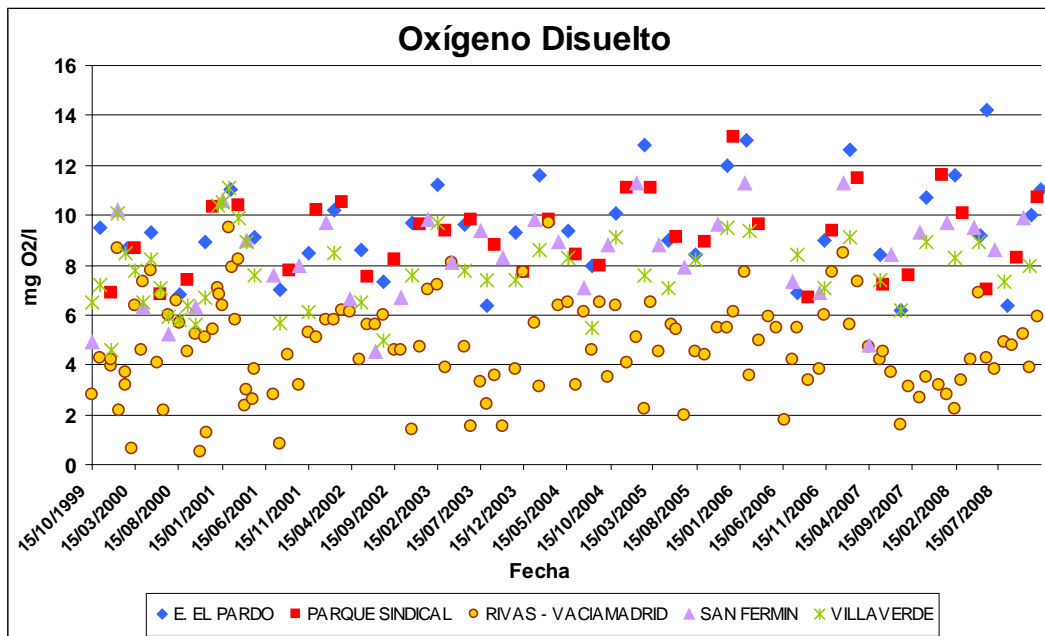


Figura 6. Concentración de OD: Evolución en la red ICA

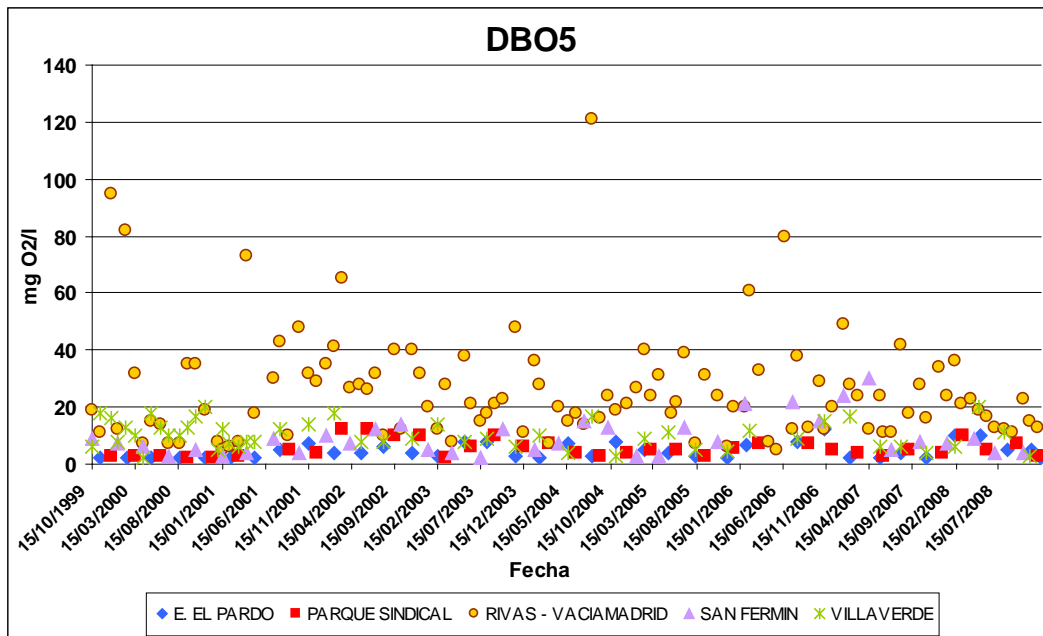


Figura 7. Concentración de DBO5: Evolución en la red ICA.

### Conductividad

La conductividad es una medida de la capacidad del agua como conductor de la corriente eléctrica, dependiendo su valor de los sólidos disueltos. Debido a su carácter altamente conservativo, su medición y análisis permite establecer fuentes de contaminación ya sea de origen antrópica o natural. En aguas naturales suele oscilar entre 100 y 1000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (WHO, 1992) aunque se puede exceder de este valor máximo de forma natural, como suele pasar en las cuencas mediterráneas de la península ibérica.

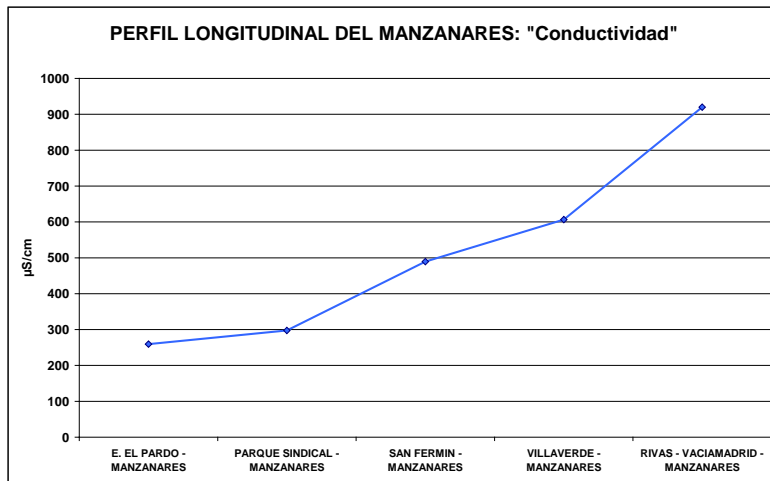
Analizando el perfil longitudinal de la cuenca media-baja del río Manzanares se puede apreciar que la conductividad sufre un proceso ascendente, inicialmente con valores cercanos a 250  $\mu\text{S}/\text{cm}$  hasta finalizar una conductividad media ligeramente superior a 900  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Todos los incrementos significativos de conductividad se explican por aportes producidos en las estaciones depuradoras del tramo del río. El mayor crecimiento se produce en el citado tramo final del río, entre las estaciones de Villaverde y Rivas.

El incremento de la conductividad sufrido entre el embalse de El Pardo y el Parque Sindical es debido a los pequeños aportes naturales por escorrentía directa. La cuenca media se encuentra situada en la llanura silíceo del Tajo, sobre un acuífero terciario detrítico, rico en minerales. Esta es la causa por la que se produce un incremento en la conductividad tras los pequeños aportes por escorrentía directa sobre el Manzanares y la escorrentía procedente del arroyo Trofa.

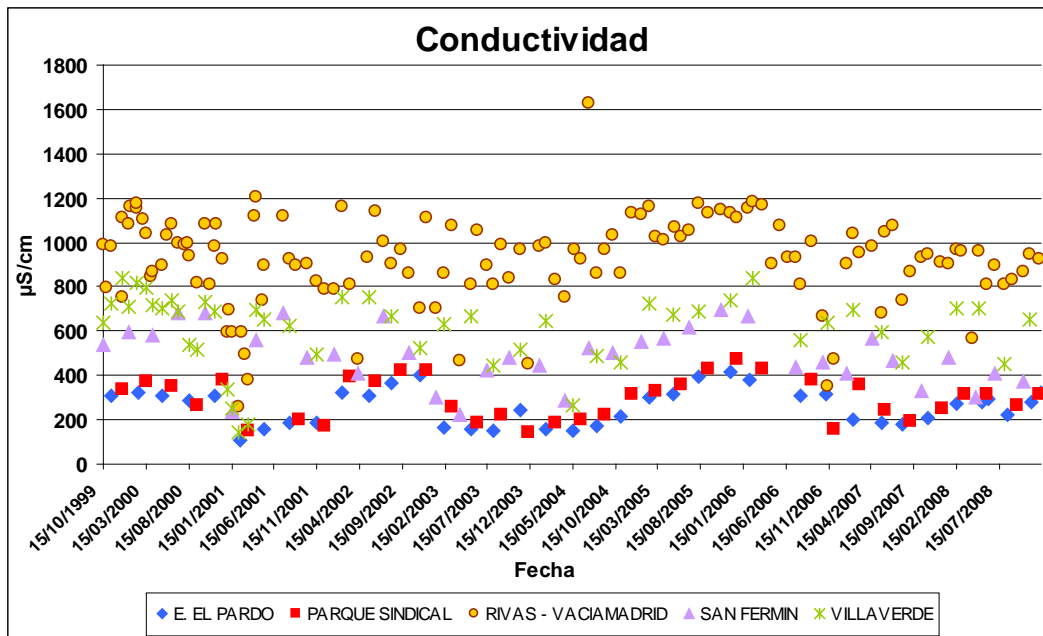
El primer incremento significativo se produce en la estación San Fermín. En ella se aprecia el efecto que tiene el vertido de Viveros sobre el río Manzanares. Se produce un incremento en la conductividad de 200  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , debido al volumen de aporte procedente del vertido de Viveros y a la conductividad de éste.

El siguiente escalón medido de la conductividad se produce en Villaverde. Este escalón es menos significativo que el anterior. Se produce un incremento en el perfil del río de aproximadamente 100  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , alcanzando un valor medio medido en la estación de Villaverde de 600  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

A partir de este punto del río se produce el vertido de las EDAR de la Gavia, Butarque, Sur, Sur Oriental y Culebro alto, con unas conductividades variables en el tiempo. Los vertidos de todas las depuradoras superan la conductividad medida en la estación de Villaverde, por lo que la medición de conductividad en Rivas será superior a la medida en la estación de la red ICA anterior. Puesto que los mayores volúmenes vertidos se producen desde las estaciones Sur, Butarque y la Gavia, la conductividad medida en Rivas será semejante a estas. Como más adelante se verá en los vertidos de las estaciones depuradoras, estos vertidos son muy parecidos y con valores ligeramente superiores a 900  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Por esto, la conductividad medida en Rivas es de unos 900  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .



**Figura 8. Perfil longitudinal del río Manzanares: Conductividad**



**Figura 9. Concentración de Conductividad: Evolución en la red ICA**

La evolución de la conductividad en las estaciones de Parque Sindical, San Fermín y Rivas mantiene la tendencia que sufre la concentración a la salida del embalse. Este efecto se va haciendo menos notable conforme el caudal procedente de las EDAR aumenta. Finalmente, la tendencia en la estación de Rivas apenas se aprecia.

La variación de la conductividad a la salida del embalse varía entre 150 y 450  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Este hecho posiblemente esté asociado a periodos de abundancia y sequía en el río, con periodos de grandes avenidas por escorrentía superficial que incrementa la conductividad natural del embalse.

### Nitrógeno

El nitrógeno es un nutriente fundamental para los seres vivos. La disponibilidad de nitrógeno en el medio ambiente es muy grande. En volumen casi el 80% de la atmósfera está formada por nitrógeno gas ( $\text{N}_2$ ). Sin embargo el nitrógeno como gas debe ser convertido a formas asimilables, como a amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) o a nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ), para la mayoría de los organismos vivos. Esta transformación entra dentro de llamado ciclo del nitrógeno.

En los sistemas acuáticos el nitrógeno puede darse en diversas formas: nitrógeno gas ( $\text{N}_2$ ), amonio ( $\text{NH}_4^+$  y  $\text{NH}_3$ ), nitritos ( $\text{NO}_2^-$ ), nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) y nitrógeno orgánico, en forma particulada o disuelta. En este estudio de la cuenca del río Manzanares se han analizado las concentraciones de amonio, nitratos y nitrógeno orgánico ya que no se dispone de medidas de nitritos. Cabe destacar que el nitrógeno orgánico ha sido obtenido por diferencia de otras formas de nitrógeno (nitrógeno Kjeldahl y amonio), asumiendo nitritos como nitratos, como se explicará más adelante en el *balance de nitrógeno*.

### **Amonio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>)**

El amonio en el agua natural procede del arrastre de la escorrentía de nitrógeno orgánico e inorgánico, excreciones de la biota, de la reducción de nitrógeno gas por microorganismos y del intercambio de gas con la atmósfera. Las fuentes no naturales que aportan amonio al medio acuático son los vertidos urbanos e industriales.

El amonio puede presentarse en su forma ionizada como NH<sub>4</sub><sup>+</sup> o en su forma no ionizada como NH<sub>3</sub>, la cual puede ser tóxica para los organismos acuáticos. El equilibrio entre las dos formas de amonio viene marcado por el pH, la temperatura, la concentración de oxígeno disuelto, salinidad, dióxido de carbono y compuestos tóxicos, siendo los dos primeros los más influyentes.

La toxicidad del NH<sub>3</sub> tiene especial importancia sobre las comunidades de peces mientras que los invertebrados y plantas acuáticas tienen una mayor tolerancia. Aguas naturales, no contaminadas, tienen concentraciones muy bajas de amonio, generalmente inferiores a 0.1 – 0.2 mg/l. Concentraciones superiores pueden ser indicativo de contaminación antropogénica.

### **Amonio no ionizado (NH<sub>3</sub>)**

El amonio simulado en el estudio será el amonio en su forma ionizada (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>). De ahora en adelante cuando nos refiramos a amonio se considerará su forma ionizada, salvo que se indique lo contrario.

Sin embargo, en este estudio también se realizará un pequeño análisis del amonio en su forma no ionizada (NH<sub>3</sub>). La importancia de este tipo de amonio, como se ha citado anteriormente, radica en la toxicidad de este componente para los organismos acuáticos.

Si se analiza el perfil longitudinal del amonio no ionizado del río Manzanares, se observa como los valores medidos se encuentran por debajo de 0.1 mg/l hasta la estación de Villaverde inclusive. Tras la gran cantidad de vertidos que tienen lugar entre Villaverde y Rivas, se incrementa ligeramente la concentración de esta forma de amonio sin llegar a superar los 0.25 mg/l de concentración media. Este nivel de amonio ya se puede considerar como contaminado antropogénicamente, como es evidente tras realizar los análisis anteriores y realizar los vertidos urbanos sobre el cauce. La calidad de esta agua es tóxica y la vida en este tramo está muy limitada.



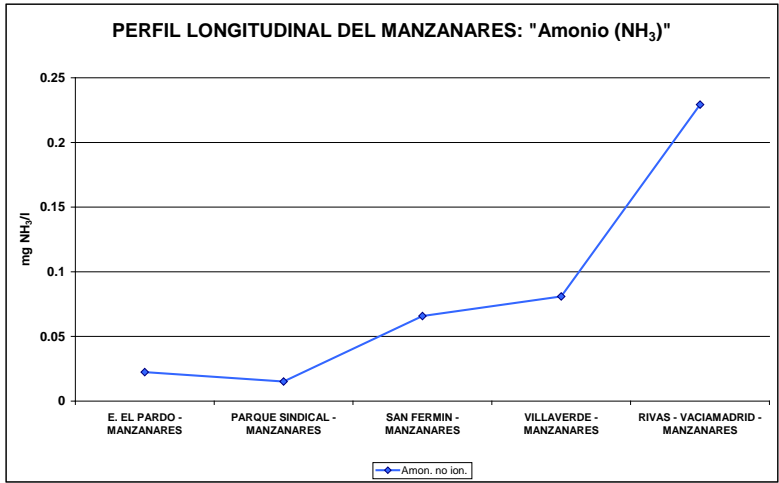


Figura 10. Perfil longitudinal del río Manzanares: Amonio no ionizado (NH3)

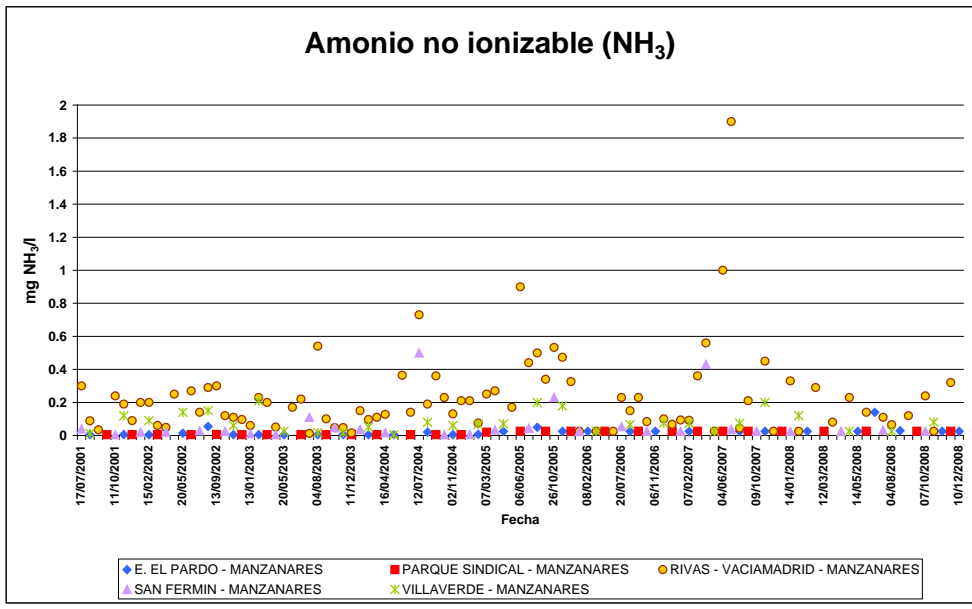


Figura 11. Concentración de amonio no ionizado (NH3): Evolución en la red ICA

**Amonio ionizado (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>)**

La forma de amonio que más interesa para nuestro diagnóstico de la calidad es la ionizada. Si se observa su perfil longitudinal se aprecia como la concentración de amonio sufre un importante aumento con los vertidos de las distintas EDAR. Se pasa de valores iniciales medios inferiores a 1 mg/l en la estación de calidad de Parque Sindical, hasta valores medios cercanos a 27 mg/l, aforados en el tramo final del río, a su paso por la estación de Rivas.

Tras la salida del embalse de El Pardo, la concentración de amonio va reduciéndose hasta alcanzar la estación de Parque Sindical. En este tramo se produce la nitrificación del amonio a nitratos, como se verá más adelante. La concentración de amonio desciende ligeramente, mientras que la concentración de nitratos aumenta. También se produce una pequeña sedimentación de nitratos, puesto que el nitrógeno total se reduce ligeramente (ver la Figura 15).

A partir del vertido de Viveros se inicia un crecimiento en la concentración de amonio en su perfil longitudinal. En San Fermín, se alcanzan concentraciones puntuales de amonio de hasta 20 mg/l en los años anteriores a 2001, mientras que las concentraciones medidas en los periodos más recientes son menores y en pocas ocasiones superan los 15 mg/l. La concentración media del periodo es ligeramente superior a 6 mg/l. En este punto, se continúa dando la nitrificación aunque a una velocidad menor. Además el vertido de amonio y nitratos procedente de Viveros permite que la cantidad total de nitrógeno aumente. El vertido de Viveros tiene una baja concentración de amonio.

La siguiente estación de la red ICA, Villaverde, recoge el efecto que la EDAR de la China tiene sobre el río. Como en el caso anterior, hasta el año 2001 la concentración reflejada en Villaverde es mucho mayor que la media, alcanzando valores de hasta 50 mg/l. Sin embargo, a partir de este año y hasta finales de 2006, esta concentración de amonio medida se reduce, alcanzando valores medios de aproximadamente 13 mg/l de amonio. A partir del año 2007, la concentración medida vuelve a aumentar hasta alcanzar valores medios de unos 25 mg/l. El valor promedio del periodo se encuentra en 17 mg/l de amonio. Estas variaciones en la concentración de amonio medida en Villaverde son debidas a la variación de la concentración del vertido de la China.

Finalmente, en la estación de Rivas se recoge el efecto del resto de vertidos de las estaciones depuradoras en el río. En esta estación se mide una concentración media de amonio mayor de 25 mg/l, alcanzándose en multitud de ocasiones valores superiores a 40 mg/l. Este valor de la concentración es muy elevado, siendo tóxico para la vida piscícola del río. Éste no es un problema como tal en el río Manzanares, puesto que no existe vida en este tramo, sin embargo el mayor inconveniente de estas altas concentraciones es su extensión hacia aguas abajo, en la que sí que existe vida piscícola. La concentración de amonio vertida por las EDAR en el tramo final va disminuyendo ligeramente, pese a que este efecto no se ve reflejado en la medición de Rivas, por lo que se puede pensar que existe una fuente no controlada de amonio en el tramo.

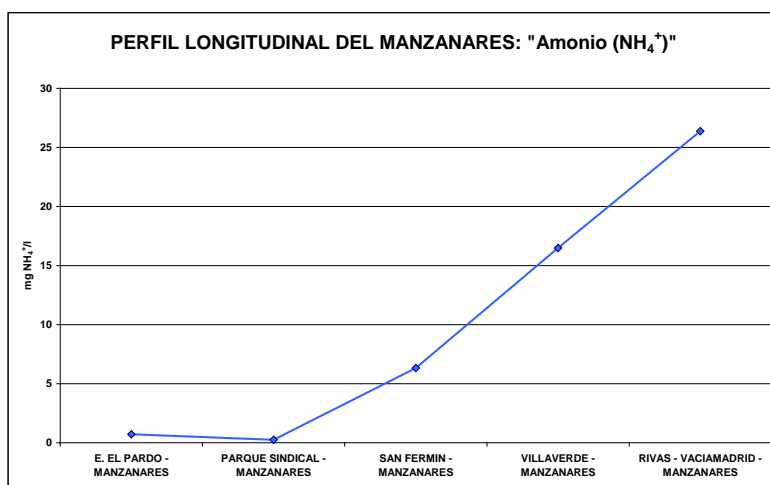


Figura 12. Perfil longitudinal del río Manzanares: Amonio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>).

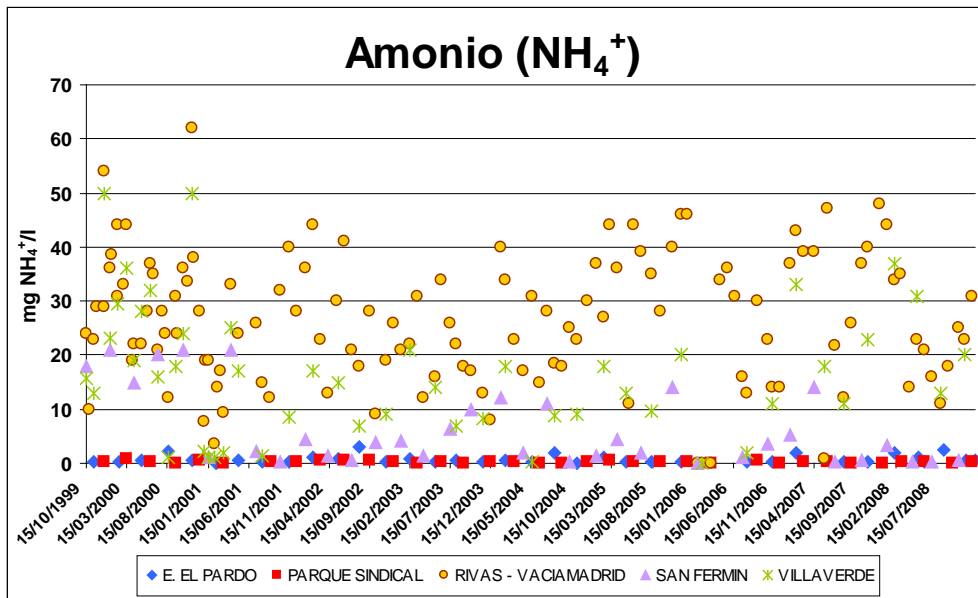


Figura 13. Concentración de amonio ionizado (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>): Evolución en la red ICA.

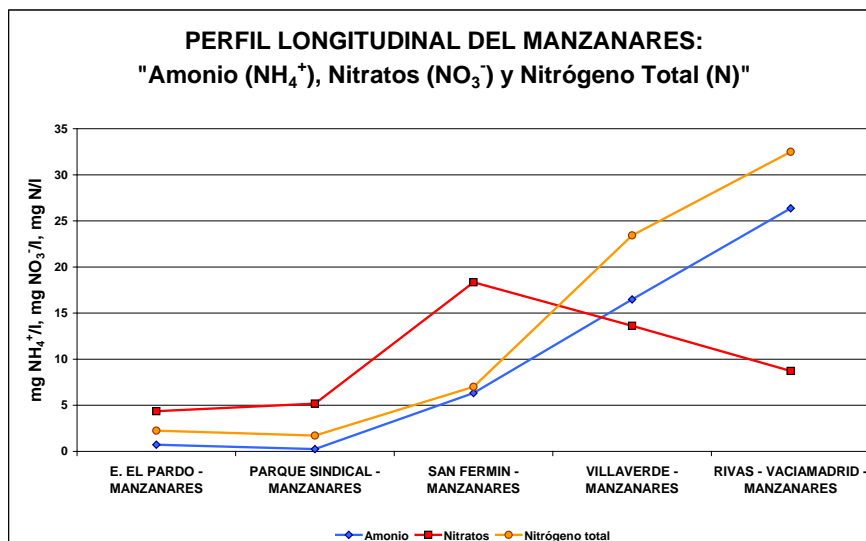


Figura 14. Perfil longitudinal del río Manzanares: Amonio, Nitratos y Nitrógeno total.

### Nitratos (NO<sub>3</sub>-)

El ión nitrato es un nutriente esencial para la vida. Concentraciones en aguas no contaminadas no suelen exceder de los 5 mg/l de NO<sub>3</sub><sup>-</sup>. Altas concentraciones suelen ser indicativas de contaminación difusa de origen agrario o ganadero. La OMS recomienda un límite máximo de 50 mg/l para suministro humano.

En lagos y embalses la disponibilidad de nitratos suele estimular el crecimiento de las algas y puede provocar, junto con otros factores, situaciones de eutrofización.

En aguas subterráneas la contaminación por nitratos suele provenir de la aplicación de fertilizantes en la agricultura. Las concentraciones en las aguas subterráneas suelen alcanzar valores muy superiores a los de las superficiales.

Inicialmente la calidad media del agua se encuentra por debajo de los 5 mg/l de nitratos al ser una concentración no contaminada. Desde la salida del embalse de El Pardo hasta Parque Sindical, como se ha citado anteriormente, se produce una nitrificación de amonio a nitratos. Crece ligeramente la concentración de nitratos hasta alcanzar valores medios de 5 mg/l.

Tras el vertido de la estación depuradora de Viveros y de su paso por la canalización del tramo del Municipio de Madrid, se produce un fuerte incremento de la concentración de nitratos medida en el río. La estación de calidad de San Fermín mide un promedio superior a 18 mg/l de nitratos, llegándose a alcanzar valores superiores a 50 mg/l en el año hidrológico 2001-2002.

A partir de 2007 se incrementa la concentración medida hasta alcanzar valores medios cercanos a los 23 mg/l. No se conoce la concentración de vertido de nitratos de la depuradora de Viveros, pero a la vista de los perfiles obtenidos, ésta parece ser elevada. Durante este tramo, se sigue produciendo la nitrificación del amonio, que junto con el vertido de nitratos provoca el fuerte incremento de los nitratos medidos.

Tras el tramo de canalizado, se produce el vertido de la EDAR de la China. Se observan descensos en la concentración de nitratos en la estación de Villaverde. Estos descensos son debidos a la hipotética baja concentración de vertido de nitratos de la China, así como de la reducción del proceso de nitrificación del amonio y el aumento del proceso de desnitrificación de los nitratos. En este punto de control de calidad del río, se aprecia como la concentración de amonio se incrementa mientras que la de nitratos desciende. Esto nos hace pensar que los procesos de nitrificación se han detenido bruscamente, posiblemente debido al incremento de la temperatura del agua.

La concentración de nitrógeno orgánico aumenta como se verá más adelante, incrementándose la concentración de amonio. Este hecho también explica el fuerte crecimiento de concentración de amonio.

La tendencia a disminuir de los nitratos se mantiene hasta su paso por la estación de calidad de Rivas. En este punto se toman medidas medias de nitratos inferiores a 9 mg/l, pese a que se alcanzan valores puntualmente superiores a 20 mg/l. Cabe pensar que esta reducción en el proceso de nitrificación se mantiene en su cuenca baja, desde la estación de Villaverde hasta la de Rivas.

Existe una tendencia al alza medida en Rivas, superior a los 20 mg/l a partir del mes de mayo de 2008. Esta tendencia se debería comprobar con datos posteriores a diciembre de 2008, para comprobar si realmente es una tendencia o tan sólo se trata de un periodo limitado.

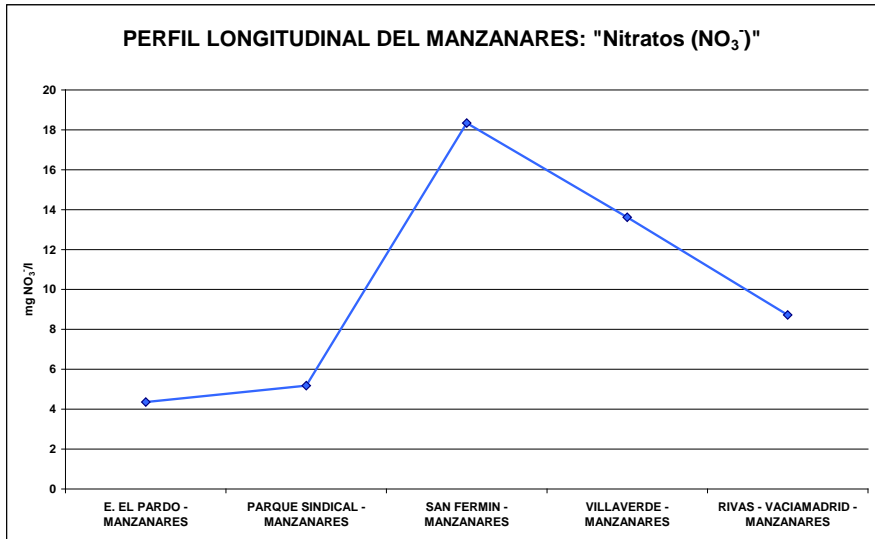


Figura 15. Perfil longitudinal del río Manzanares: Nitratos (NO<sub>3</sub>-)

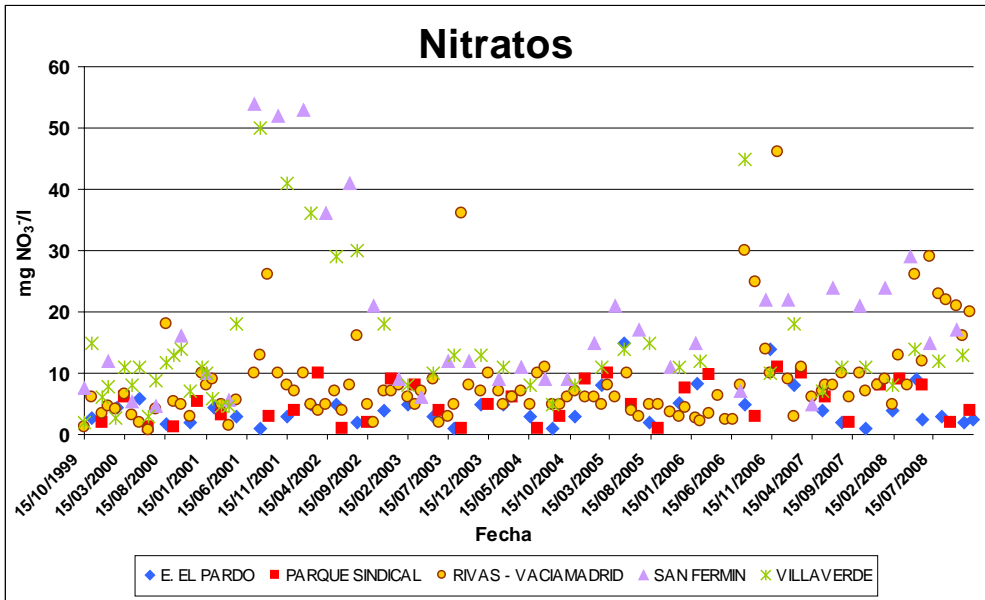


Figura 16. Concentración de nitratos (NO<sub>3</sub>-): Evolución en la red ICA

### Nitrógeno orgánico (Norg)

No existen datos medidos directamente de nitrógeno orgánico, habiendo sido calculado como diferencia entre el nitrógeno Kjeldahl y el amonio, ambos aforados en las estaciones de calidad. Como se observa tan sólo se dispone de datos en el periodo inicial y en el periodo final. En el periodo intermedio existe una gran incertidumbre, pues tampoco es conocida la concentración de nitrógeno orgánico que vierten las depuradoras.

La concentración de nitrógeno orgánico a la salida del embalse y en la estación de calidad de Parque Sindical es ligeramente inferior a 1 mg/l. Estas condiciones son las naturales del río, ya que la modificación antrópica hasta este punto ha sido muy baja.

Tras el vertido de Viveros y el paso por la canalización de Madrid, la concentración aumenta hasta un promedio de 2 mg/l. Este incremento de la media es debido a un pico en la medición que alcanza los 7 mg/l, puesto que si se elimina este pico, la concentración medida sería de 1.5 mg/l. Estos valores sugieren que la concentración nitrógeno orgánica de vertido no es elevada, y se da el proceso mineralización (paso de nitrógeno orgánico a amonio) en el tramo.

La estación de calidad de la Villaverde detecta un incremento medio de nitrógeno orgánico de 4 mg/l, alcanzando un valor medio de 6 mg/l. Este incremento puede ser debido a que el proceso de mineralización se reduce. Al estar la estación de calidad justo aguas abajo del vertido, y no da tiempo a mineralizar. En esta hipótesis también se considera que la concentración de vertido no es excesivamente elevada.

Finalmente en la estación de Rivas, se mide un valor medio de 9.5 mg/l de nitrógeno orgánico, dándose picos de 30 mg/l. Esto hace pensar que el proceso de mineralización de nitrógeno orgánico a amonio se ha detenido. Se produce el vertido de un elevado número de estaciones depuradoras que explicaría el aumento hasta concentraciones medias de 9.5 mg/l.

Con la ausencia de datos intermedios, así como de concentraciones de vertidos, se tiene una gran incertidumbre de lo que realmente está ocurriendo. Podría ser que la concentración de vertido de las depuradoras fuese eleva, descendiendo la concentración de nitrógeno orgánico por mineralización y sedimentación, incrementando la cantidad de amonio, o bien podría estar ocurriendo lo citado anteriormente y la mineralización y sedimentación ha descendido considerablemente y los vertidos de las EDAR tienen bajas concentraciones de nitrógeno orgánico.

Sería conveniente aforar la concentración de este contaminante en las EDAR, así como una estación intermedia entre Villaverde y Rivas.

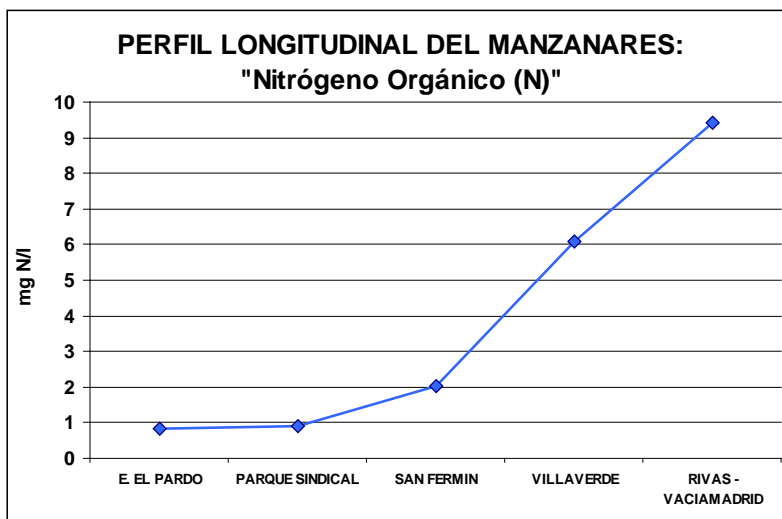


Figura 17. Perfil longitudinal del río Manzanares: Nitrógeno orgánico

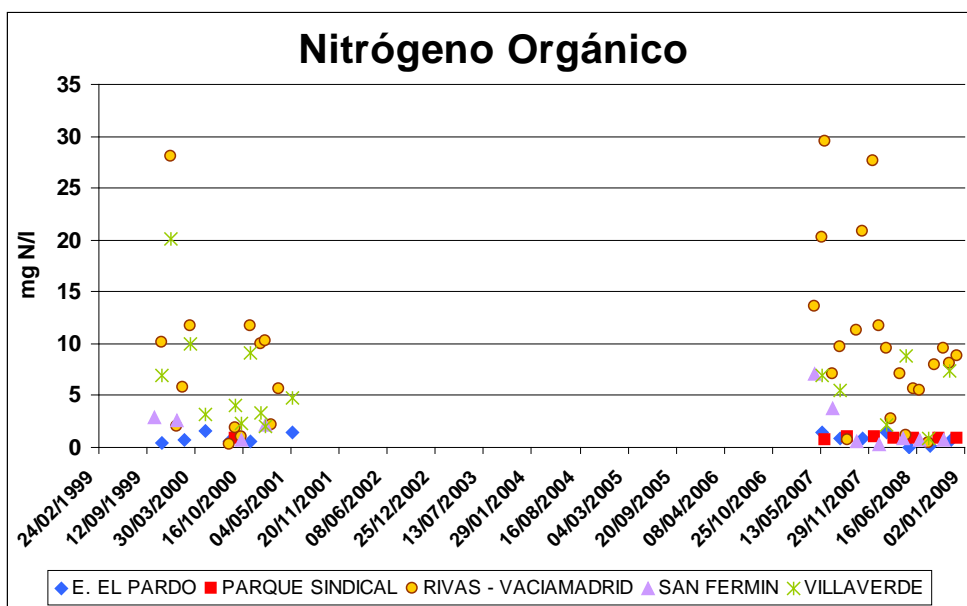


Figura 18. Concentración de nitrógeno orgánico (Norg): Evolución en la red ICA

### Fósforo

En condiciones naturales el fósforo es un elemento escaso en medios acuáticos. Algunos tipos de roca pueden ser una fuente natural de aporte de fósforo en la escorrentía. Dentro de las formas posibles en las que se puede encontrar el fósforo en forma soluble, la más destacable es la de fosfatos ( $PO_4^{3-}$ ) ya que es fácilmente asimilable por las plantas, y por lo tanto es un factor muy importante, junto con el nitrógeno, en los procesos de eutrofización.

Analizando el perfil longitudinal de la cuenca media-baja del río Manzanares se puede apreciar que la concentración de fósforo total sufre un proceso ascendente a lo largo del río. Inicialmente, el agua sale del embalse de El Pardo con concentraciones inferiores a 0.5mgP/l, incrementándose debido a los sucesivos vertidos de las depuradoras de la cuenca, hasta alcanzar una concentración de fósforo total media ligeramente inferior a 3.5mgP/l.

El incremento más fuerte se produce tras el vertido de la EDAR de Viveros y su circulación a lo largo del tramo canalizado de la ciudad de Madrid. Como se comprobará en un punto posterior de la memoria, el vertido de Viveros tiene altas concentraciones de fósforo. Sin embargo, un cambio en el tratamiento reduce estos valores de vertido, viéndose reflejado en un descenso de las concentraciones medidas en la estación ICA de San Fermín.

En la Figura 20, se aprecia la evolución descendente de la concentración de fósforo total medida, y un gran escalón a partir de enero de 2008, momento en el cual el tratamiento de reducción de fósforo se pone en funcionamiento en las mayor parte de las estaciones depuradoras.

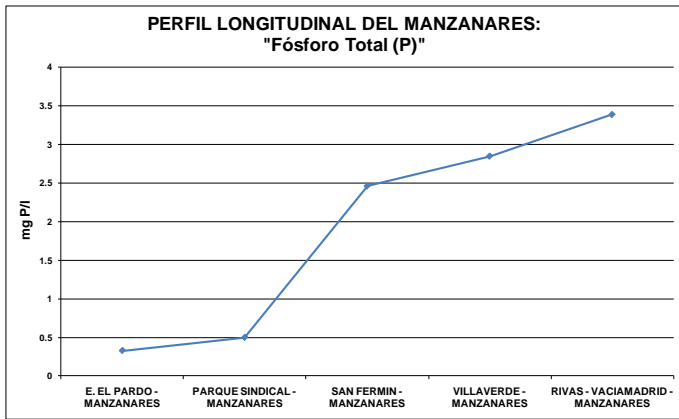


Figura 19. Perfil longitudinal del río Manzanares: Conductividad.

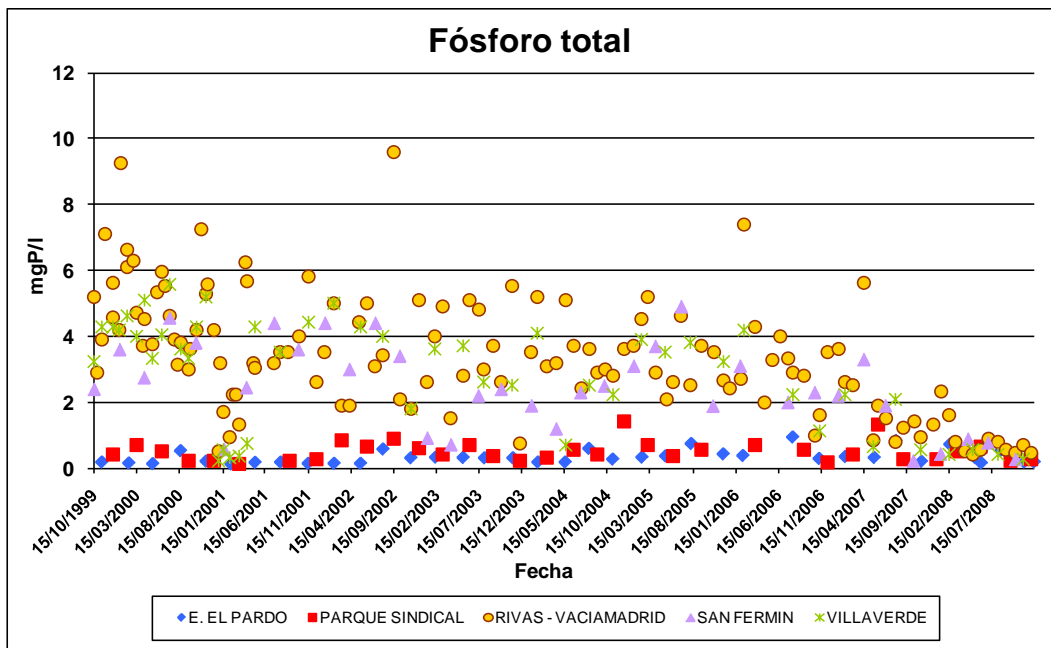


Figura 20. Concentración de fósforo total: Evolución en la red ICA.



## Actividad 2.2. Análisis y caracterización estadística de las variables de entrada al modelo: vertidos, cargas de contaminación y caudales

### Ajuste de las distribuciones de vertido.

En este estudio se recoge el ajuste de las distribuciones de vertido de las depuradoras y de las salidas del embalse de El Pardo, realizados para el análisis estocástico. Este estudio recoge los valores obtenidos de la desviación típica de la serie ajustada, la representación del histograma graficando la función de distribución ajustada, la probabilidad acumulativa de la distribución ajustada y las funciones de densidad de las series.

Este ajuste se ha realizado gracias a la herramienta STATGRAPHICS, en su versión 5.1. Plus, versión en castellano. Se ha empleado el comando:

***“Descripción->Distribuciones->Ajuste de Distribuciones (Datos no censurados)...”***.

Por defecto el programa ajusta la serie a una distribución normal, proporcionando los valores de la media y desviación típica ajustados. De la misma manera, por defecto también muestra los *“Test de Bondad de Ajuste”*. En cuanto a la parte gráfica, aparece por defecto el gráfico de trazas de densidad y el histograma de frecuencias. Opcionalmente (en las opciones gráficas del análisis), también se obtendrá el gráfico de la probabilidad acumulativa de la distribución ajustada, que proporciona mayor ayuda a la hora de comprobar el ajuste de una distribución.

La elección del tipo de distribución para el ajuste puede ser modificada por el usuario, en el caso de que la distribución normal no ajuste. Al cambiar el tipo de distribución del ajuste, se modifican los valores de la media y desviación típica de la distribución escogida. En STATGRAPHICS se disponen de más de una veintena de distribuciones a ajustar a la serie. Sin embargo, puesto que en la herramienta CALRISK empleada para generar las series estocásticas se proponen 4 tipos de distribuciones, tan sólo ajustaremos las series a estas 4 distribuciones. Estas posibles distribuciones son: uniforme, triangular, normal y lognormal.

En el caso de la distribución uniforme, la información proporcionada en el ajuste es el valor mínimo y máximo del intervalo, en lugar de la media y desviación típica, que definen las distribuciones normal y lognormal. En el caso de la distribución triangular, la distribución viene definida por los límites superior e inferior y por el punto intermedio de mayor densidad. Este punto intermedio no tiene la condición de ser el punto medio entre los límites superior e inferior como es el caso de la distribución propuesta para CALRISK.

Para la elección de la distribución que mejor se aproxima a cada serie, se emplea el informe de salida de STATGRAPHICS de ***Test de Bondad de Ajuste***. El propio programa realiza 3 pruebas de bondad del ajuste, tomando como limitante la que peor resultado ofrezca. Este hecho provoca que si alguno de los test resulta negativo, se desecha la hipótesis de bondad de ajuste de la distribución escogida. Este resultado puede ser engañoso, y cuando algún ajuste sea rechazado, se deberá profundizar más en los test válidos y en los gráficos proporcionados por STATGRAPHICS.

Las 3 pruebas de bondad de ajuste que realiza STATGRAPHICS son: el test Chi-cuadrado, y los estadísticos de Kolmogorov-Smirnov y Anderson-Darling. El propio programa emite un informe resumen, en el cual, tras mostrar los resultados de la prueba de bondad, concluye, validando o rechazando la validez del ajuste realizado para un intervalo de confianza indicado. El intervalo de confianza para validar la elección de la distribución en STATGRAPHICS es del 90 %.

Los datos empleados para ajustar las series a un tipo de distribución son, salvo que se indique lo contrario, las series de datos desde enero de 2007. Se han tomado los valores de las series del modelo corto, debido a que su funcionamiento se aproxima más al actual de las estaciones depuradoras, puesto que éstas están en constante remodelación y mejora de los tratamientos.

En los casos en los que la concentración de vertido de una depuradora varía (este cambio puede ser causado por una modificación en el tratamiento), se toman los datos a partir de los cuales la concentración de vertido se ajusta al nuevo comportamiento de la depuradora. Mediante estas diferencias, se puede conocer en qué periodo se realizan las modificaciones y cambios de tratamiento en las estaciones depuradoras.

A continuación se muestran los resultados del ajuste de las distribuciones. A modo de ejemplo, se recoge la información que proporciona STATGRAPHICS, es decir, la información que se ha empleado para tomar la decisión del ajuste. Se adjuntan tanto los informes del ajuste de la distribución como el informe de la prueba de bondad del ajuste y los citados gráficos de salida. En el resumen se realiza para el primer caso: caudal de salida del embalse de El Pardo. En el resto de casos tan sólo se mostrarán los valores finales de los parámetros de la distribución ajustada y gráficos de salida obtenidos.

## *Caudales*

### **- Salidas El Pardo**

#### **Resumen del Análisis**

Datos: Sal\_Emb\_ElPardo

21 valores comprendidos desde 0.34 hasta 2.12

Distribución lognormal ajustada:

media = 0.971039

desviación típica = 0.702532

#### **El StatAdvisor**

-----

Este resultado muestra los resultados del ajuste a distribución lognormal a los datos en Sal\_Emb\_ElPardo. Se muestran los parámetros estimados de la distribución ajustada. Puede comprobar si el distribución lognormal ajusta los datos adecuadamente seleccionando Test de Bondad de Ajuste de la listas de Opciones Tabulares. Puede evaluar visualmente como se

ajusta distribución lognormal seleccionando Histograma de Frecuencia de la lista de Opciones Gráficas. Otras opciones dentro del procedimiento le permiten calcular y mostrar las áreas de cola y los valores críticos para la distribución. Para seleccionar una distribución diferente, pulse el botón derecho del ratón y seleccione Opciones del Análisis.

**Test de Bondad de Ajuste para Sal\_Emb\_ElPardo**

Contraste Chi-cuadrado

Límite Inferior	Límite Superior	Frecuencia Observada	Frecuencia Esperada	Chi-cuadrado
menor o igual	0.419978	4	3.50	0.07
0.419978	0.594916	5	3.50	0.64
0.594916	0.78673	1	3.50	1.79
0.78673	1.04039	4	3.50	0.07
1.04039	1.47375	2	3.50	0.64
mayor	1.47375	5	3.50	0.64

Chi-cuadrado = 3.85722 con 3 g.l. P-Valor = 0.277297

Estadístico DMAS de Kolmogorov = 0.176872

Estadístico DMENOS de Kolmogorov = 0.119108

Estadístico DN global de Kolmogorov = 0.176872

P-Valor aproximado = 0.54274

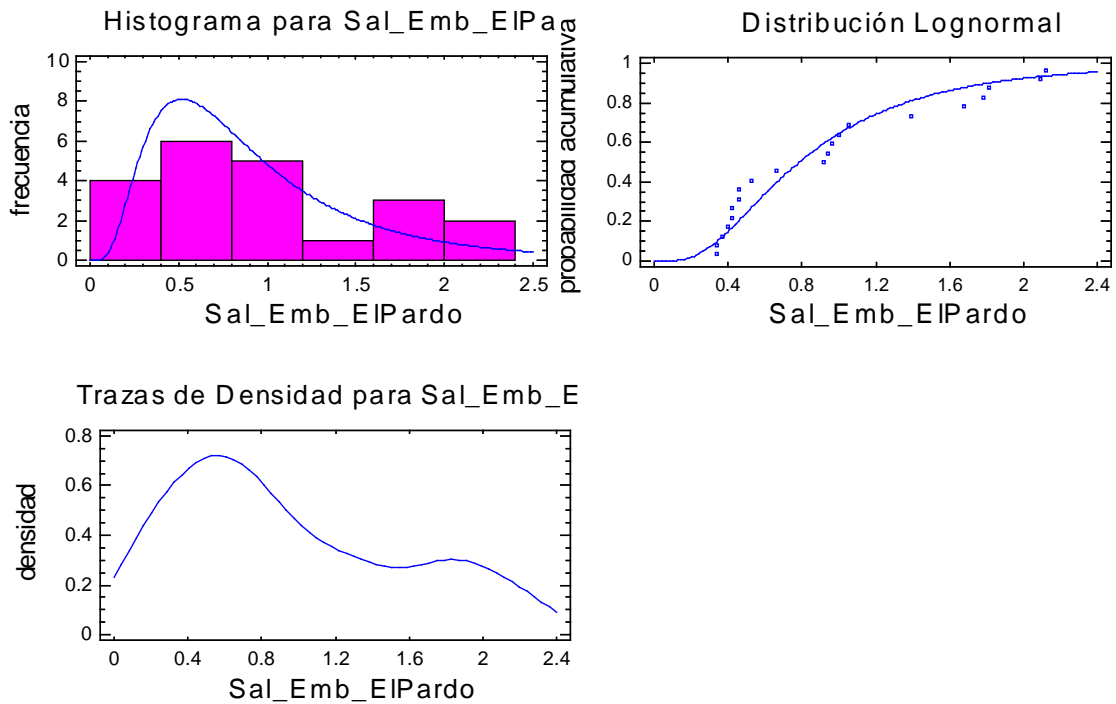
Estadístico EDF	Valor	Forma Modificada	P-Valor
Kolmogorov-Smirnov D	0.176872	0.836001	>=0.10
Anderson-Darling A^2	0.727822	0.727822	>=0.10

\*Indica que el p-valor se ha comparado con las tablas de valores críticos especialmente construido para el ajuste de la distribución actualmente seleccionada. Otros p-valores están basados en tablas generales y pueden ser muy conservadores.

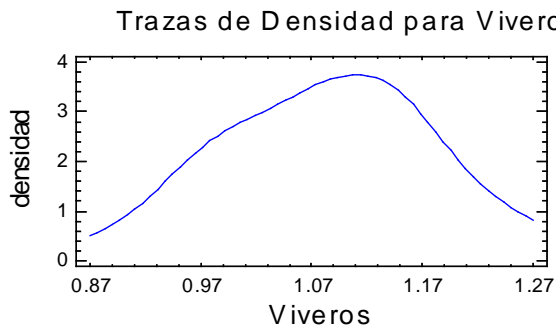
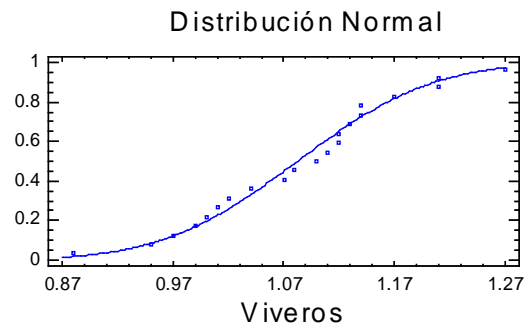
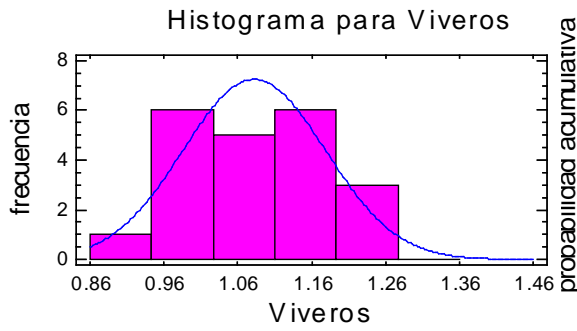
### El StatAdvisor

Esta ventana muestra los resultados de los test ejecutados para determinar si Sal\_Emb\_EIPardo puede ser modelado adecuadamente por distribución lognormal. El test Ji-cuadrado divide el rango de Sal\_Emb\_EIPardo en intervalos no solapados y compara el número de observaciones en cada clase con el número esperado basado en la distribución ajustada. El test de Kolmogorov-Smirnov calcula la distancia máxima entre la distribución acumulada de Sal\_Emb\_EIPardo y el CDF de la distribución lognormal ajustada. En este caso, la distancia máxima es 0.176872. Los otros estadísticos EDF comparan de diferentes maneras la función de distribución empírica con el CDF ajustado.

Dado que p-valor más pequeño de los test realizados es superior o igual a 0.10, no podemos rechazar que Sal\_Emb\_EIPardo proceda de una distribución lognormal con un nivel de confianza de al menos un 90%.

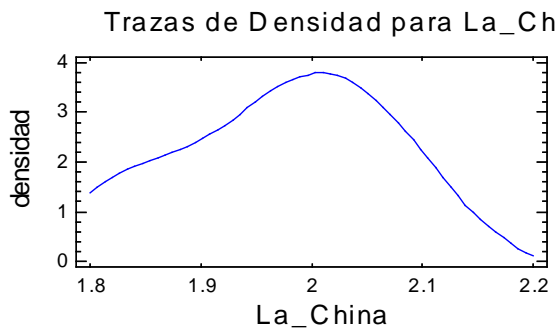
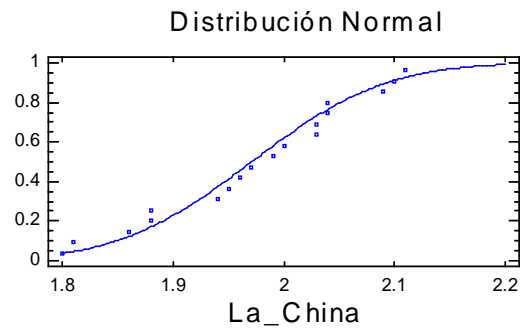
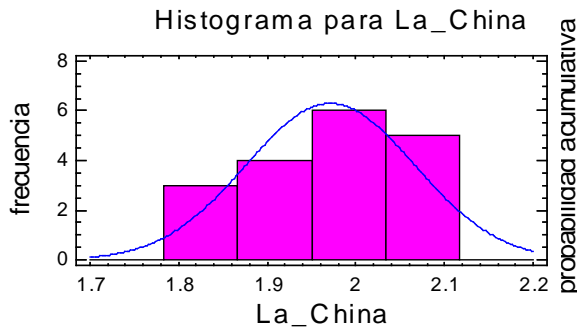


**- Viveros**



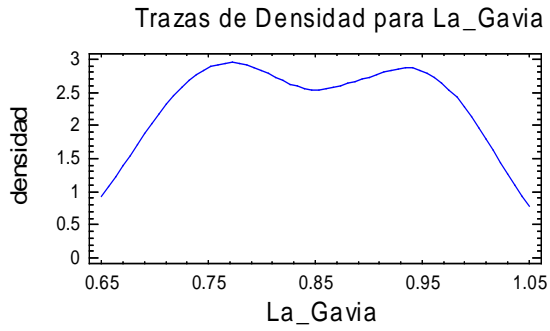
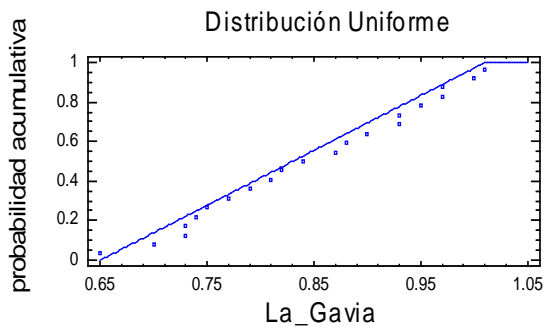
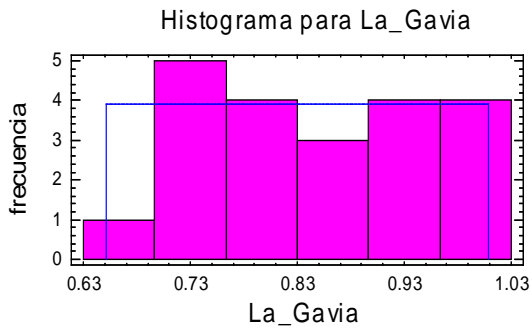
Distribución normal ajustada	
Media =	1.08238
Desv.Típica =	0.0963797

**- La China**



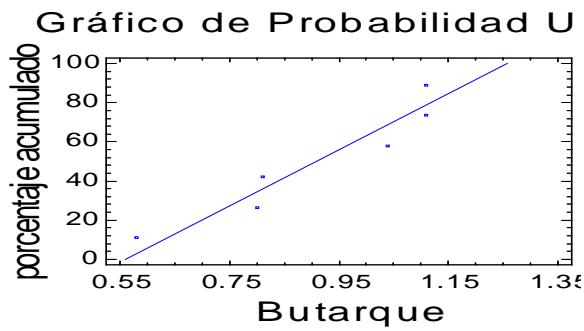
Distribución normal ajustada	
Media =	1.97111
Desv.Típica =	0.0949854

**- La Gavia**



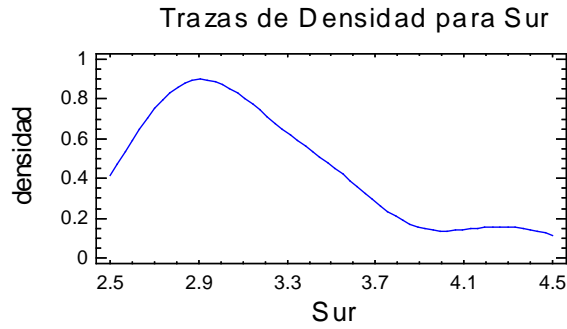
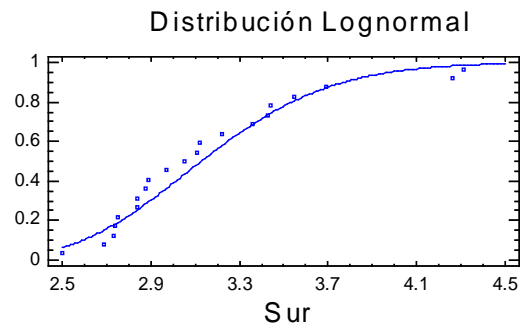
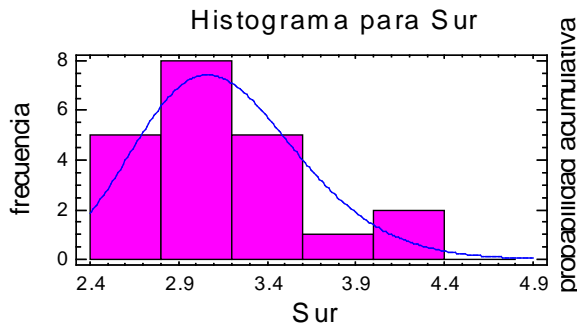
Distribución uniforme ajustada	
Lím. inferior =	0.65
Lím. superior =	1.01

**- Butarque**



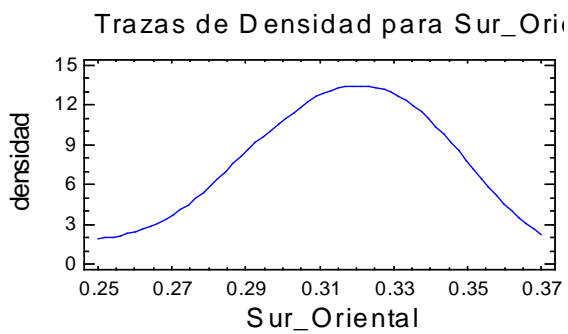
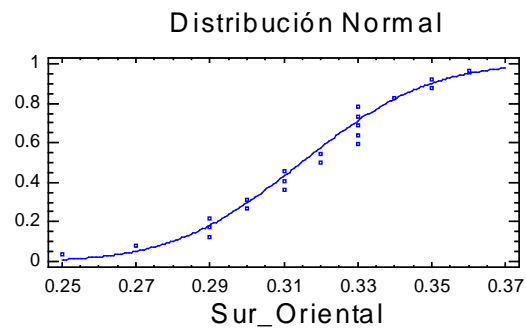
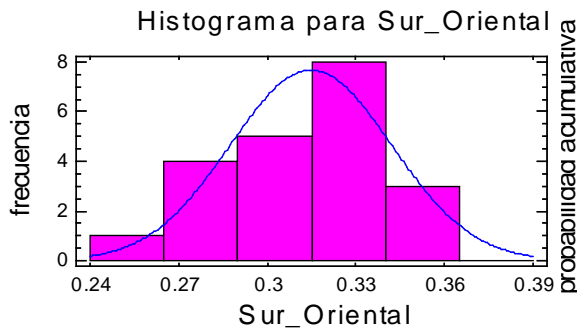
Distribución uniforme ajustada	
Lím. inferior =	0.55
Lím. superior =	1.15

- Sur



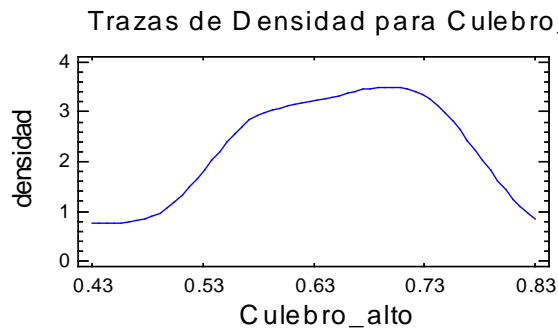
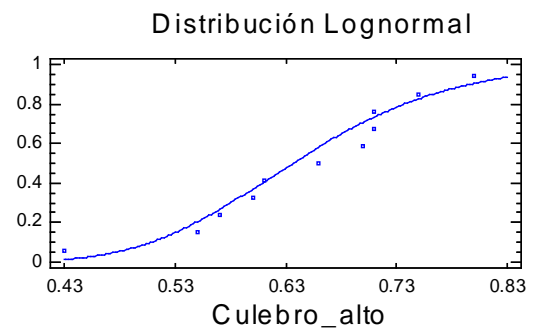
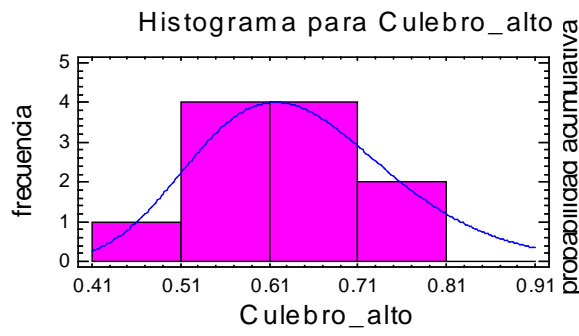
Distribución lognormal ajustada	
Media =	3.16092
Desv.Típica =	0.463623

- Sur Oriental



Distribución normal ajustada	
Media =	0.314762
Desv.Típica =	0.0273165

- Culebro alto

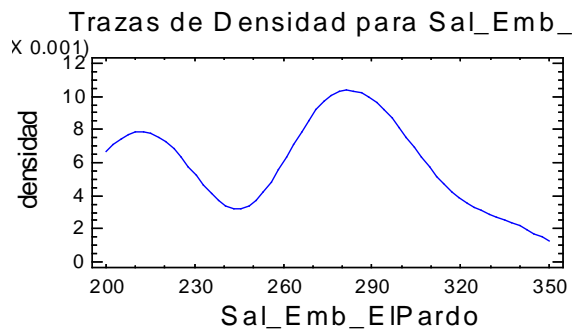
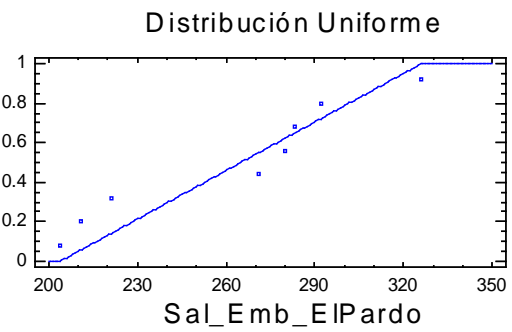
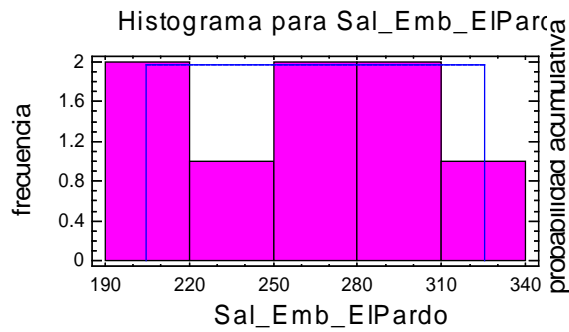


Distribución lognormal ajustada	
Media =	0.645871
Desv.Típica =	0.113863



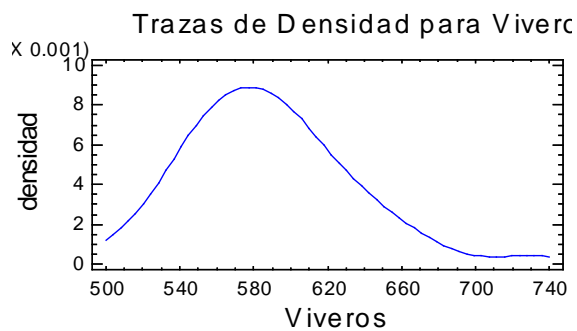
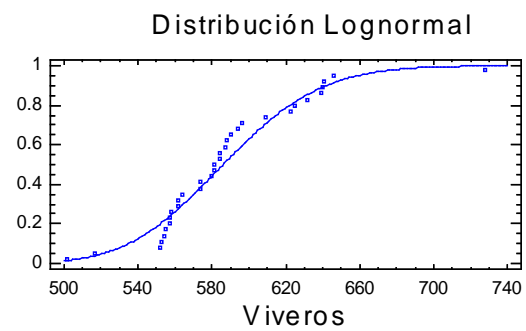
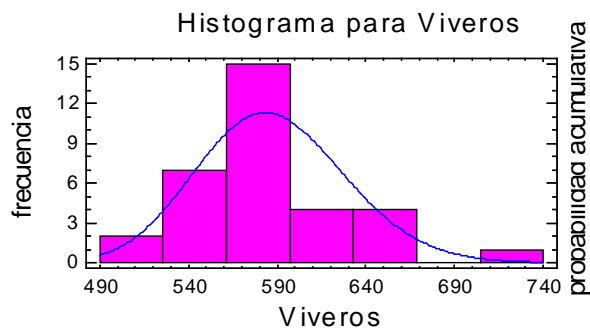
## Conductividad

### - Salidas El Pardo



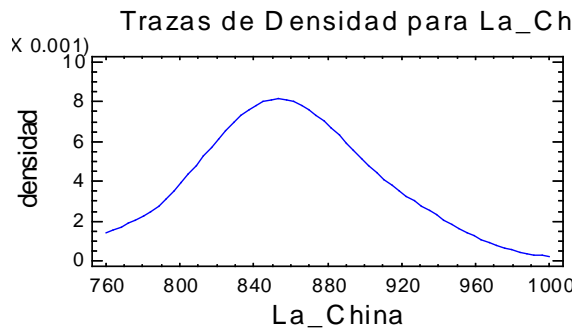
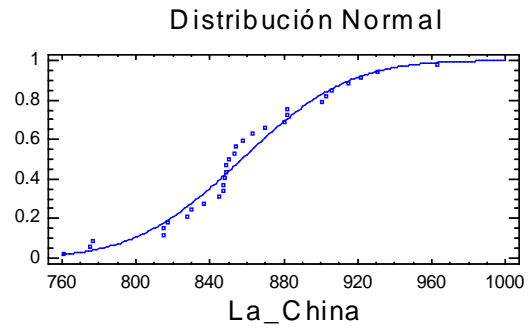
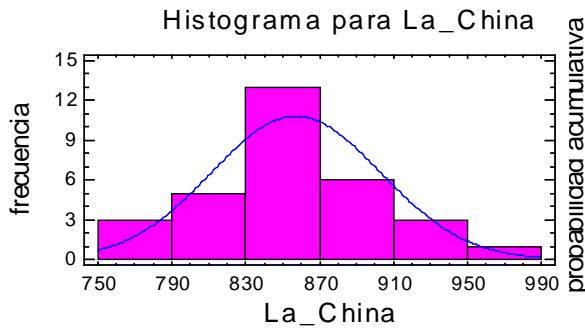
Distribución uniforme ajustada	
Lím. inferior =	205
Lím. superior =	325

### - Viveros



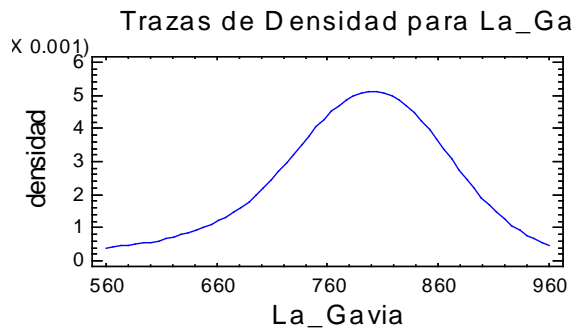
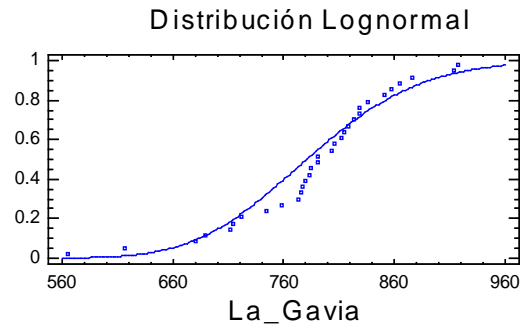
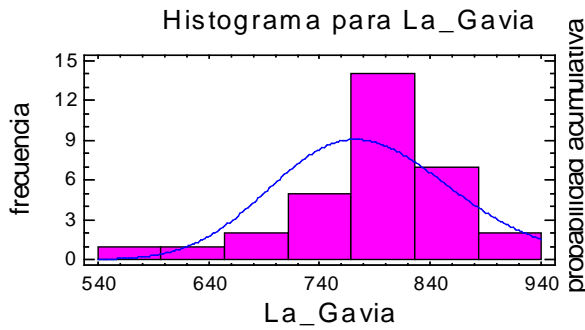
Distribución lognormal ajustada	
Media =	587.569
Desv. Típica =	41.8381

**- La China**



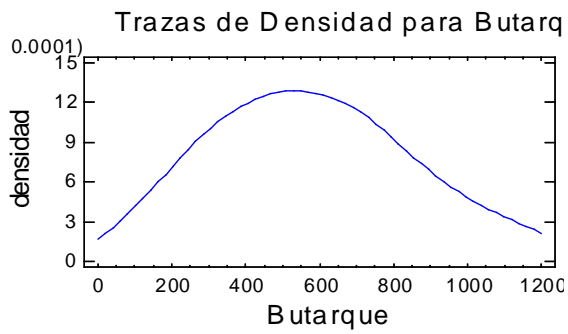
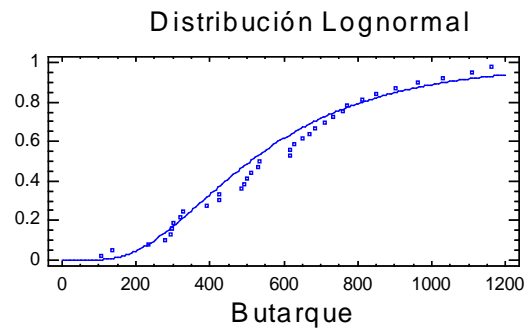
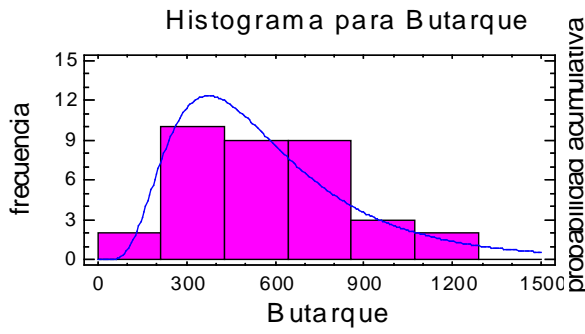
Distribución normal ajustada	
Media =	857.194
Desv.Típica =	45.754

**- La Gavia**



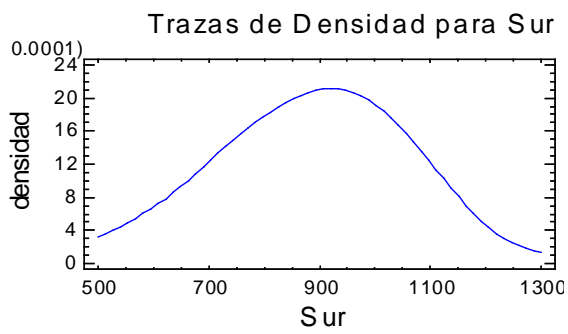
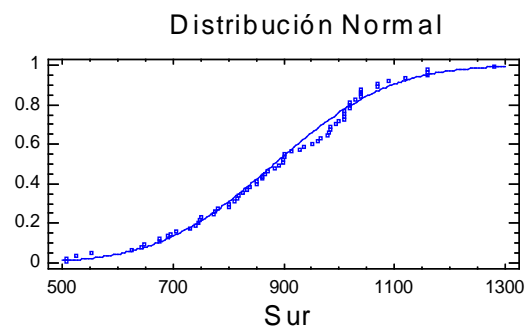
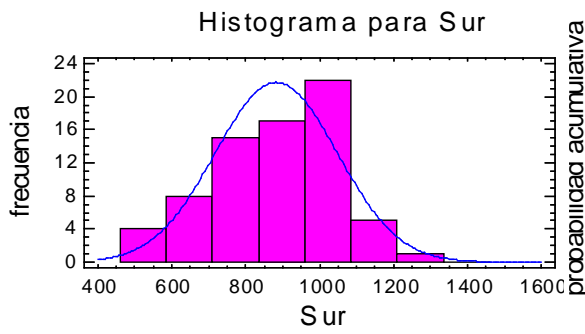
Distribución lognormal ajustada	
Media =	784.821
Desv.Típica =	81.5742

**- Butarque**



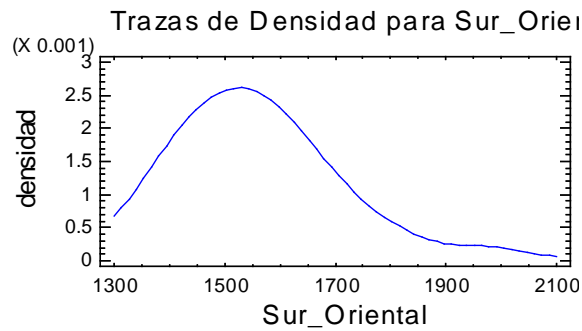
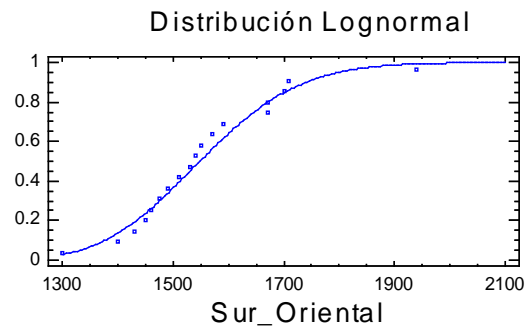
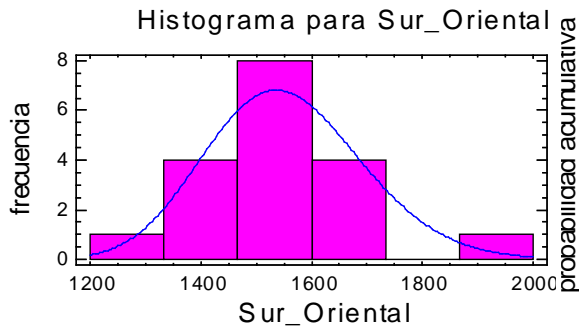
Distribución lognormal ajustada	
Media =	594.157
Desv. Típica =	357.107

**- Sur**



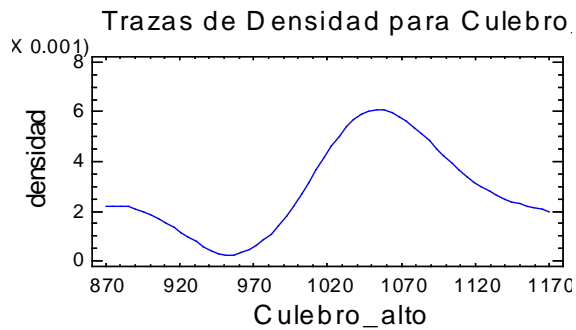
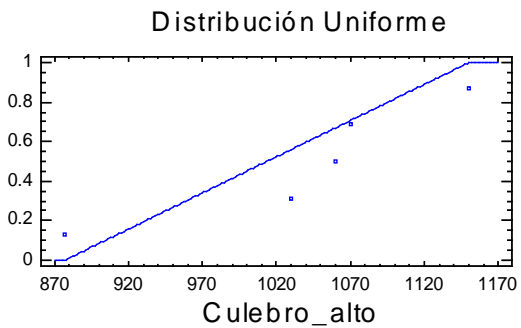
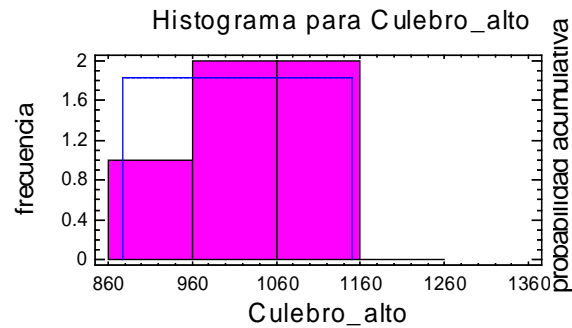
Distribución normal ajustada	
Media =	882.75
Desv. Típica =	165.428

**- Sur Oriental**



Distribución lognormal ajustada	
Media =	1555.1
Desv.Típica =	141.956

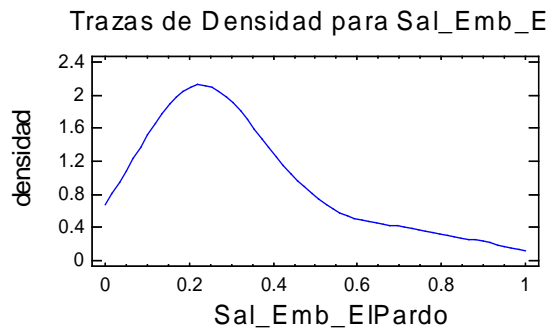
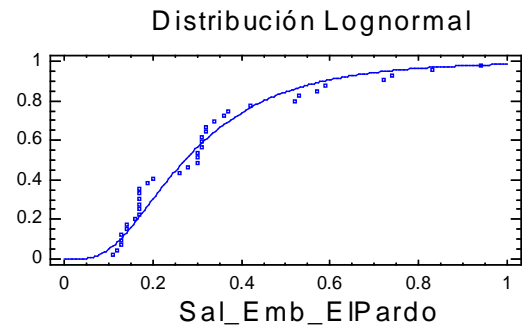
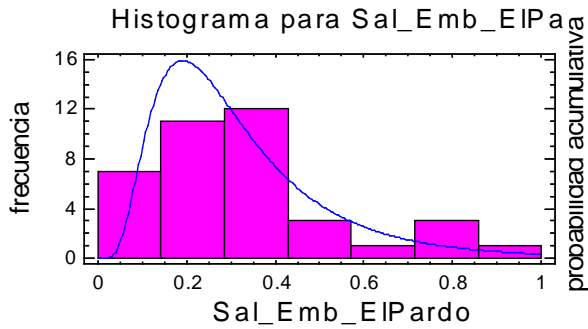
**- Culebro alto**



Distribución uniforme ajustada	
Lím. inferior =	877.0
Lím. superior =	1150.0

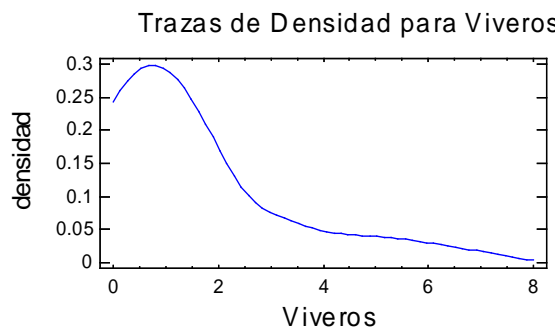
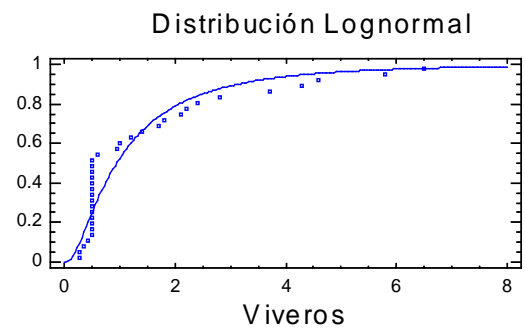
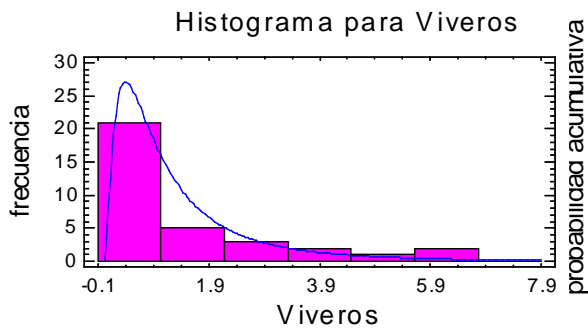
## Fósforo total

### - Salidas El Pardo



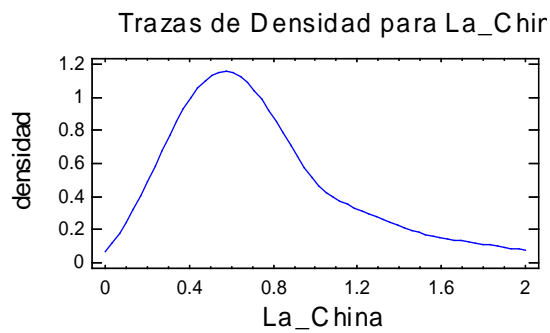
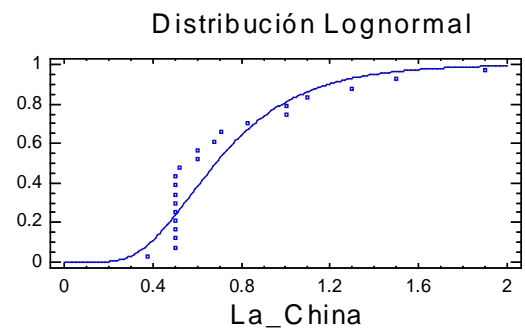
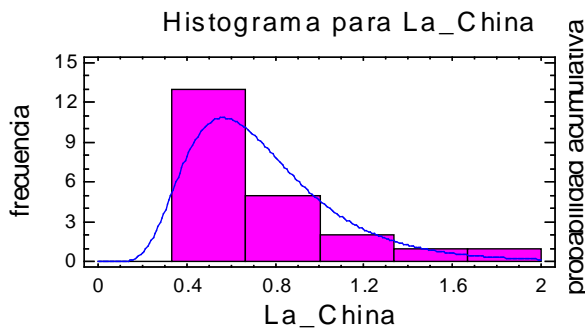
Distribución lognormal ajustada	
Media =	0.325794
Desv.Típica =	0.212615

### -Viveros



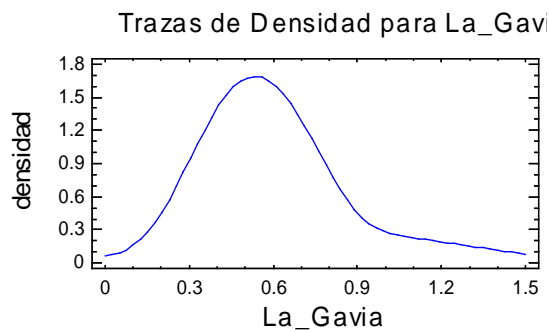
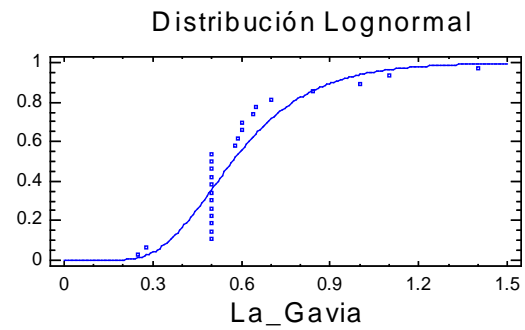
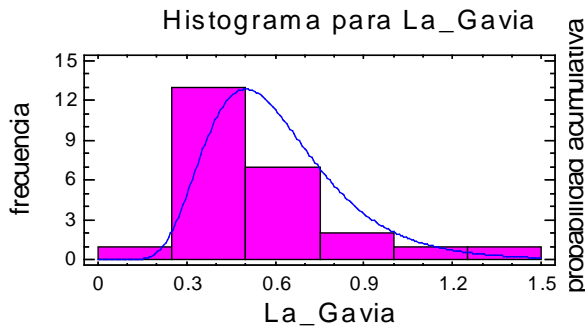
Distribución lognormal ajustada	
Media =	1.46424
Desv.Típica =	1.71661

**- La China**



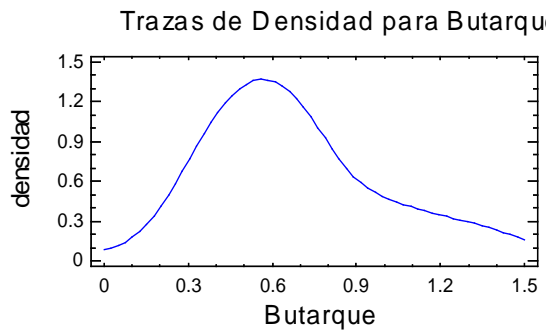
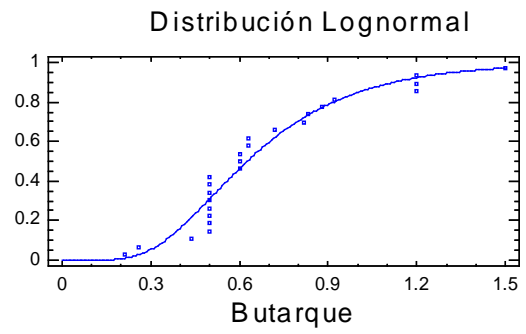
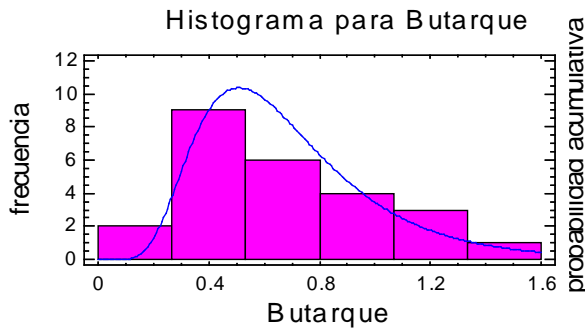
Distribución lognormal ajustada	
Media =	0.7505
Desv.Típica =	0.3421

**- La Gavia**



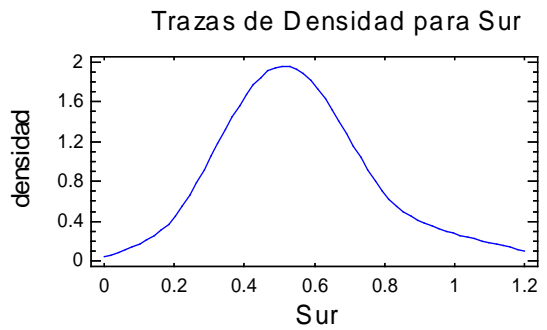
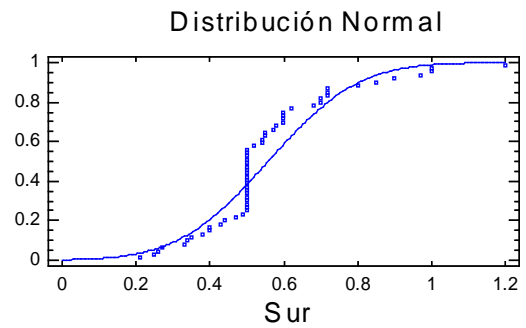
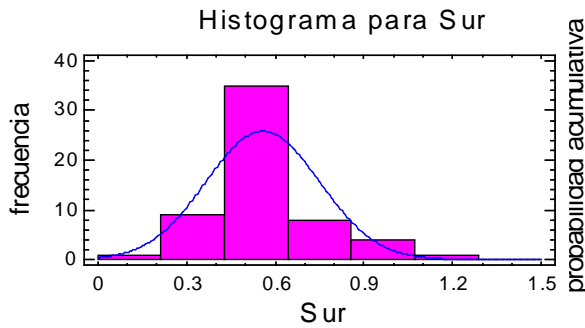
Distribución lognormal ajustada	
Media =	0.609131
Desv.Típica =	0.229133

**- Butarque**



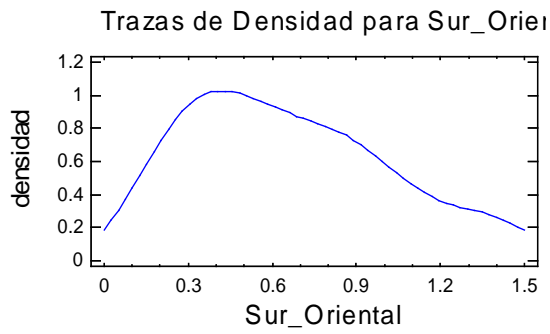
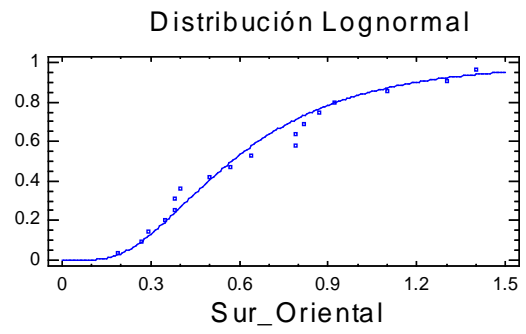
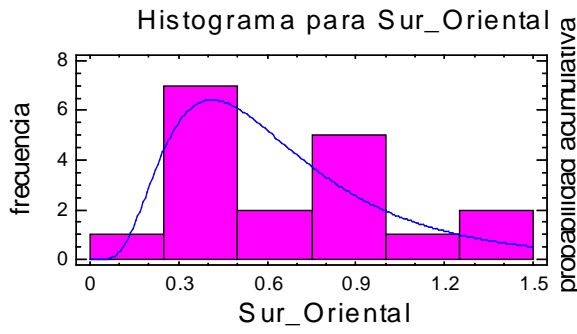
Distribución lognormal ajustada	
Media =	0.694491
Desv.Típica =	0.333096

**- Sur**



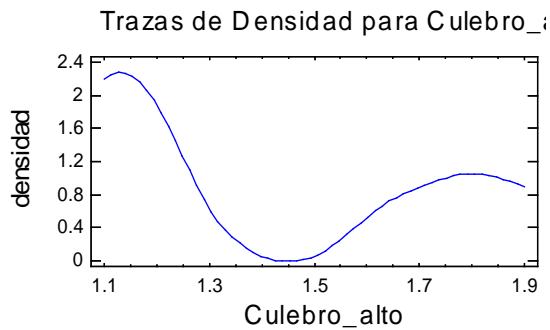
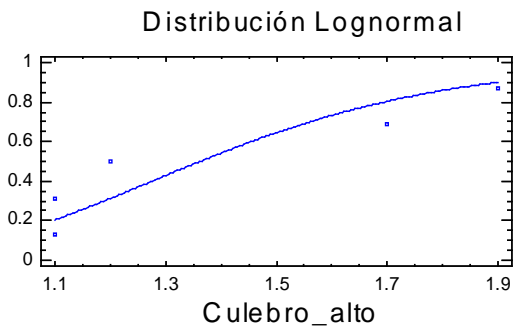
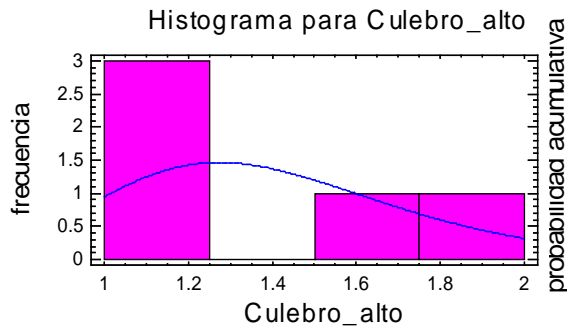
Distribución normal ajustada	
Media =	0.557759
Desv.Típica =	0.191934

**- Sur Oriental.**



Distribución lognormal ajustada	
Media =	0.67647
Desv.Típica =	0.423277

**- Culebro alto**

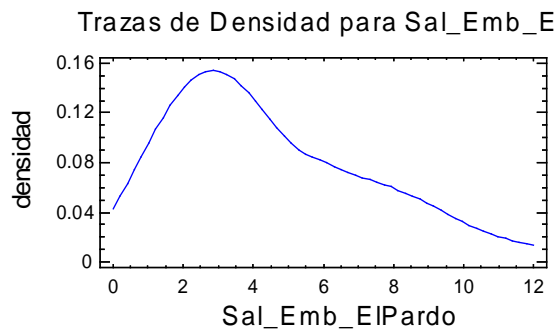
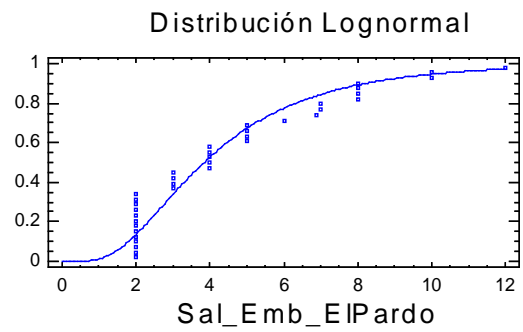
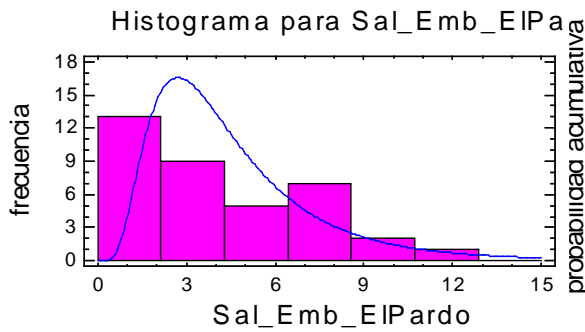


Distribución lognormal ajustada	
Media =	1.40846
Desv.Típica =	0.370251



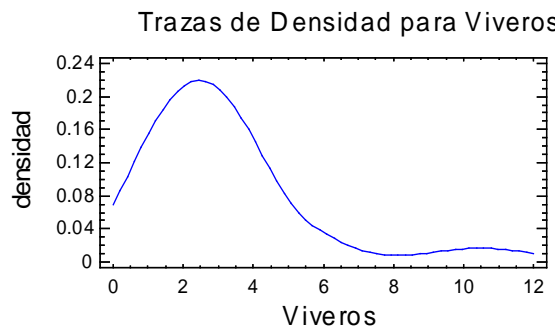
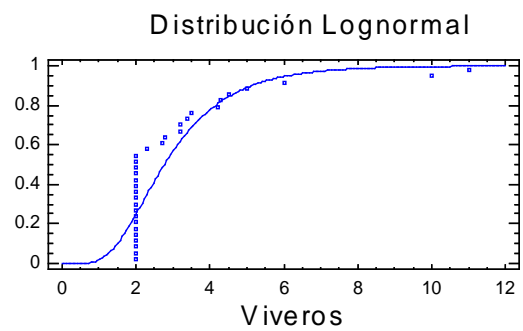
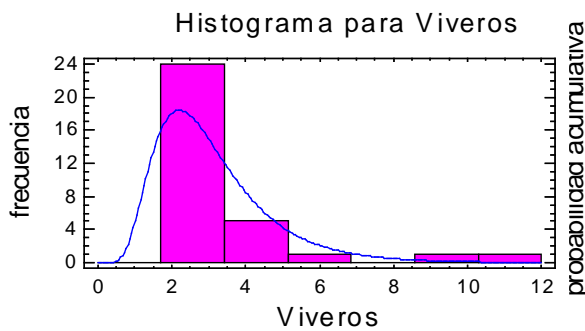
*DBO<sub>5</sub>*

- Salidas El Pardo



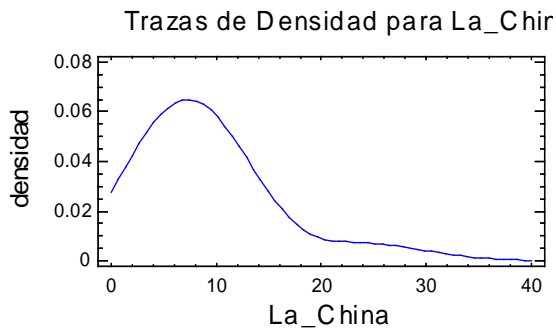
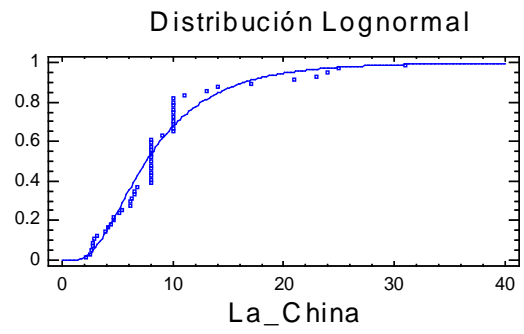
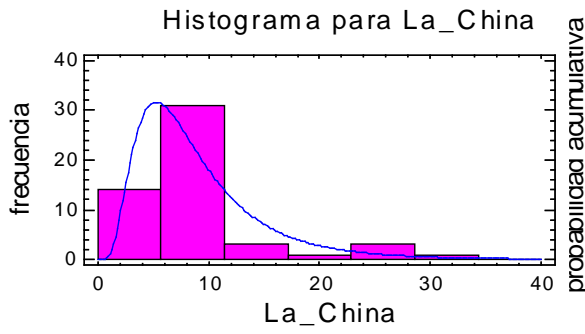
Distribución lognormal ajustada	
Media =	4.57699
Desv.Típica =	2.96455

- Viveros



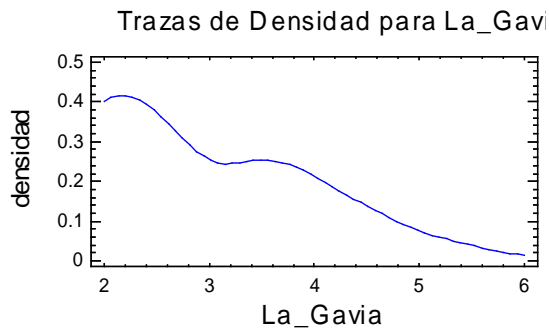
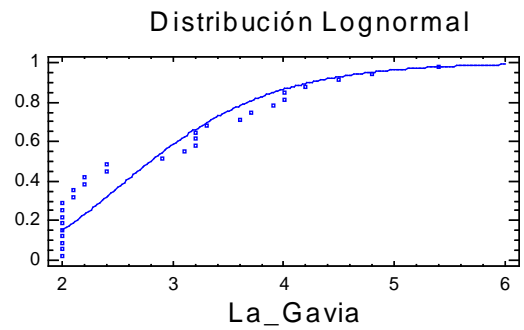
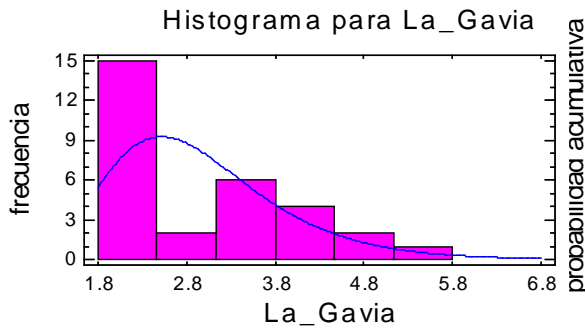
Distribución lognormal ajustada	
Media =	3.11323
Desv.Típica =	1.58951

**- La China**



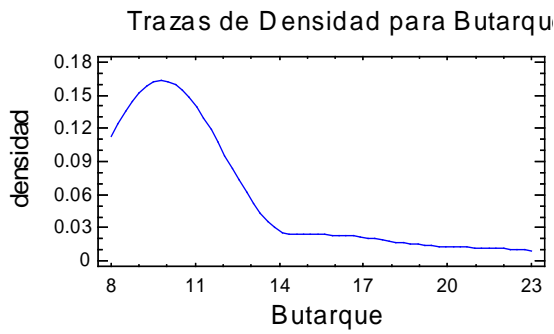
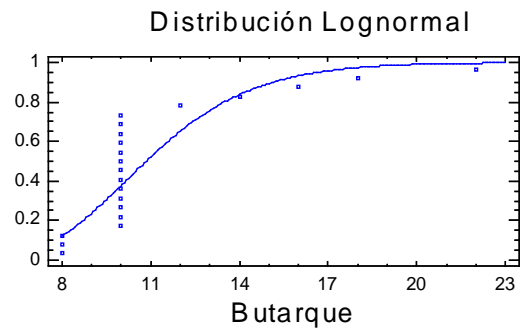
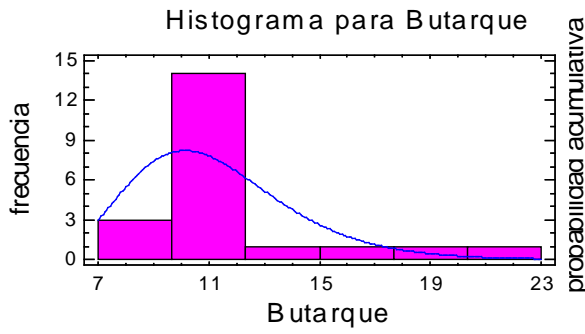
Distribución lognormal ajustada	
Media =	9.11176
Desv.Típica =	6.04736

**- La Gavia**



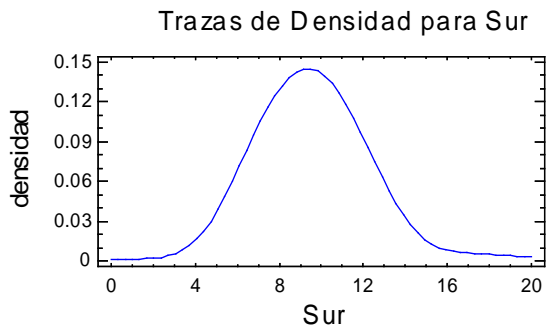
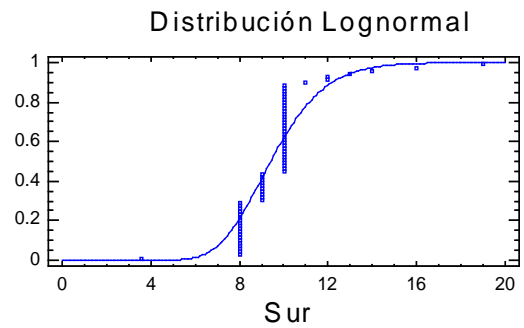
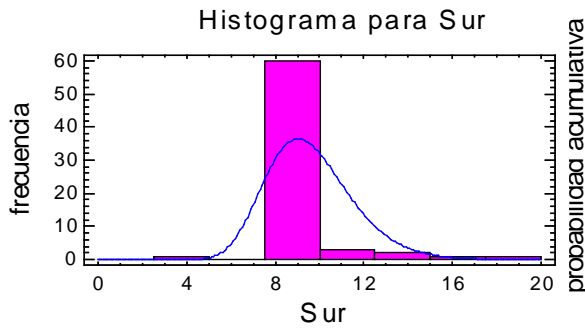
Distribución lognormal ajustada	
Media =	2.94739
Desv.Típica =	0.982687

**- Butarque**



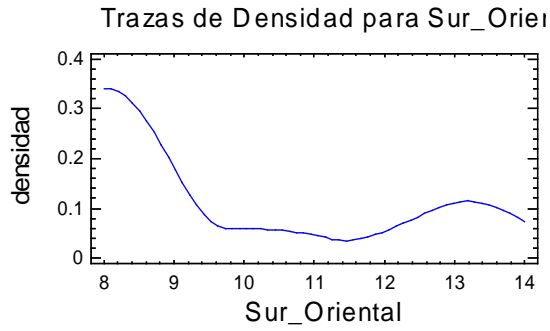
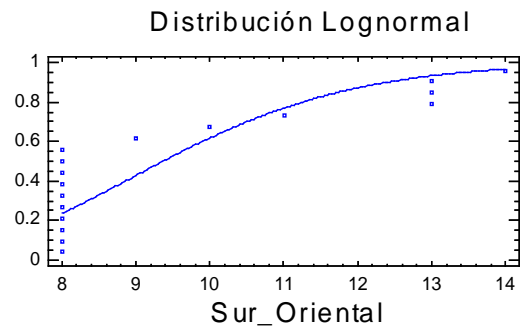
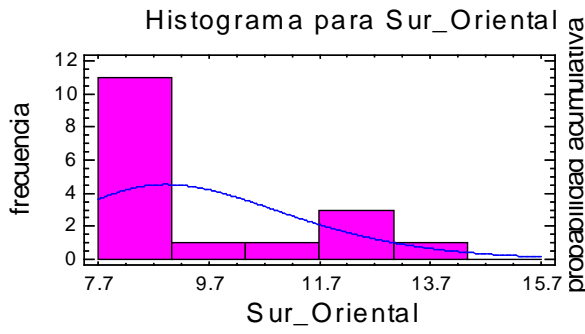
Distribución lognormal ajustada	
Media =	11.2122
Desv.Típica =	2.95945

**- Sur**



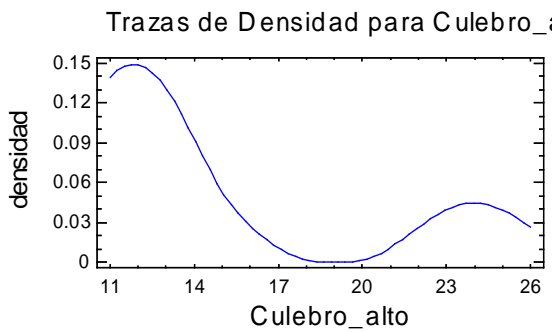
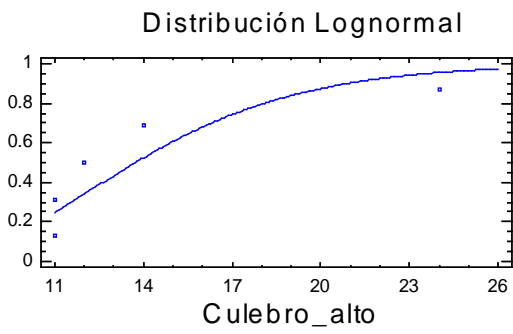
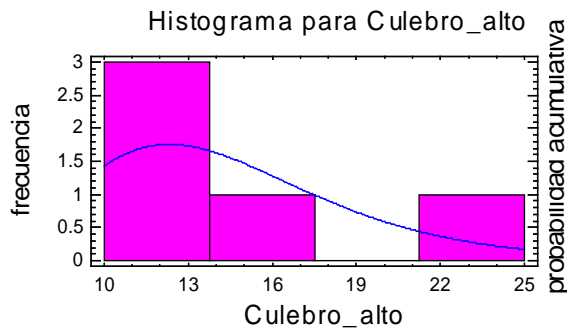
Distribución lognormal ajustada	
Media =	9.60302
Desv.Típica =	1.96156

**- Sur Oriental**



Distribución lognormal ajustada	
Media =	9.5899
Desv.Típica =	2.12128

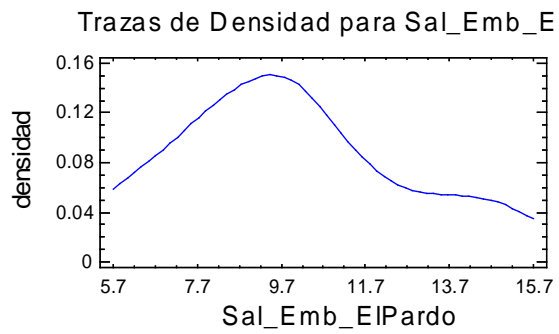
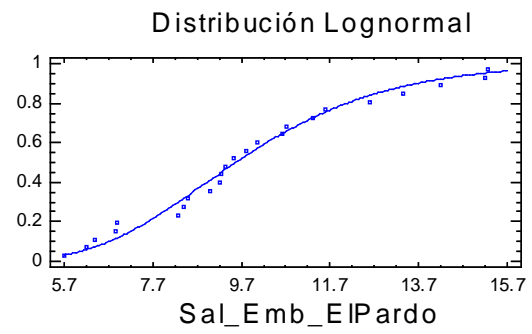
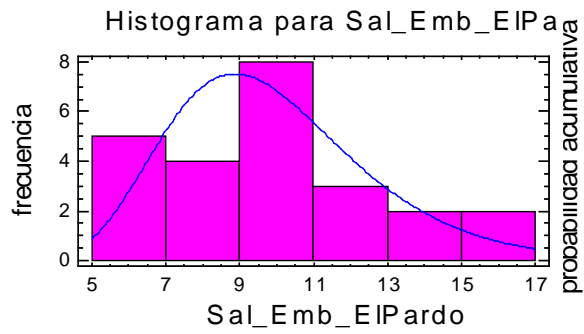
**- Culebro alto**



Distribución lognormal ajustada	
Media =	14.4855
Desv.Típica =	4.87214

# Oxígeno Disuelto

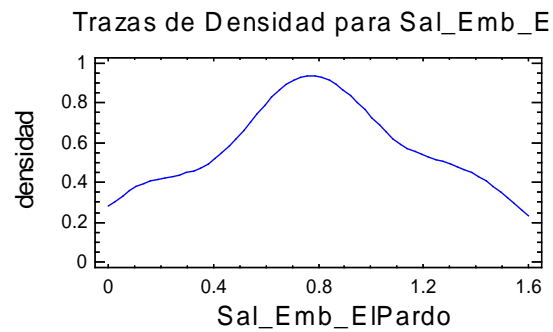
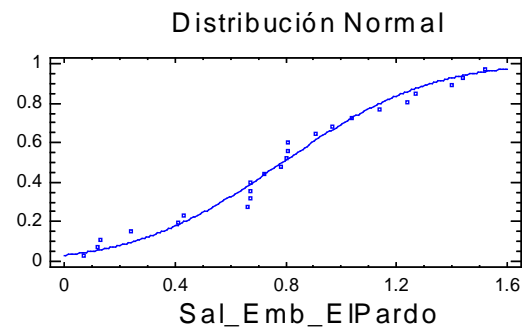
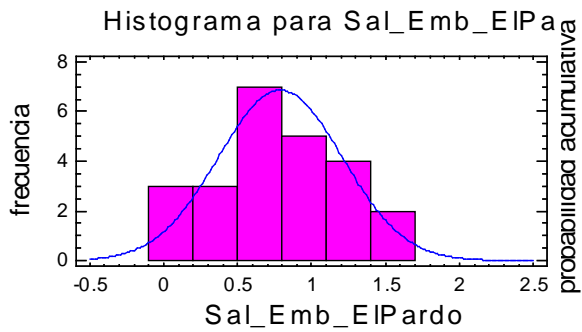
## - Salidas El Pardo



Distribución lognormal ajustada	
Media =	9.94706
Desv.Típica =	2.80451

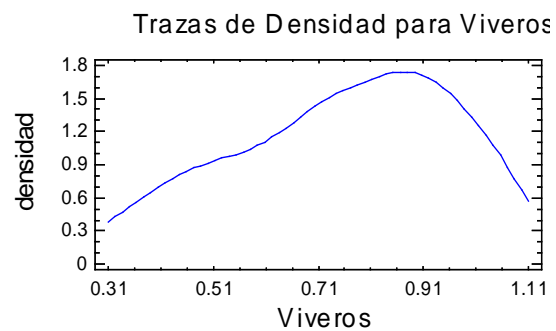
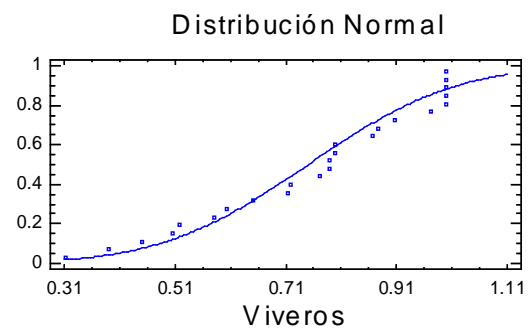
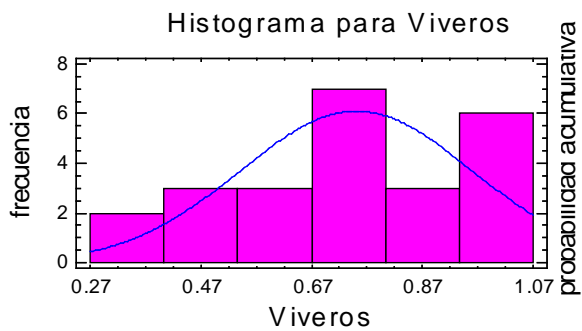
## Nitrógeno Orgánico

### - Salidas El Pardo



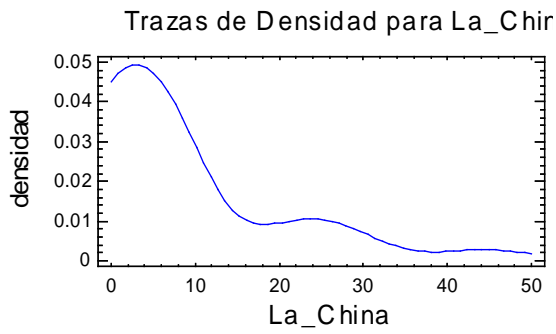
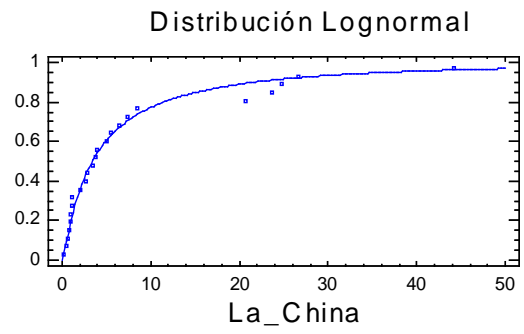
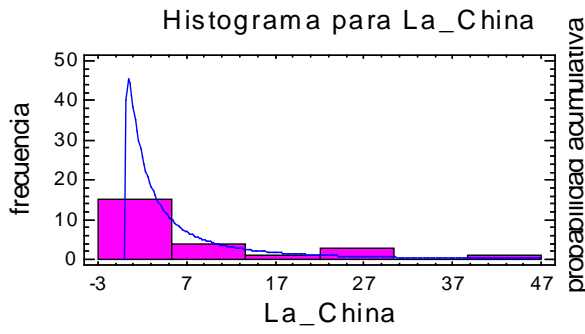
Distribución normal ajustada	
Media =	0.788333
Desv.Típica =	0.418981

### - Viveros



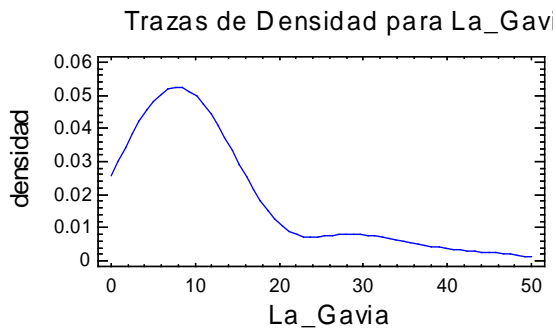
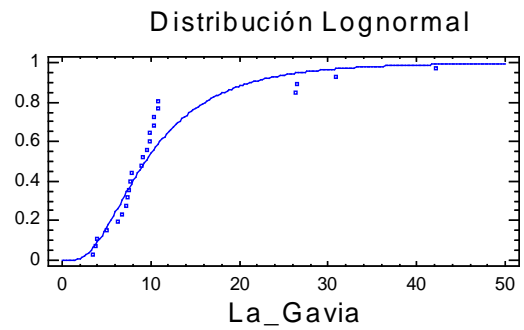
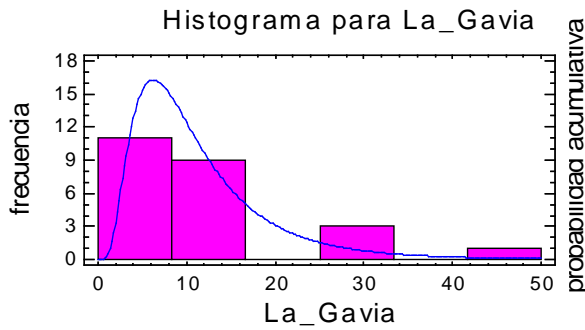
Distribución normal ajustada	
Media =	0.750657
Desv.Típica =	0.209343

**- La China**



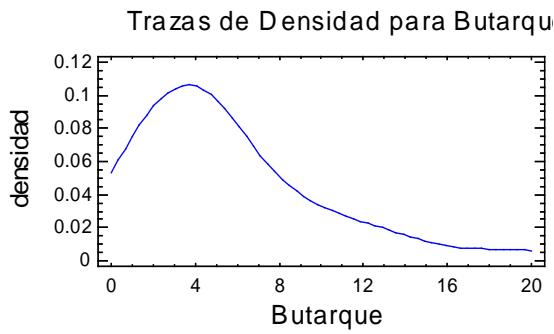
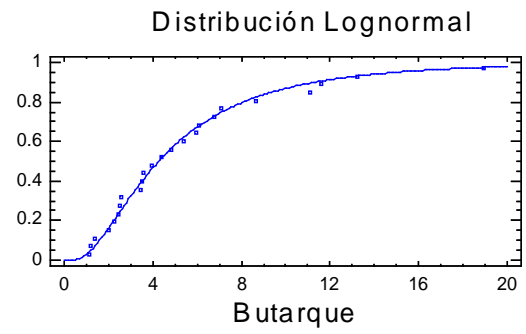
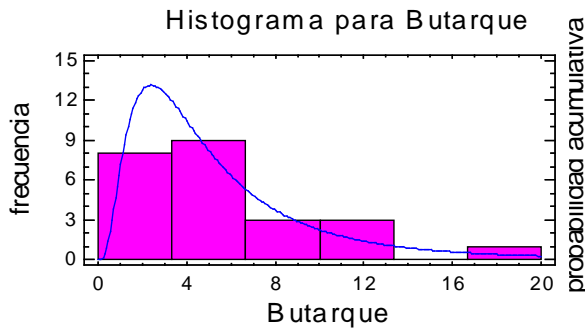
Distribución lognormal ajustada	
Media =	9.59978
Desv.Típica =	25.1146

**- La Gavia**



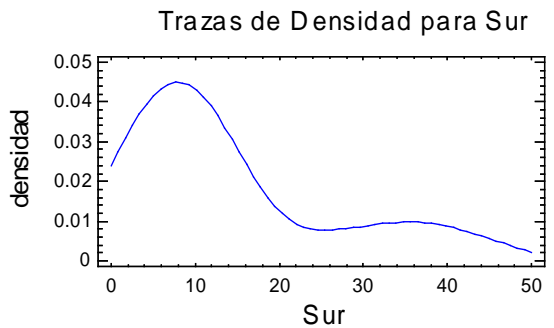
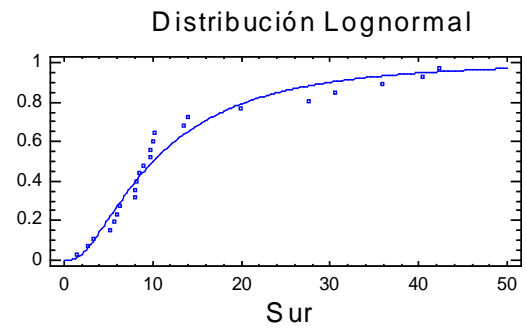
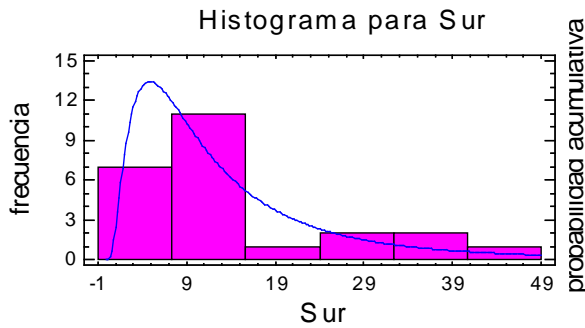
Distribución lognormal ajustada	
Media =	11.5444
Desv.Típica =	8.18922

**- Butarque**



Distribución lognormal ajustada	
Media =	5.68868
Desv.Típica =	5.0187

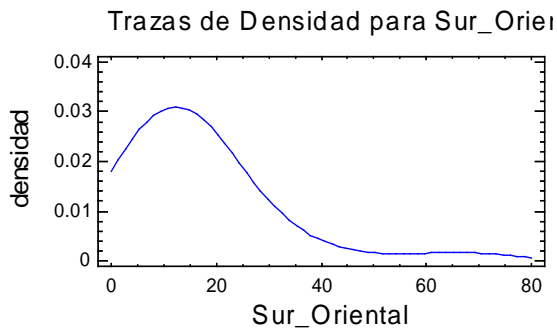
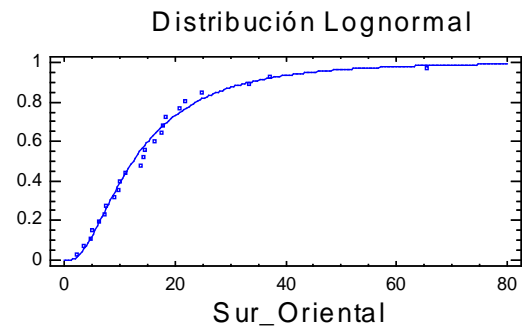
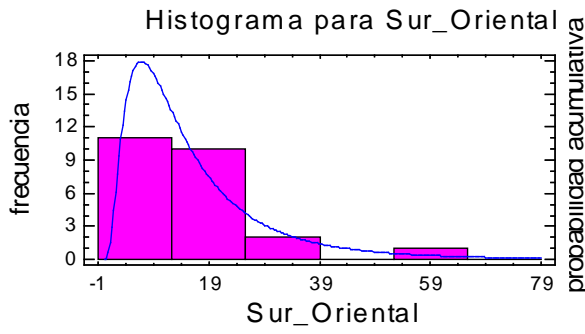
**- Sur**



Distribución lognormal ajustada	
Media =	14.4234
Desv.Típica =	14.9014

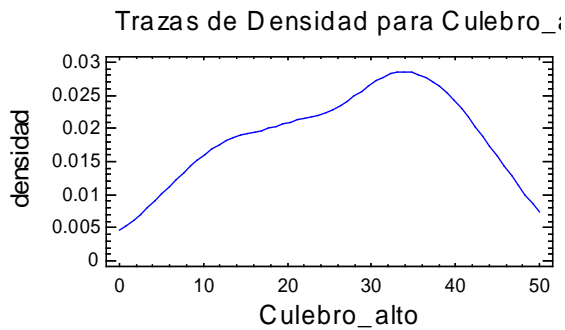
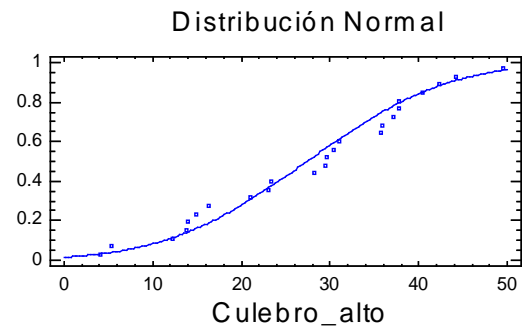
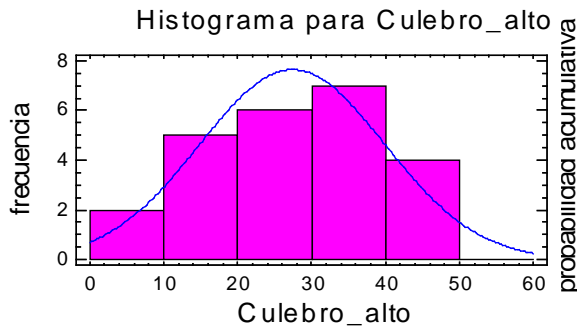


**- Sur Oriental**



Distribución lognormal ajustada	
Media =	16.7621
Desv.Típica =	15.115

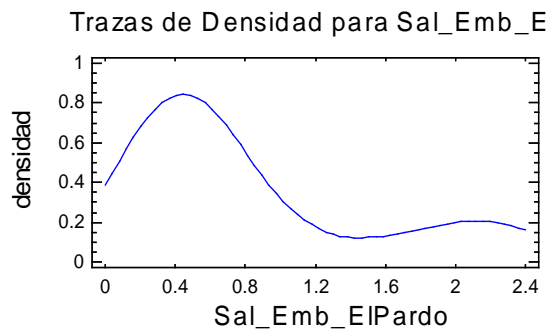
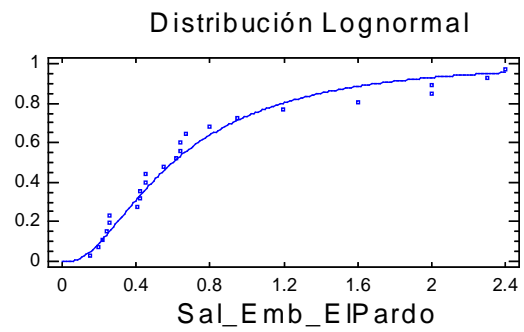
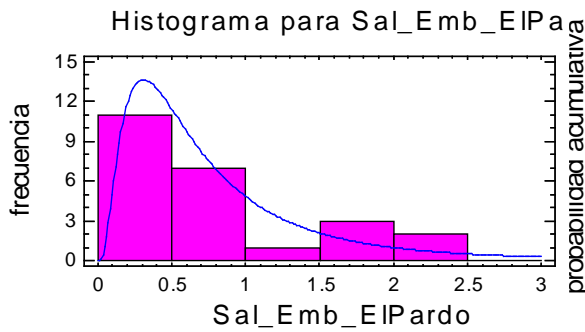
**- Culebro alto**



Distribución normal ajustada	
Media =	27.39
Desv.Típica =	12.5342

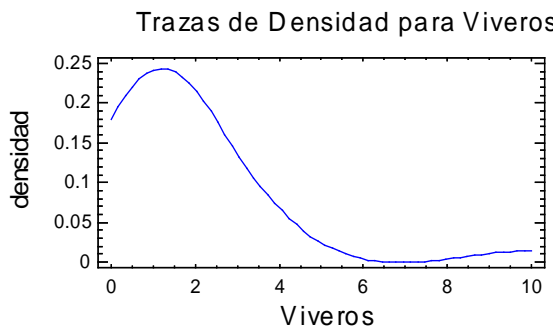
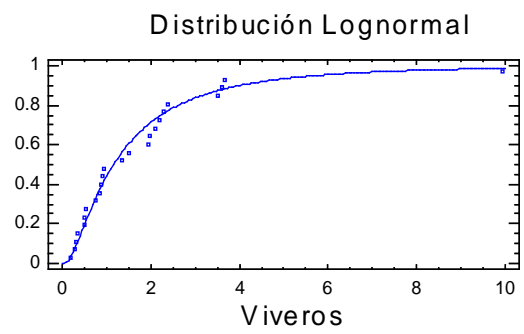
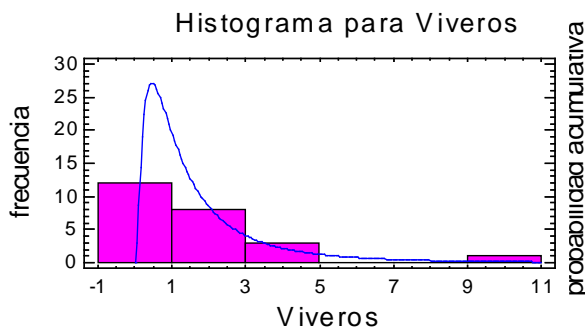
Amonio

- Salidas El Pardo



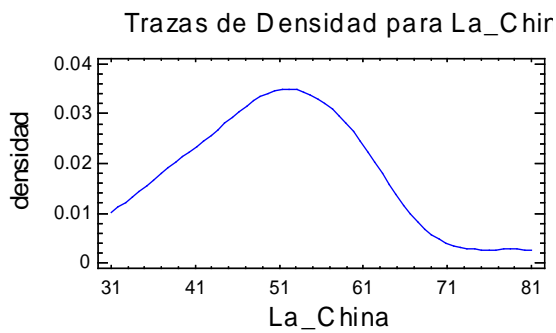
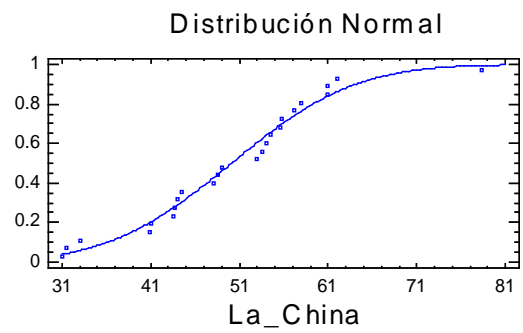
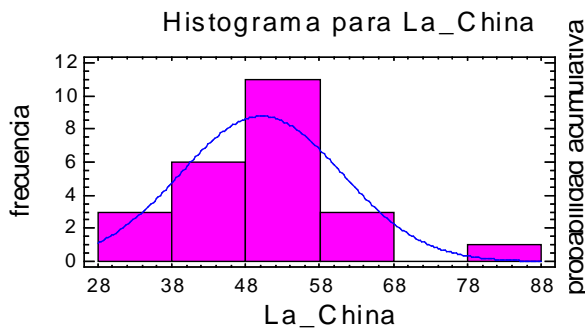
Distribución lognormal ajustada	
Media =	0.837245
Desv.Típica =	0.814973

- Viveros



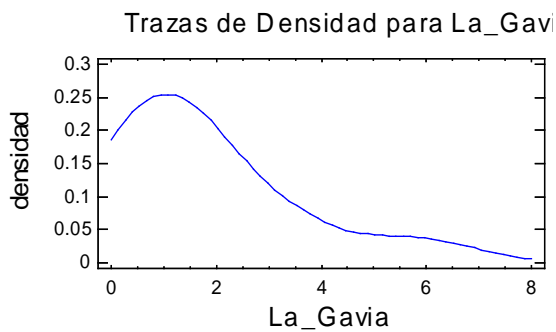
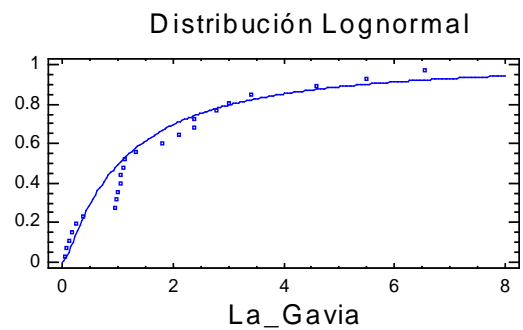
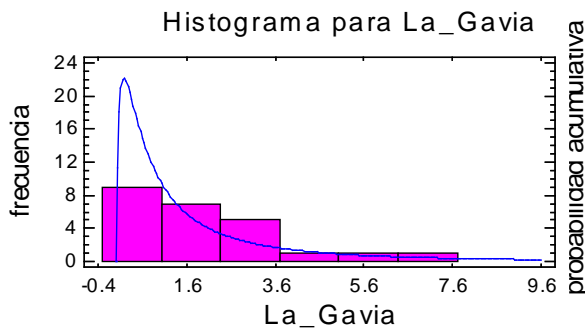
Distribución lognormal ajustada	
Media =	1.85268
Desv.Típica =	2.2894

**- La China**



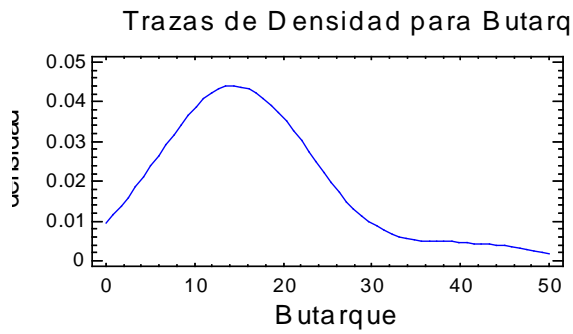
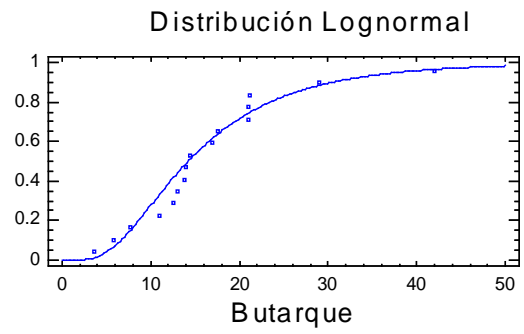
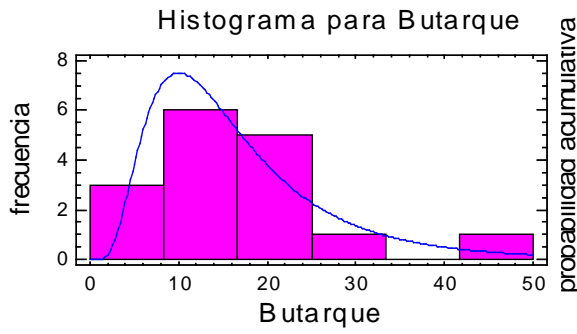
Distribución normal ajustada	
Media =	50.1088
Desv.Típica =	10.9158

**- La Gavia**



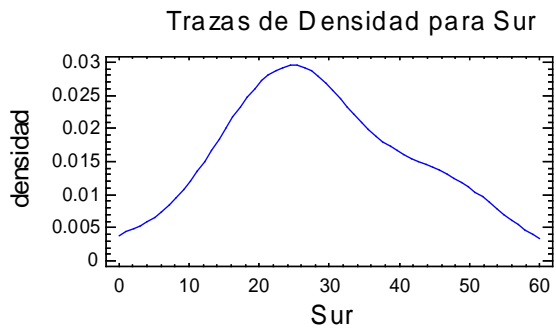
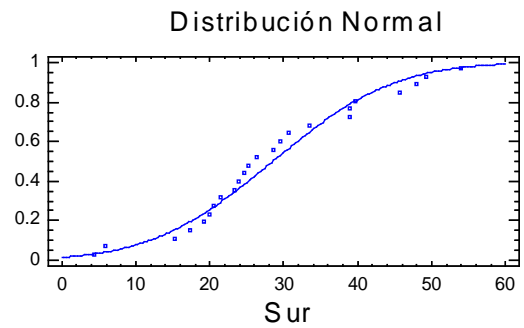
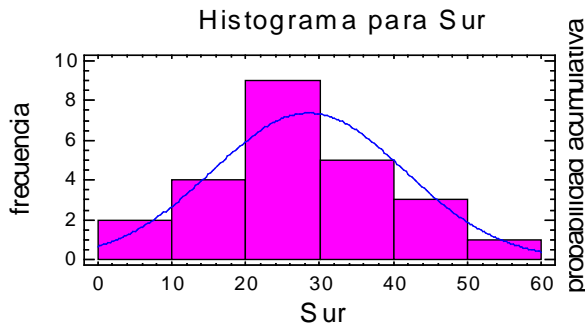
Distribución lognormal ajustada	
Media =	2.39533
Desv.Típica =	5.03259

**- Butarque**



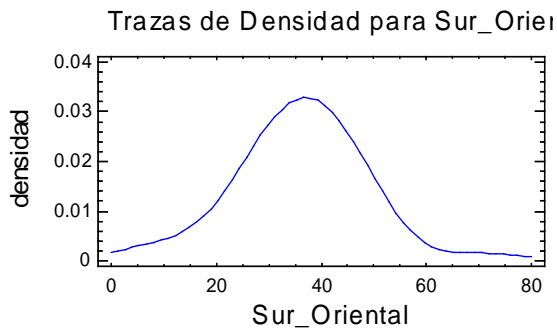
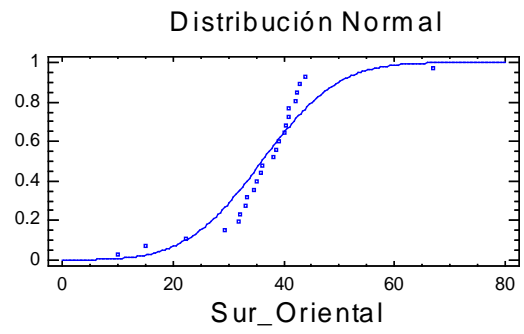
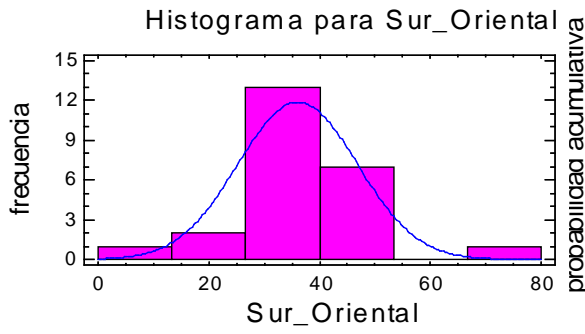
Distribución lognormal ajustada	
Media =	16.9833
Desv.Típica =	11.0519

**- Sur**



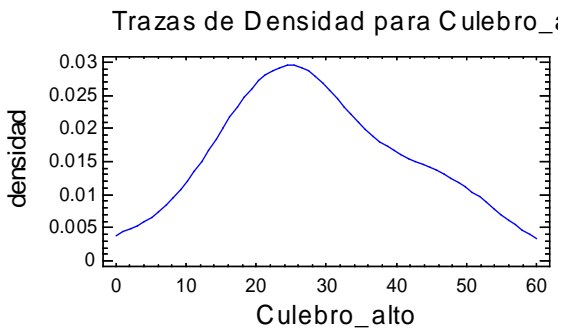
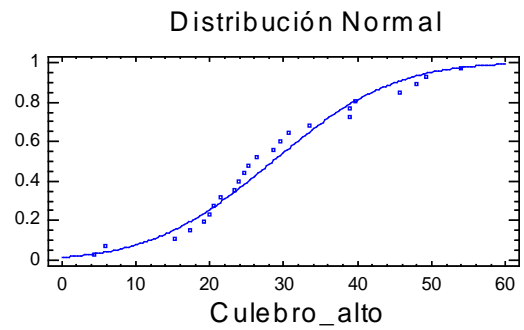
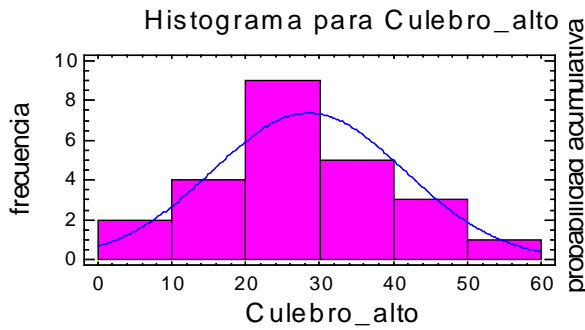
Distribución normal ajustada	
Media =	28.505
Desv.Típica =	12.9938

**- Sur Oriental**



Distribución normal ajustada	
Media =	36.0587
Desv.Típica =	10.7493

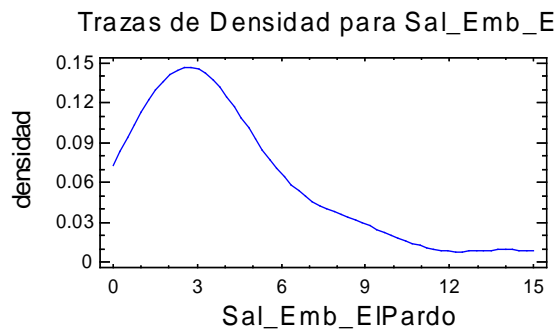
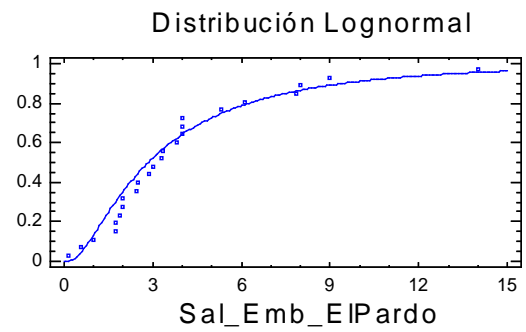
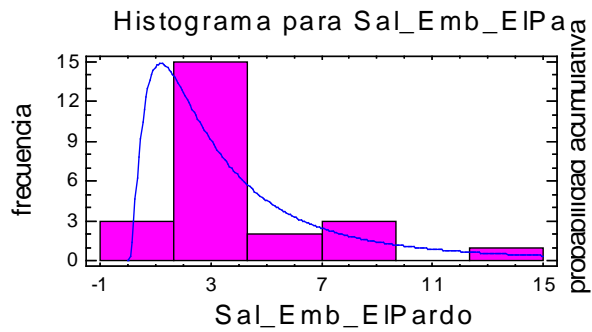
**- Culebro alto**



Distribución normal ajustada	
Media =	28.505
Desv.Típica =	12.9938

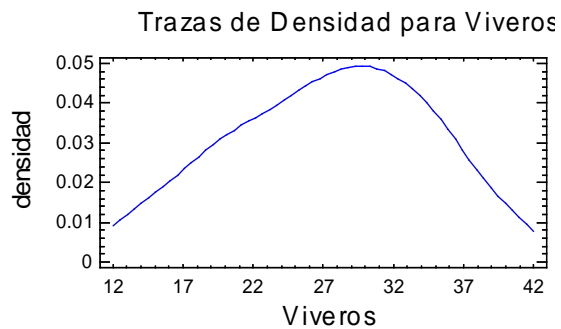
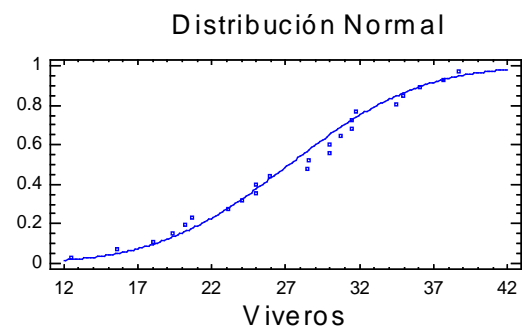
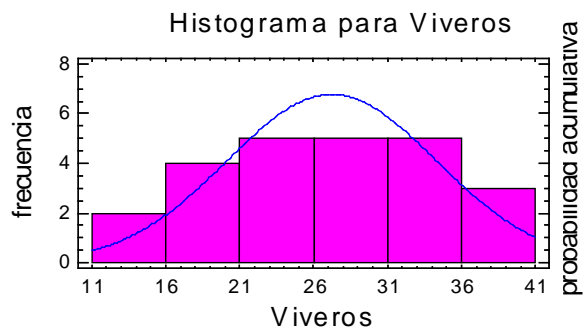
## Nitratos

### - Salidas El Pardo



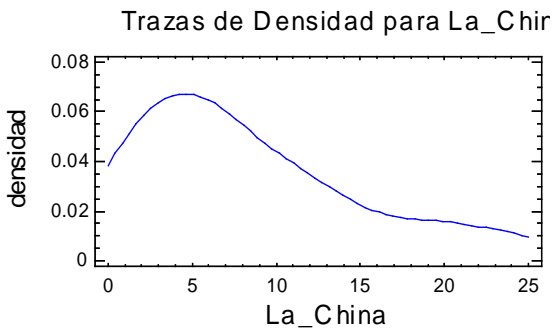
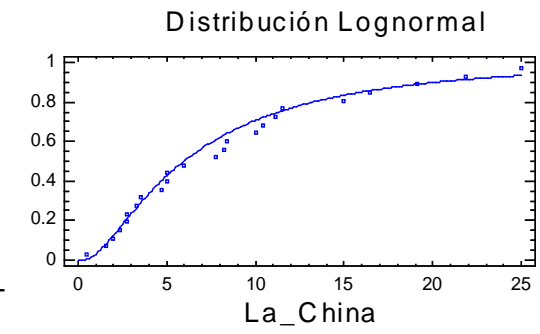
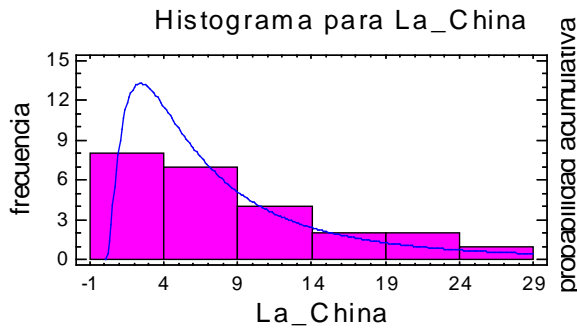
Distribución lognormal ajustada	
Media =	4.3997
Desv.Típica =	5.18835

### - Viveros



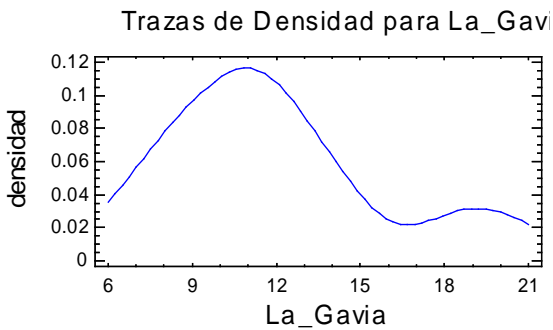
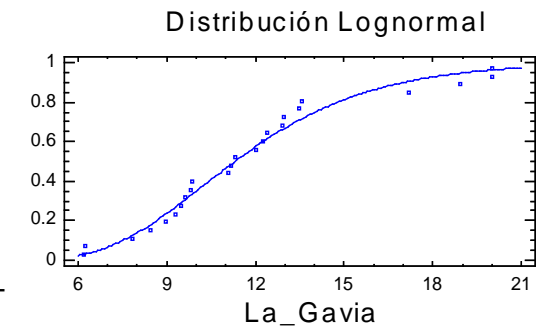
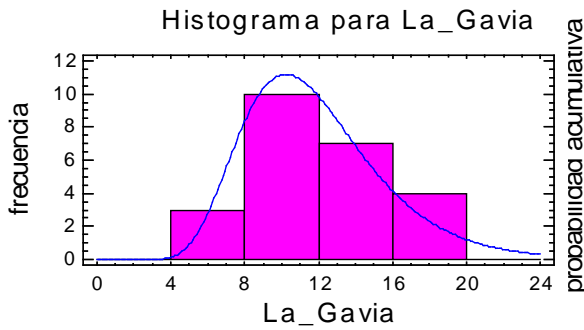
Distribución normal ajustada	
Media =	27.2287
Desv.Típica =	7.07269

**- La China**



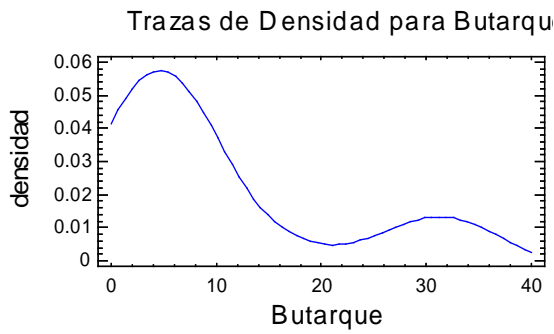
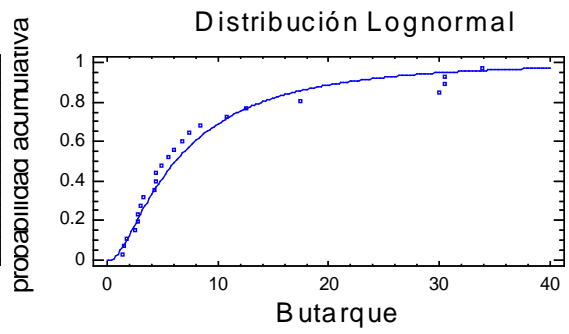
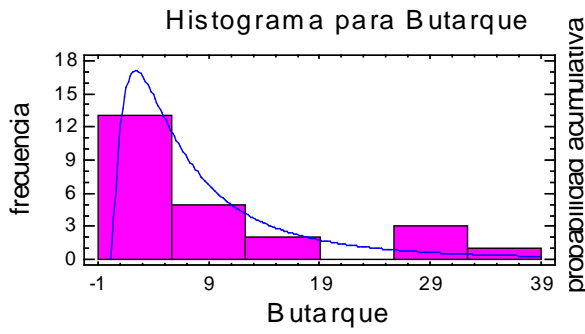
Distribución lognormal ajustada	
Media =	9.35475
Desv.Típica =	11.3032

**- La Gavia**



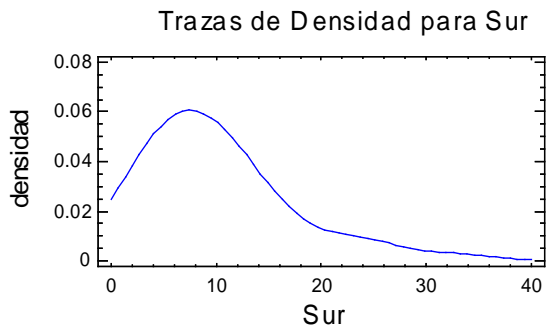
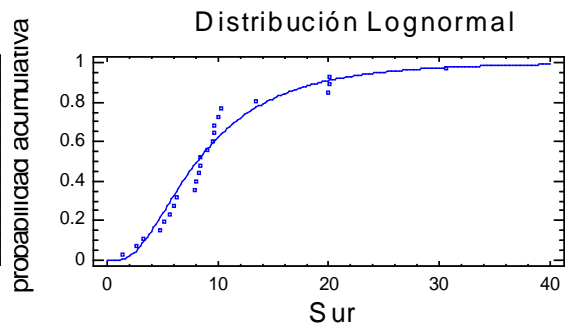
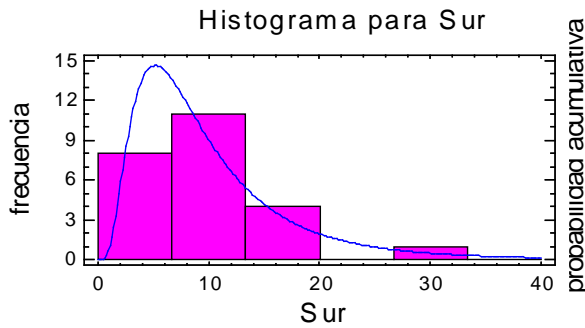
Distribución lognormal ajustada	
Media =	11.8983
Desv.Típica =	3.88796

**- Butarque**



Distribución lognormal ajustada	
Media =	9.89663
Desv.Típica =	12.409

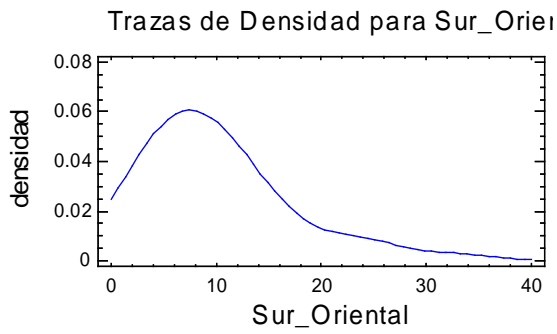
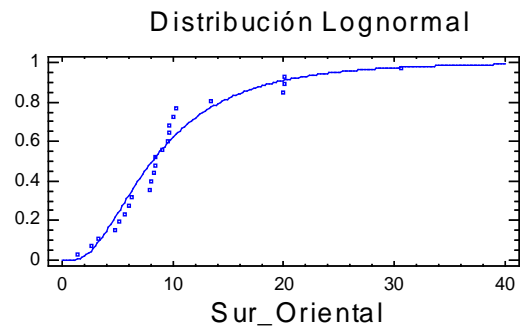
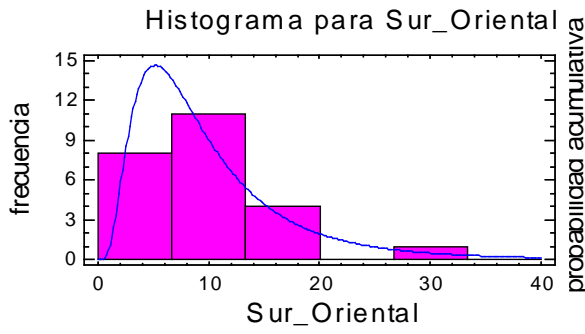
**- Sur**



Distribución lognormal ajustada	
Media =	10.1974
Desv.Típica =	7.7139

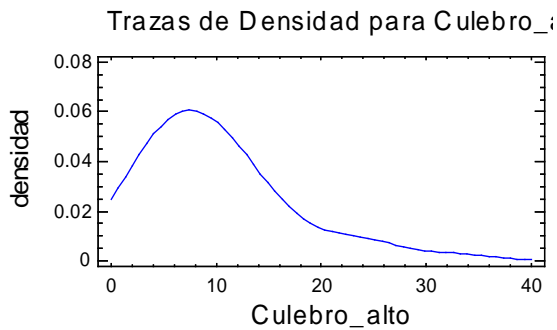
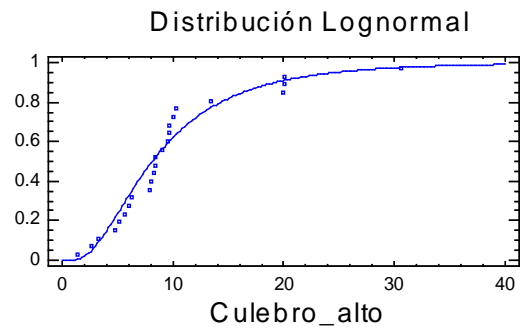
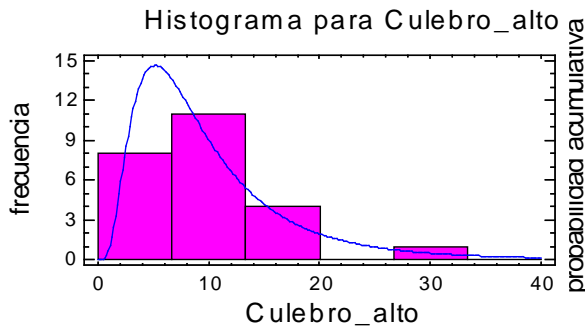


**- Sur Oriental**



Distribución lognormal ajustada	
Media =	10.1974
Desv.Típica =	7.7139

**- Culebro alto**



Distribución lognormal ajustada	
Media =	10.1974
Desv.Típica =	7.7139



## **Actividad 2.3. Desarrollo de la herramienta de simulación múltiple de GESCAL mediante técnicas de Monte-Carlo**

### **La herramienta CALRISK**

El programa CALRISK es una herramienta basada en el Método Monte Carlo para la generación de series estocásticas y análisis estadístico de los resultados, a partir de los datos generados.

El programa ha sido generado por la aplicación *Visual Studio 2008*, que emplea un lenguaje de programación "Visual.net".

Esta herramienta ha sido desarrollada con el objetivo de profundizar más en el análisis de la calidad de los modelos analizados con la herramienta GESCAL.

Esta herramienta no ha sido creada tan sólo para la ejecución de este estudio, sino con la idea que pueda ser útil para futuros estudios. Por ello, es posible que en un futuro se implemente sobre el Sistema de Soporte de Decisión (SSD) AQUATOOL (Andreu et al. 1996) y en su nueva versión AquaToolDMA (Solera et al. 2007) para la planificación y gestión de recursos hídricos, como complemento adicional de la herramienta GESCAL.

Gracias a esta herramienta, en conjunto con la herramienta GESCAL, es posible realizar un análisis estocástico y obtener unos resultados estadísticos de las simulaciones realizadas. El uso conjunto de estas herramientas tiene la ventaja de realizar un análisis mucho más completo de los estudios, proporcionando la posibilidad de no simplemente realizar un análisis determinista, sino completar con un análisis estocástico del problema de estudio.

### **Descripción de la herramienta**

A continuación se realiza una breve descripción de la herramienta CALRISK. Finalmente se incluye un esquema gráfico de funcionamiento del programa.

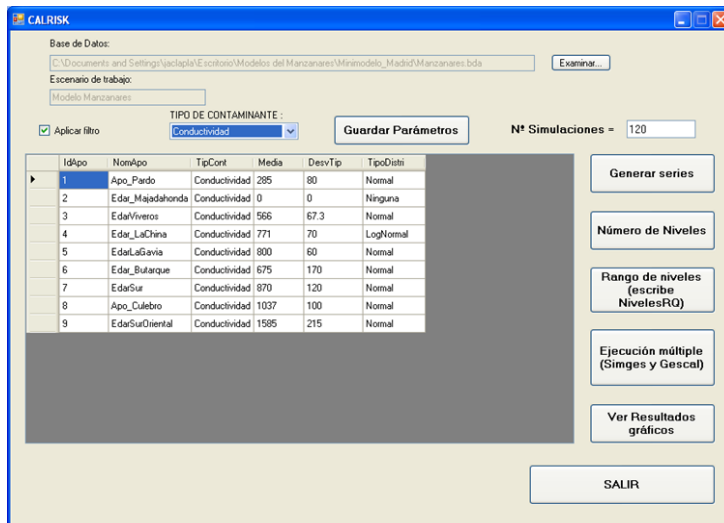
Como se ha citado anteriormente, la herramienta CALRISK está basada en el Método Monte Carlo. Gracias a esta herramienta es posible generar series de datos de naturaleza estocástica, a partir de unas distribuciones definidas por el usuario. Sin embargo, para la generación de estas series, se deberá realizar previamente una serie de operaciones adicionales.

Para poder definir las distribuciones, es necesario realizar un análisis estadístico previo de la serie de datos de los que se quiere extrapolar la distribución seguida por los mismos. A partir de los datos reales medidos, se asocia un tipo de distribución a estos datos, para posteriormente generar la serie estocástica de datos.

Una vez asociados los datos medidos con la distribución apropiada, es necesario realizar pruebas para comprobar la bondad del ajuste de las distribuciones asociadas a cada serie de datos, con el fin de comprobar que realmente las series siguen este tipo de distribuciones. Para ello, se han realizado tres pruebas: el test de bondad de ajuste Ji-cuadrado, y los estadísticos de Kolmogorov-Smirnov y Anderson-Darling. Si todos los test son satisfactorios, se

valida el ajuste y se procede a la generación de la serie estocástica. Sin embargo, si alguno de ellos resulta negativo, se deberá ajustar a otro tipo de distribución, o bien cambiar los parámetros de la misma distribución.

La herramienta CALRISK establece una conexión con la base de datos del archivo de AQUATOOL en el que se está trabajando. En ella se detectan los parámetros del modelo, así como los contaminantes simulados y las conducciones existentes. Finalmente, es necesario introducir los datos de las distribuciones ajustadas en el programa CALRISK. Es posible realizar un filtro por constituyente para facilitar la introducción de los datos en la herramienta. En la siguiente figura, se aprecia el aspecto de esta pantalla principal de la herramienta CALRISK.

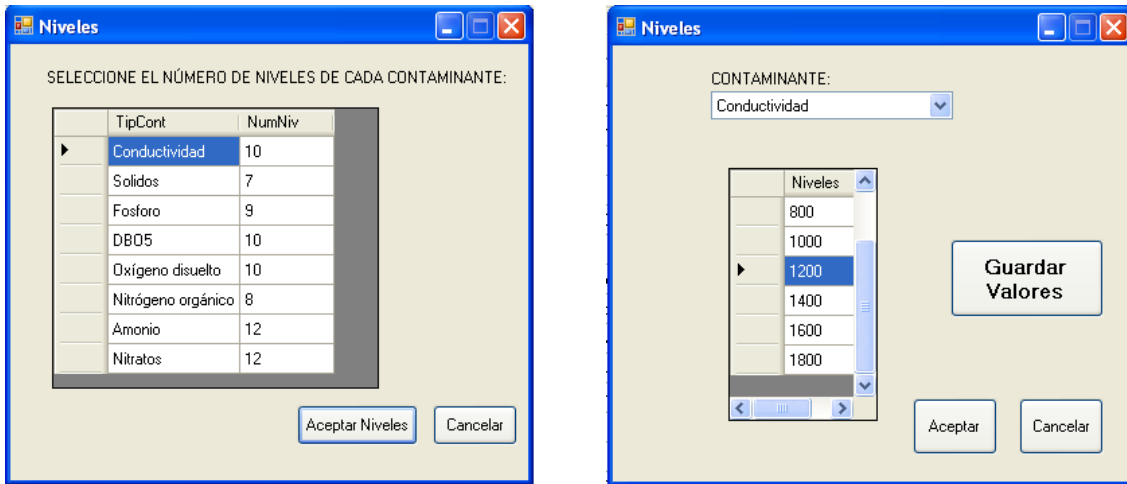


**Figura 21. Aspecto pantalla principal CALRISK. Introducción de datos del ajuste de la serie.**

Una vez se han realizado las operaciones de introducir los datos de las distribuciones en la herramienta, se procede a la generación de las series de los constituyentes modelados, junto con el caudal, según las distribuciones introducidas previamente en la herramienta.

La longitud de la serie, es decir, el número de valores a generar de cada serie, será definida por el usuario. Esta serie deberá tener una longitud adecuada para que la muestra sea representativa. Esto es, cuanto más larga sea la serie generada, mayor será su significancia estadística y el error absoluto de la estimación será menor.

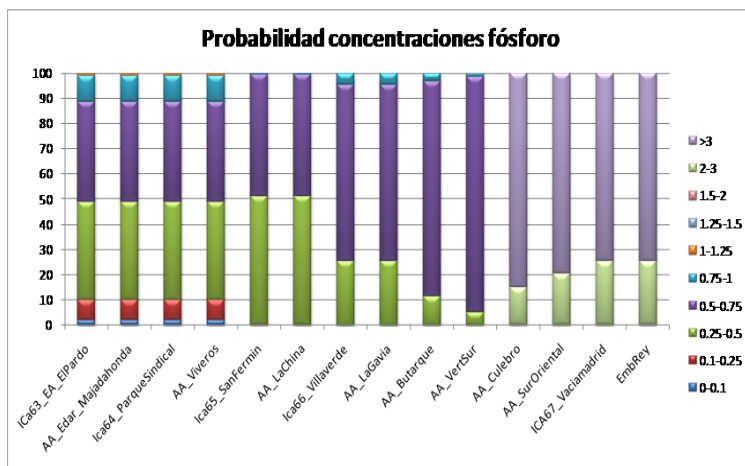
El análisis estadístico de CALRISK proporciona la probabilidad de que una conducción del modelo construido se encuentre en un cierto intervalo de concentración, por lo que estos intervalos deberán ser definidos por el usuario. La herramienta permite la definición, tanto del número de niveles de cada contaminante, como de los límites superiores e inferiores de los rangos de cada uno de ellos. Para esta definición, la nueva herramienta construida, dispone de dos ventanas para facilitar estas definiciones. Estas citadas ventanas de la herramienta CALRISK se muestran a continuación.



**Figura 22. Definición del número de niveles e intervalos de cada rango mediante CALRISK.**

Una vez se han generado las series y establecido los niveles de riesgo de cada contaminante, se procede a la simulación múltiple de SIMGES y GESCAL para las series generadas. Cada simulación es distinta a la anterior, tomando valores distintos de la serie generada. De esta manera se intenta reflejar la aleatoriedad de los resultados futuros.

Tras esta simulación se obtienen los resultados estadísticos, según los intervalos de niveles definidos previamente. La herramienta CALRISK dispone de una función para observar dichos resultados a lo largo de las diferentes conducciones del río. Es posible observar los resultados estadísticos en las conducciones que se consideren oportunas, y cualquiera de los constituyentes simulados. Los resultados gráficos de CALRISK tienen el siguiente aspecto:

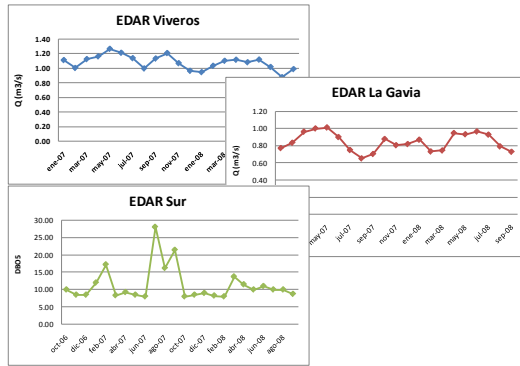


**Figura 23. Gráfico de los resultados estadísticos de obtenidos mediante CALRISK.**

A continuación se muestra un esquema del funcionamiento de la herramienta CALRISK, abarcando desde las operaciones previas de ajuste de distribuciones, hasta la salida gráfica de resultados.

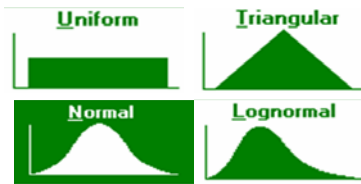
**DATOS DE APORTACIONES:**

- CAUDALES
- CONCENTRACIONES

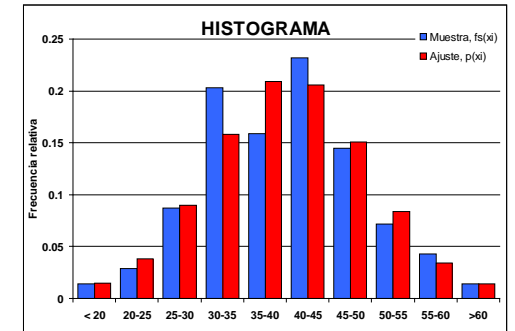


**ANÁLISIS ESTADÍSTICO Y AJUSTE DE LAS DISTRIBUCIONES.**

- Tipo de distribución
- Media ( $\mu$ )
- Desviación Típica ( $\sigma$ )

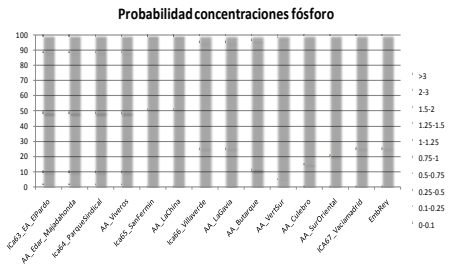


**TEST DE BONDAD DE AJUSTE**



**CALRISK**

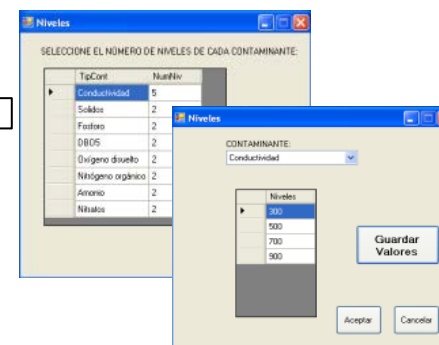
**RESULTADOS ESTADÍSTICOS: GRÁFICOS**



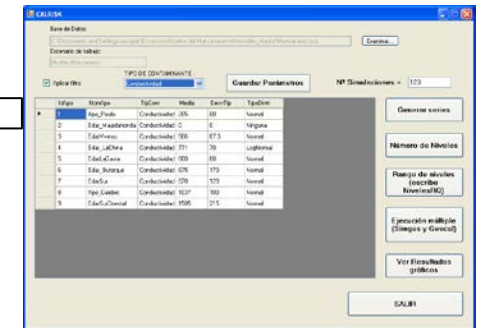
**SIMULACIÓN MÚLTIPLE GESCAL**



**DEFINICIÓN DE LOS NIVELES DE CONTAMINANTES**



**GENERACIÓN DE LAS SERIES ESTOCÁSTICAS**



Generación de números aleatorios, y rescalado según tipo de distribución

Figura 24. Esquema de funcionamiento de la herramienta CALRISK. Metodología a realizar.

## Distribuciones propuestas

En esta parte de la memoria se especifican las distribuciones que se proponen en la herramienta CALRISK para aplicar el método Monte Carlo.

Existen dos tipos de funciones de distribución de probabilidad:

- **Discretas:** Binomial, Geométrica, Poisson, Discreta, etc.
- **Continuas:** Normal, Lognormal, Uniforme, Triangular, etc.

Las funciones de distribución empleadas para generar las series son distribuciones de probabilidad continuas. Las funciones continuas escogidas son: uniforme, triangular, normal y lognormal. El motivo de esta elección son la sencillez en la formulación y la semejanza de estas distribuciones con algunos fenómenos naturales.

A continuación se realiza una pequeña descripción de cada una de las funciones escogidas.

### - UNIFORME

En una distribución uniforme todos los valores dentro del rango factible tienen la misma densidad de probabilidad. Es decir, que entre el valor máximo y mínimo del intervalo, la probabilidad de tomar un valor u otro es la misma para todos los valores del rango, siendo nula la probabilidad de tomar un valor no perteneciente al intervalo.

Los parámetros necesarios para definir una distribución uniforme son los valores máximo y mínimo del intervalo.

Debido a que los parámetros de entrada para definir una función son la media y la desviación típica, en esta formulación se ha tomado el siguiente criterio: el valor máximo viene definido por el valor medio más dos veces la desviación típica; mientras que el valor mínimo viene dado por el valor medio menos dos veces la desviación típica.

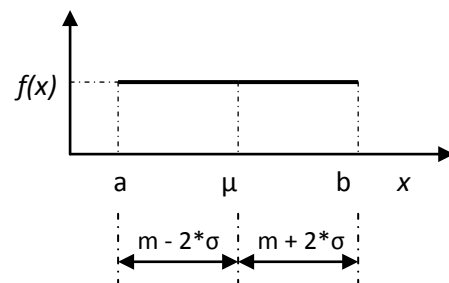
En la práctica, se ha empleado esta distribución cuando se cuenta con pocos datos.

#### **Función de densidad: $f(x)$**

$$f(x) = \frac{1}{b-a} \quad ; \quad a \leq x \leq b$$

#### **Función de distribución: $F(x)$**

$$F(x) = \frac{(x-a)}{b-a} \quad ; \quad a \leq x \leq b$$



### - TRIANGULAR

Una distribución se denomina triangular cuando viene definida por tres parámetros, que representan el valor mínimo, el valor medio y el valor máximo de la variable.

La distribución triangular puede ser útil como una aproximación inicial en situaciones para las que no se dispone de datos fiables. La forma de la distribución usualmente lleva a sobreestimar la densidad de las colas y a subestimar la densidad en el “tronco” de la distribución.

La distribución recibe este nombre por el hecho de que la función de densidad tiene una forma triangular. El valor medio de la distribución no tiene porqué coincidir con el valor máximo de la variable, sin embargo, para simplificar los cálculos se ha considerado que ambos coinciden.

En esta formulación se ha tomado el siguiente criterio: el valor máximo viene definido por el valor medio más dos veces la desviación típica; la mediana viene dada por el valor de la media; y el valor mínimo viene dado por el valor medio menos dos veces la desviación típica.

**Función de densidad:  $f(x)$**

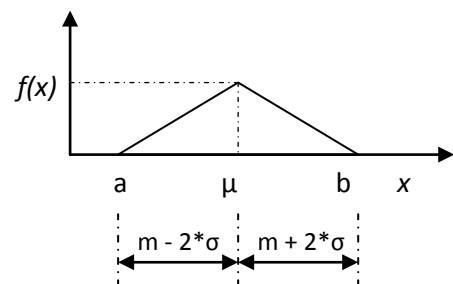
$$f(x) = \frac{2(x-a)}{(b-a)(\mu-a)} \quad ; \quad a \leq x \leq \mu$$

$$f(x) = \frac{2(b-x)}{(b-a)(b-\mu)} \quad ; \quad \mu < x \leq b$$

**Función de distribución:  $F(x)$**

$$F(x) = \frac{(x-a)^2}{(b-a)(\mu-a)} \quad ; \quad a \leq x \leq \mu$$

$$F(x) = 1 - \frac{(b-x)^2}{(b-a)(b-\mu)} \quad ; \quad \mu < x \leq b$$



En la práctica, se ha empleado esta distribución cuando se cuenta con pocos datos y se dan algunos picos, tanto superiores como inferiores. Ante la posibilidad de ajuste a una triangular y a una normal, se ha dado prioridad a la distribución normal frente a la triangular.

**- NORMAL**

La distribución normal, también llamada distribución de Gauss, es la distribución de probabilidad que con más frecuencia aparece en estadística y teoría de probabilidades. Esta distribución es la apropiada para fenómenos que tienen un punto medio que es más probable y que los resultados alejados de la media son progresivamente menos probables.

Los datos a introducir en el modelo son los valores de la media y la desviación típica (o estándar) de la distribución normal. Estos valores se emplean directamente para generar una distribución normal con estos parámetros.

En la práctica, se ha empleado esta distribución de una manera bastante habitual. Aproximadamente el 50% de las concentraciones siguen este tipo de distribución.

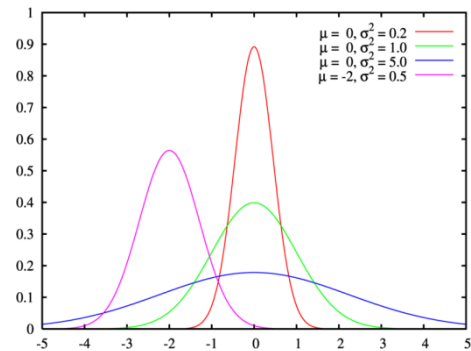


### **Función de densidad: $f(x)$**

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad ; \quad -\infty \leq x \leq +\infty$$

### **Función de distribución: $F(x)$**

$$F(x) = \int_a^b f(x) dx \quad ; \quad a \leq x \leq b$$



### **- LOGNORMAL**

La distribución lognormal es aquella que describe una variable  $x$  cuyo logaritmo se distribuye de una forma normal. Esta distribución es una buena representación para las variables que se extienden en el intervalo  $[0, +\infty [$ , y que tienen un sesgo positivo.

La distribución lognormal tiene dos parámetros:  $\mu$  (media aritmética del logaritmo de los datos) y  $\sigma$  (desviación estándar del logaritmo de los datos).

La distribución lognormal se caracteriza por las siguientes propiedades:

- Asigna a valores de la variable  $< 0$  la probabilidad 0 y de este modo se ajusta a las tasas y probabilidades de fallo que de esta forma sólo pueden ser positivas.
- Como depende de dos parámetros, se ajusta bien a un gran número de distribuciones empíricas.
- Es idónea para parámetros que son a su vez producto de numerosas cantidades aleatorias (múltiples efectos que influyen sobre la fiabilidad de un componente).
- La esperanza matemática o media en la distribución lognormal es mayor que su mediana. De este modo da más importancia a los valores grandes de las tasas de fallo que una distribución normal con los mismos percentiles del 5% y 50% tendiendo, por tanto, a ser pesimista.

Los datos a introducir en el modelo son los valores de la media y la desviación típica (o estándar) de la distribución lognormal. Estos valores, internamente se transforman a los valores de media y desviación típica asociados a una distribución normal. Posteriormente, se genera una distribución normal y finalmente se vuelve a transformar a su estado lognormal.

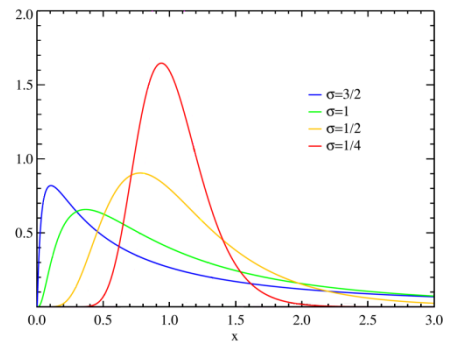
En la práctica, al igual que en el caso anterior, se ha empleado esta distribución de una manera bastante habitual, sobre todo para caudales. Aproximadamente el 50% restante de las concentraciones siguen este tipo de distribución.

**Función de densidad:  $f(x)$**

$$f(x) = \frac{1}{\sigma_l \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln x - \mu_l)^2}{2\sigma_l^2}} ; \quad x \geq 0$$

Donde:

$$\left\{ \begin{array}{l} \mu_l = \ln \frac{\mu^2}{\sqrt{\sigma^2 + \mu^2}} \\ \sigma_l = \sqrt{\ln \left( \frac{\sigma^2}{\mu^2} + 1 \right)} \end{array} \right.$$



**Función de distribución:  $F(x)$**

La función de distribución de la distribución lognormal no tiene expresión analítica.