

**MASTER OFICIAL INGENIERÍA HIDRÁULICA Y MEDIO AMBIENTE**

**DPTO. INGENIERÍA HIDRÁULICA Y MEDIO AMBIENTE**

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA**

**TESINA DE MASTER**

**ESTIMACIÓN DEL BALANCE HÍDRICO ANUAL, EN EL HUMEDAL  
ARTIFICIAL DEL TANCAT DE LA PIPA, CON APOYO DE MODELOS  
MATEMÁTICOS DE CALIDAD DE AGUAS; PARA CONTAMINANTES  
CONSERVATIVOS.**

**Autora: Julie Paola Angarita Hernández.**

**Tutor: Dr. Miguel Martín Monerri.**

**Valencia, Septiembre de 2010.**

Índice de contenido:

<b><u>1. INTRODUCCION.....</u></b>	<b><u>6</u></b>
<b>1.1. PARQUE NATURAL DE LA ALBUFERA DE VALENCIA. ....</b>	<b>6</b>
1.1.1. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA ALBUFERA.....	6
<b>1.2. TRATAMIENTO DE AGUAS MEDIANTE HUMEDALES ARTIFICIALES.....</b>	<b>18</b>
1.2.1. COMPONENTES DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL.....	18
1.2.2. TIPOS DE HUMEDALES ARTIFICIALES.....	23
<b>1.2.3. CARACTERÍSTICAS DE DIMENSIONAMIENTO Y DISEÑO DE HUMEDALES ARTIFICIALES DE FLUJO SUPERFICIAL.....</b>	<b>28</b>
1.2.4. MECANISMOS DE ELIMINACIÓN DE CONTAMINANTES EN HUMEDALES ARTIFICIALES .....	30
1.2.5. VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES. ....	32
<b>1.3. COMPONENTES DEL BALANCE HÍDRICO EN HUMEDALES ARTIFICIALES. ....</b>	<b>35</b>
1.3.1. AGUA SUPERFICIAL. ....	36
1.3.2. PRECIPITACIÓN. ....	36
1.3.3. EVAPOTRANSPIRACIÓN.....	37
1.3.4. INFILTRACIÓN.....	41
<b>1.4. MODELIZACIÓN HIDRÁULICA DE HUMEDALES ARTIFICIALES .....</b>	<b>42</b>
1.4.1. MODELOS IDEALES Y SUS COMBINACIONES .....	42
1.4.2. REACTOR DE FLUJO EN PISTÓN CON DISPERSIÓN.....	43
<b>1.5. MEDICIÓN DE CAUDALES EN SISTEMAS A SUPERFICIE LIBRE. ....</b>	<b>44</b>
1.5.1. SECCIÓN TIPO VELOCIDAD MEDIA ESTIMADA.....	44
1.5.2. ESTRUCTURAS HIDROMÉTRICAS. ....	47
1.5.3. INYECCIÓN DE TRAZADORES EN LA CORRIENTE.....	48
<b><u>2. OBJETIVOS Y JUSTIFICACION.....</u></b>	<b><u>49</u></b>
<b><u>3. AREA DEL ESTUDIO .....</u></b>	<b><u>51</u></b>
<b>3.1. EL TANCAT DE LA PIPA .....</b>	<b>51</b>
<b>3.1.1. LOCALIZACIÓN. ....</b>	<b>51</b>
3.1.2. DESCRIPCIÓN DEL TANCAT DE LA PIPA.....	52
3.1.3. DISTRIBUCIÓN GENERAL DEL TANCAT DE LA PIPA .....	57
<b>3.2. FILTROS VERDES DEL TANCAT DE LA PIPA. ....</b>	<b>61</b>
3.1.3. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE FILTROS VERDES DEL TANCAT DE LA PIPA.....	62
3.1.4. FLUJO DE AGUAS POR LOS FILTROS VERDES DEL TANCAT DE LA PIPA. ....	63
<b><u>4. OBTENCIÓN DE DATOS DE CAMPO.....</u></b>	<b><u>68</u></b>
<b>4.1. MEDICIÓN DE CAUDALES. ....</b>	<b>69</b>
<b>4.2. COMENTARIOS DE LA CAMPAÑA DE MUESTREOS. ....</b>	<b>73</b>
<b><u>5. RESULTADOS DE LA CAMPAÑA DE MUESTREOS.....</u></b>	<b><u>76</u></b>
<b>5.1. ASPECTOS GENERALES. ....</b>	<b>76</b>
5.1.1. MEDICIÓN DE CAUDALES DE ENTRADA LOS FILTROS VERDES.....	76
5.1.2. FLUJO DE CAUDALES EN LOS FILTROS VERDES DEL TANCAT DE LA PIPA. ....	78
5.1.3. DISTRIBUCIÓN DE CAUDALES EN LOS FILTROS VERDES .....	82

<b>5.2. TIEMPOS DE RESIDENCIA TEÓRICOS EN LOS FILTROS VERDES .....</b>	<b>86</b>
<b><u>6. BALANCE HIDRICO .....</u></b>	<b><u>92</u></b>
<b>6.1. BALANCE HÍDRICO MENSUAL .....</b>	<b>97</b>
6.1.1. ENTRADAS MENSUALES .....	97
6.1.2. SALIDAS MENSUALES .....	98
6.1.3. ANÁLISIS DEL BALANCE HÍDRICO MENSUAL. ....	99
<b>6.2. BALANCE HÍDRICO SEMANAL .....</b>	<b>103</b>
6.2.1. ENTRADAS SEMANALES .....	103
6.2.2. SALIDAS SEMANALES .....	104
<b>6.2.3. ANÁLISIS DEL BALANCE HÍDRICO SEMANAL. ....</b>	<b>105</b>
<b><u>7. MODELO MATEMÁTICO.....</u></b>	<b><u>107</u></b>
7.1. INTRODUCCIÓN. ....	107
<b>7.2. DESARROLLO DEL MODELO MATEMÁTICO .....</b>	<b>110</b>
7.2.1. DATOS DE PARTIDA PARA LA RESOLUCIÓN DEL MODELO. ....	116
<b>7.3. CALIBRACIÓN DEL MODELO.....</b>	<b>119</b>
<b>7.4. APLICACIONES DEL MODELO DESARROLLADO.....</b>	<b>127</b>
<b><u>8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</u></b>	<b><u>133</u></b>
<b><u>REFERENCIAS .....</u></b>	<b><u>139</u></b>
<b><u>ANEJO I. TABLAS DE MEDICIÓN DE CAUDAL EN VERTEDEROS. ....</u></b>	<b><u>142</u></b>
<b><u>ANEJO II. CATÁLOGO DEL MINIMOLINETE.....</u></b>	<b><u>144</u></b>
<b><u>ANEJO III. COMPARACION DATOS HIDROCLIMÁTICOS ESTACION PICASSENT VS. TANCAT DE LA PIPA. ....</u></b>	<b><u>145</u></b>
<b><u>ANEJO IV. CONDUCTIVIDADES MEDIDAS, EN LA CAMPAÑA DE MUESTREOS EN LOS FILTROS VERDES DEL TANCAT DE LA PIPA. ....</u></b>	<b><u>150</u></b>

## TABLA DE FIGURAS

Figura 1. Imagen satélite de La Albufera de Valencia. Fuente: <a href="http://www.gva.es">www.gva.es</a> .....	6
Figura 2. Evolución Oxígeno Disuelto. Fuente: Pruebas preliminares en zona piloto sobre la relación entre los sedimentos, los metales pesados y el ciclo de nutrientes. TYPESA-UPV (2004). .....	13
Figura 3. Tipos de Humedales Artificiales. ....	23
Figura 4. Sistemas de Humedales Artificiales con macrófitos. ....	24
Figura 5. Corte longitudinal de un Humedal Artificial de Flujo Superficial .....	26
Figura 6. Corte longitudinal de un Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial.....	27
Figura 7. Componentes del balance hídrico en un humedal. Fuente: Traducido de : Kadlec y Knight, 1996. Treatment Wetlands. ....	35
Figura 8. Representación simplificada de la resistencia superficie (total) y de la resistencia aerodinámica al flujo de vapor de agua. Fuente: Evaporación del cultivo. FAO. ....	38
Figura 9. Curva generalizada del coeficiente del cultivo, correspondiente al procedimiento del coeficiente único del cultivo Fuente: Evaporación del cultivo. FAO.....	40
Figura 10. Reactores Flujo de Pistón. Fuente. Sistemas de manejo de aguas residuales para núcleos pequeños y descentralizados. Crites 2000.....	43
Figura 11. Descripción del minimolinete. Fuente: Catálogo SEBA Hidrómetrie .....	45
Figura 12. Estructura del vertedero triangular. ....	47
Figura 13. Mapa de situación. Fuente: “Estudio Específico de Afección de Obras a la Red Natura 2000” .....	51
Figura 14. Distribución del Tancat de la Pipa. Fuente: cedido <a href="http://www.tancatdelapipa.net">www.tancatdelapipa.net</a> .....	52
Figura 15. Climograma del Tancat de la Pipa. ....	56
Figura 16. Ubicación canales Tancat de la Pipa. ....	59
Figura 17. Detalle Filtros Verdes. ....	61
Figura 18. Flujo de agua a través de las compuertas de los Filtros Verdes .....	63
Figura 19. Dimensiones de las compuertas tipo tajadera de entrada. ....	64
Figura 20. Dimensiones compuertas de tajadera, los Filtros Verdes .....	64
Figura 21. Dimensiones de las compuerta tajadera de salida y un detalle de la ubicación de las tuberías. ....	65
Figura 22. Delimitación Filtros Verdes .....	66
Figura 23. Campaña de Muestreos Filtros Verdes.....	68
Figura 24. Detalle Vertedero Triangular.....	69
Figura 25. Posición del minimolinete en la tubería de la compuerta de salida. ....	70
Figura 26. Esquema para el cálculo de la sección transversal de la tubería.....	72
Figura 27. Fechas visitas realizadas a los Filtros Verdes. ....	73
Figura 28. Puntos medición de caudales en los Filtros Verdes .....	76
Figura 29. Caudales de entrada a Filtros Verdes. ....	78
Figura 30. Caudales circundantes en el Sistema de Filtros Grandes. ....	79
Figura 31. Caudales circundantes por el Sistema Filtros Pequeños .....	80
Figura 32. Caudales circundantes por el Filtro Cuatro .....	81
Figura 33. Distribución de caudales compuertas FV, el día 21 de Abril de 2009. ....	82
Figura 34. Distribución de caudales compuertas FV, el día 29 de Enero de 2010. ....	84
Figura 35. Tiempos de Residencia, con caudales de entrada. ....	89
Figura 36. Tiempos de Residencia, con caudales de salida. ....	89
Figura 37. Curva coeficiente de cultivo Kc, para los Filtros Verdes del Tancat de la Pipa. ....	96
Figura 38. Volúmenes de entrada de agua mensual al sistema. ....	98
Figura 39. Volúmenes de salida de agua mensual al sistema. ....	99
Figura 40. Comparativo entradas y salidas de agua mensual del sistema. ....	100
Figura 41. Comparativo de volúmenes acumulados de entradas y salidas de agua mensual del sistema. ....	101
Figura 42. Comparativo entradas y salidas de agua semanal del sistema.....	103
Figura 43. Volúmenes acumulados de entradas de agua semanales al sistema. ....	104
Figura 44. Volúmenes acumulados de salidas de agua semanales del sistema. ....	105
Figura 45. Distribución de caudales del Tancat de la Pipa .....	106
Figura 46. Fases del desarrollo del modelo. Fuente: Metodología para la calibración de Modelos Matemáticos de dispersión de contaminantes incluyendo regímenes no permanentes. ....	108

Figura 47. Ruta Filtros Grandes.....	112
Figura 48. Ruta Filtros Pequeños.....	112
Figura 49. Ruta Filtro 4.....	113
Figura 50. Volúmenes de control establecidos para el balance .....	117
Figura 51. Calibración de la conductividad en el Filtro 1 Grande.....	121
Figura 52. Calibración de la conductividad en el Filtro 1 Pequeño.....	122
Figura 53. Calibración de la Conductividad en el Filtro 2.....	123
Figura 54. Calibración de la Conductividad en el Filtro 2 pequeño.....	124
Figura 55. Calibración de la Conductividad en el Filtro 3.....	124
Figura 56. Calibración de la Conductividad en el Filtro 3 pequeño.....	125
Figura 57. Calibración de la conductividad en el Filtro 4.....	126
Figura 58. Tiempos de residencia simulados para Filtros Grandes.....	128
Figura 59. Tiempos de residencia simulados para Filtros Pequeños .....	129
Figura 60. Tiempos de residencia simulados en el Filtro 4.....	130
Figura 61. Precipitación Picassent vs. Tancat de la Pipa .....	148
Figura 62. Evapotranspiración Picassent vs. Tancat de la Pipa .....	149
Figura 63. Temperatura media Picassent vs. Tancat de la Pipa.....	149

## 1. INTRODUCCION

### 1.1. Parque natural de La Albufera de Valencia.

#### 1.1.1. Descripción general de La Albufera.

El Parque Natural de La Albufera de Valencia comprende un total de 21.000 hectáreas de superficie, concentrados en los términos municipales de: Catarroja, Albal, Silla, Sueca, Sollana, Cullera, Albalat de la Ribera, Algemesí, Massanassa, Alfafar y Sedaví. La Albufera se separa del mar Mediterráneo por una estrecha franja arenosa, denominada restinga, cubierta de pinares y monte bajo conocida como la Dehesa de El Saler.



**Figura 1.** Imagen satélite de La Albufera de Valencia. Fuente: [www.gva.es](http://www.gva.es)

A través de la restinga, se abren tres canales de desagüe o "golas" (la de Pujol, El Perellonet y El Perelló). A través de estas golas, el flujo del agua es regulado mediante compuertas que mantienen el nivel de las aguas del lago según las necesidades hídricas de los terrenos limítrofes que se dedican al cultivo de arroz.

Una de las principales características que presenta el Parque Natural de “La Albufera de Valencia”, y que le permite albergar una importante diversidad biológica, es la heterogeneidad de ambientes que presenta. Los principales son los siguientes:

- Playas y dunas móviles: son ambientes extremos (aridez del medio, vientos salinos, altas temperaturas, etc.). Las especies que ahí habitan, presentan importantes adaptaciones biológicas, y por tanto, son fuente de numerosos endemismos. Son ecosistemas con elevado valor ecológico. Además de lo anterior, las dunas tienen un importante papel, evitando la erosión de las costas.
- Malladas: también son ambientes sometidos a condiciones extremas, por lo que presentan una flora y fauna muy especializada. Se trata de áreas deprimidas caracterizadas por suelos poco permeables y la presencia del nivel freático próximo a la superficie. En la actualidad, estos ambientes se encuentran muy alterados debido a la presión humana.
- La Devesa: se trata de un matorral denso con gran diversidad botánica, que permite a su vez la existencia de una gran diversidad faunística.
- La laguna: presenta una superficie media de unas 2.800 hectáreas, de las cuales unas 350 son de vegetación palustre. Su profundidad media es de aproximadamente 1 metro. Presenta una forma casi circular y un diámetro máximo de unos 6 Km. El proceso de colmatación ha dado lugar a una capa de sedimentos que en determinados puntos alcanza un espesor de hasta 1 metro.
- “Ullals”: son surgencias de aguas freáticas. La supervivencia de estos ambientes se encuentran hoy en día amenazada por la presión humana. Se consideran vitales para el mantenimiento de la diversidad biológica en la Albufera, ya que proporcionan las aguas de mejor calidad permitiendo albergar, reservas genéticas, con especies endémicas con un gran nivel de especiación y valor biogeográfico. Es necesaria la protección y recuperación de estos hábitats.
- Marjal: se trata de un medio antropizado y sometido a un régimen de explotación intensiva (cultivo del arroz), con incorporación de nutrientes y productos de cierta toxicidad para la flora y fauna (por ejemplo herbicidas). El empleo de estos terrenos para el arroz, confiere al sistema una clara estacionalidad, con las alternancias de periodos de inundación/deseccación de los campos y el crecimiento de la planta, que hacen variar, a lo largo del año, considerablemente la extensión y las características de la superficie inundada.

La Albufera, por una parte, constituye uno de los espacios naturales más representativos e importantes de la Comunidad Valenciana, y por otra, es el mayor lago que existe en la Península Ibérica además de una de las áreas de mayor valor ecológico. Es por ello que en 1986 fue declarado como Parque Natural por la Comunidad Valenciana y ha sido incluida como área de especial protección en el ámbito comunitario e internacional.

En 1990, La Albufera, entró a formar parte de la Lista de Humedales de Importancia Internacional del Convenio Ramsar y un año más tarde, en 1991 se reconoció a La Albufera como Zona de Especial Protección para las Aves (ZEPA). Además de los anteriores instrumentos de gestión y conservación, este espacio tan singular posee hábitats y especies recogidos en la Directiva “Hábitat”. Por todas sus cualidades, no es de extrañar que el Parque sea incluido en la Red comunitaria europea *Natura 2000*.

### *Aportes hídricos de La Albufera*

El *Parque Natural de La Albufera* recibe aguas de cuatro orígenes principalmente: escorrentías superficiales naturales, aportes subterráneos, aguas residuales y sobrantes de riego. Aunque la Albufera tiene una cuenca propia, la realidad es que ésta solo proporciona una pequeña parte de las aportaciones, mientras que la gran mayoría de las aguas llegan desde el río Júcar. En este sentido, puede considerarse la Albufera como parte integrante del esquema hidrológico del río Júcar. (Soria et al., 2002).

El Plan Hidrológico de la cuenca del Júcar, estima las necesidades hídricas del lago en 100 Hm<sup>3</sup>/año. Esta cantidad, a juzgar por el estado trófico y la tasa de renovación del lago, parece suficiente para mantener la situación actual y evitar un mayor deterioro, pero no, para mejorar el estado actual del lago.

En función de la calidad y de la procedencia de estos, los aportes hídricos se pueden dividir en:

- Vertidos directos de origen urbano e industrial sin previo tratamiento y efluentes procedentes de las estaciones de depuración de aguas.
- Escorrentía natural, de la cual, por un lado tenemos la escorrentía superficial que solamente se produce durante los episodios de lluvia con la intensidad y/o duración necesaria como para que se produzca escorrentía y que además, suele transportar gran cantidad de sólidos en suspensión. Y por otra parte, La Albufera también recibe aportes de las aguas subterráneas a través de los denominados “ullals”. Es muy importante la protección y mantenimiento de estos manantiales, que son la principal fuente de agua de alta calidad al lago, ya que, se encuentran en vías de total desaparición debido a la colmatación de su salida por sedimentos y a la apertura de pozos. No obstante, en los últimos años, se han llevado a cabo una serie de actuaciones para recuperar ambientalmente algunos “ullals” situados en el Parque.
- Retornos del agua del tramo final del río Júcar, a través de las acequias, tienen tres orígenes: desde el sistema Túria, desde la Acequia Real del Júcar y desde las acequias de Sueca y Cullera. La calidad de estos retornos se ve afectada por diversos aportes de origen antrópico.

Es necesario señalar, que las aportaciones de agua dulce a La Albufera, se han visto reducidas durante los últimos tiempos, y más concretamente, las procedentes del Júcar. Esta reducción, está teniendo consecuencias importantes en el estado ecológico del Parque.

### *Estado actual de La Albufera*

Hasta principios de los años 60, La Albufera era una laguna de aguas limpias dotada de una gran diversidad biológica. En su seno se podía encontrar: especies vegetales tanto emergentes como sumergidas, especies piscícolas de gran interés (por ejemplo la

anguila y la lubina), especies de ciprinodóntidos declarados en la actualidad como especies protegidas (*fartet* y *samaruc*), numerosos endemismos, etc.

En la década de los 70, con el crecimiento del asentamiento urbano y de la industrialización por un lado, y por otro, las agresivas prácticas agrarias que se han ido sucediendo con el tiempo (por ejemplo, la aplicación de herbicidas acabó en los años 60 con la población de macrófitas del lago; según Benet, 1983), han llevado al deterioro de las aguas, pasando de un sistema oligotrófico (hasta los años 60) a eutrófico (década de los 70) para encontrarse actualmente dentro de la clasificación de sistema hipertrófico.

Las consecuencias de ello se desarrollarán más ampliamente en el apartado siguiente, en el cual se hablará específicamente sobre la eutrofización.

Lo expuesto anteriormente coincide con las conclusiones extraídas del “Estudio para el Desarrollo Sostenible de La Albufera de Valencia” según, el cual, los problemas con los que hoy en día se enfrenta este singular ecosistema son los siguientes:

- *Aportes hídricos al sistema.* En la actualidad, a pesar de las mejoras en los sistemas de saneamiento y depuración, continúan produciéndose vertidos directos sin depurar de origen urbano o industrial y efluentes procedentes de deficiencias estructurales en las redes unitarias, principalmente en el Colector Oeste, y en todos los municipios comprendidos entre Valencia y Silla, incluidos sus polígonos industriales.
- *Calidad biológica de las aguas del lago.* La calidad biológica del lago se encuentra fuertemente dañada. Los efectos contaminantes de los residuos urbanos e industriales, del uso de pesticidas y de los aterramientos afectan irreversiblemente a la flora acuática, y por ello, a la fauna asociada. Actualmente, el lago es un sistema hipertrófico como consecuencia de entradas excesivas de materia orgánica alóctona y nutrientes inorgánicos. Este exceso genera un gran número de inconvenientes, que repercuten en el lago y que son causa directa de su deterioro.
- *Relación entre sedimentos, metales pesados y el ciclo de nutrientes.* Los ciclos de oxígeno y de nutrientes están desequilibrados. El agua presenta un pH muy elevado, lo que hace que sus sedimentos retengan los metales pesados y nutrientes (fósforo) que recibe, convirtiéndolos en un almacén de materia en el sistema.
- *Aterramiento del lago.* Como se ha comentado con anterioridad, las albuferas son sistemas que evolucionan de forma natural hacia su colmatación. En “La Albufera de Valencia”, este proceso se ha acelerado como consecuencia de la acción del hombre. Esto viene agravado al haber desaparecido prácticamente la función de la marjal perimetral como trampa de sedimentos, debido a la existencia de una extensa red de canales, acequias, azarbes e instalaciones de bombeo que reducen los tiempos de permanencia del agua por debajo de los necesarios para que se produzca una sedimentación efectiva, siendo ello también consecuencia de la actividad del hombre.

- *Problemas de asignación de usos.* Los usos actuales a los que se ha destinado La Albufera, reducen la variedad de los ambientes y ecosistemas presentes en el entorno. A ello, se le ha de añadir la presión urbanística que se lleva ejerciendo durante los últimos años en las áreas turísticas.
- *Riesgos catastróficos.* Entre ellos, se puede destacar el derivado del almacenamiento de sustancias tóxicas o peligrosas en los polígonos industriales de las cuencas vertientes, que podrían sufrir una movilización masiva si se produjera una inundación de carácter excepcional, lo que inevitablemente acabaría afectando a las llanuras de inundación fluvial, con graves consecuencias ecológicas.

A estos problemas, podríamos añadir otros con carácter más o menos importante, como son la presión cinegética y los impactos debidos a las infraestructuras.

En la actualidad se han iniciado actuaciones para paliar en cierta medida algunos de los problemas anteriores.

Desde finales de los años 90, se ha ido sucediendo en el lago la aparición de fases claras durante las cuales, se produce una fuerte reducción de la población de fitoplancton. Ello origina un incremento de la transparencia en el lago durante unos días o semanas.

Este fenómeno es debido por un lado, a la sustitución de algas de mayor tamaño (algas verdes filamentosas) por algas de menor tamaño o microalgas (diatomeas, entre otras). Esta sucesión poblacional permite la aparición y mantenimiento de zooplancton filtrador (por ejemplo la *Daphnia*) que a su vez ejerce un control sobre las poblaciones de microalgas, llegando a establecerse un equilibrio e impidiendo las explosiones poblacionales de estas últimas. Por otro lado, también influye en la existencia de estas fases claras, el flujo de aguas limpias procedentes del vaciado de los arrozales que se produce en invierno tras la “perelloná”, la mejora de las infraestructuras de saneamiento en el entorno de la La Albufera y la reducción de la entrada de nutrientes al lago.

#### *Características de La Albufera como sistema eutrofizado.*

La Directiva 91/271/CEE del Consejo, de 21 de mayo de 1991, relativa al tratamiento de las aguas residuales urbanas, transpuesta a la legislación estatal mediante el Real Decreto 509/1996, de 15 de marzo, de desarrollo del Real Decreto-ley 11/1995, de 28 de Diciembre, establece:

- *Riesgos catastróficos.* Entre ellos, se puede destacar el derivado del almacenamiento de sustancias tóxicas o peligrosas en los polígonos industriales de las cuencas vertientes, que podrían sufrir una movilización masiva si se produjera una inundación de carácter excepcional, lo que inevitablemente acabaría afectando a las llanuras de inundación fluvial, con graves consecuencias ecológicas.

- Por una parte, distintos niveles de depuración del agua residual urbana, previo a su evacuación, en función de la carga contaminante del vertido y de la zona afectada por el mismo.
- y por otra, la obligación de los Estados miembros de determinar las zonas sensibles y menos sensibles que reciben las aguas depuradas atendiendo a criterios de eutrofización actual o potencial, capacidad de absorción del medio y usos posteriores del agua.

En el anexo II de dicha ley, aparecen los criterios para la determinación de zonas sensibles y menos sensibles. Así pues, se considerará que un medio acuático es zona sensible si puede incluirse en uno de los siguientes grupos:

- Lagos, lagunas, embalses, estuarios y aguas marítimas que sean eutróficos o que podrían llegar a ser eutróficos en un futuro próximo si no se adoptan medidas de protección.

Podrán tenerse en cuenta los siguientes elementos en la consideración del nutriente que deba ser reducido con un tratamiento adicional:

- Lagos y cursos de agua que desemboquen en lagos, lagunas, embalses, bahías cerradas que tengan un intercambio de aguas escaso y en los que, por lo tanto, puede producirse una acumulación. En dichas zonas conviene prever la eliminación de fósforo a no ser que se demuestre que dicha eliminación no tendrá consecuencias sobre el nivel de eutrofización. También podrá considerarse la eliminación de nitrógeno cuando se realicen vertidos de grandes aglomeraciones urbanas.
- Estuarios, bahías y otras aguas marítimas que tengan un intercambio de aguas escaso o que reciban gran cantidad de nutrientes. Los vertidos de aglomeraciones pequeñas tienen normalmente poca importancia en dichas zonas, pero para las grandes aglomeraciones deberá incluirse la eliminación de fósforo y/o nitrógeno a menos que se demuestre que su eliminación no tendrá consecuencias sobre el nivel de eutrofización.
- Aguas continentales superficiales destinadas a la obtención de agua potable que podrían contener una concentración de nitratos superior a la que establecen las disposiciones pertinentes del Real Decreto 927/1988, de 29 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de la Administración Pública del Agua y de la Planificación Hidrológica.
- Masas de agua en las que sea necesario un tratamiento adicional al tratamiento secundario establecido en el artículo 5 del Real Decreto-ley y en este Real Decreto para cumplir lo establecido en la normativa comunitaria.

La legislación define eutrofización como: “el aumento de nutrientes en el agua, especialmente de los compuestos de nitrógeno o de fósforo, que provoca un crecimiento acelerado de algas y especies vegetales superiores, con el resultado de trastornos no deseados en el equilibrio entre organismos presentes en el agua y en la calidad del agua a la que afecta”.

En la actualidad, la eutrofización de sistemas naturales de aguas superficiales es un fenómeno muy extendido en las zonas más habitadas e industrializadas del planeta.

Como indica la OCDE, uno de los principales desafíos con los que se enfrenta la sociedad, es proteger y regenerar todas las masas de aguas superficiales y subterráneas para poder garantizar el logro de los objetivos de calidad de aguas establecidos. Esto significa reducir las descargas de contaminantes a través de la aplicación de tratamientos adecuados a las aguas residuales y una integración de la calidad de las aguas en las políticas sectoriales como es la agrícola.

La clasificación del estado de eutrofización depende de varios factores, pero el parámetro más utilizado para caracterizar el estado de los lagos es la población de fitoplancton, cuya cantidad de biomasa se suele expresar como concentración de clorofila *a*. El informe de la OCDE, de 1982, establece la siguiente clasificación en función de la concentración de clorofila *a*, la transparencia (medida con el disco de Secchi) y la concentración de fósforo total:

**Tabla 1.** Valores límite de clasificación trófica para un sistema. Informe OCDE (1982).

	Clorofila a Medias (mg/m <sup>3</sup> )	Clorofila a Máximas (mg/m <sup>3</sup> )	Transparencia Media de Secchi (m)	Transparencia Mínimo de Secchi (m)	Fósforo Total (mg P/l)
Ultraoligotrófico	< 1	< 2.5	> 12	> 6.0	
Oligotrófico	< 2.5	< 8.0	> 6.0	> 3.0	< 0.015
Mesotrófico	2.5-8	8-25	6-3	3-1.5	0.015-0.025
Eutrófico	8-25	25-75	3-1.5	1.5-0.7	0.025-0.100
Hipereutrófico	> 25	> 75	< 1.5	< 0.7	> 0.100

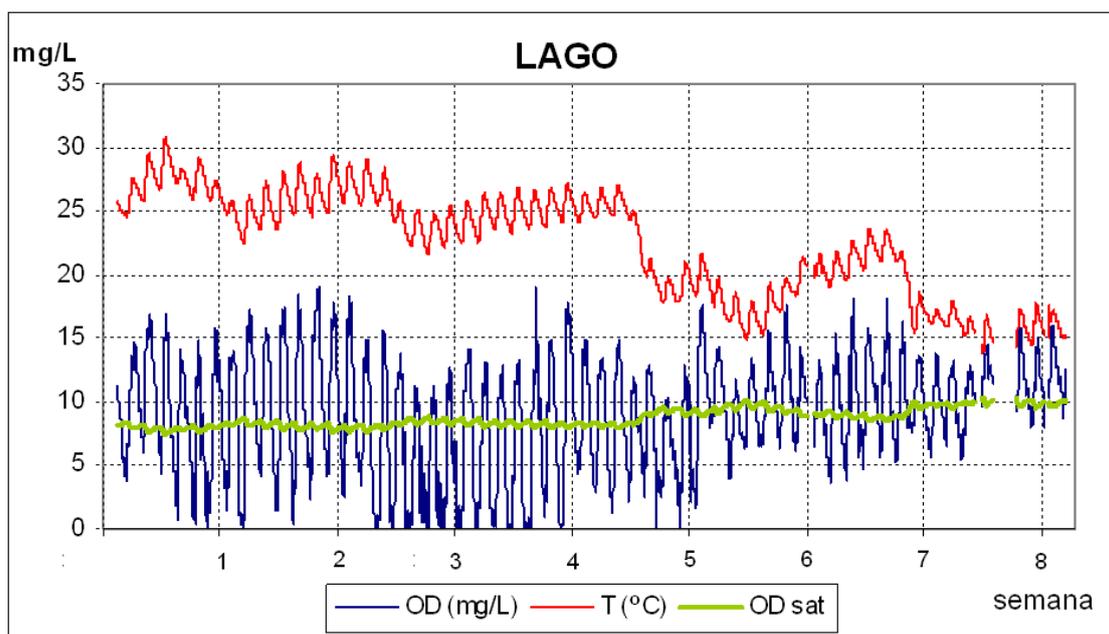
Actualmente en el lago, los valores medios de clorofila a se encuentran entre 100 y 300 mg/m<sup>3</sup>. Estos valores presentan variaciones anuales. Se observan dos máximos de clorofila *a*, uno bien entrado la primavera (Mayo) y otro a inicios del otoño (finales de Septiembre, Octubre). Los valores mínimos suelen aparecer en Agosto y a finales de invierno (fenómeno relacionado con las *fases claras* comentadas con anterioridad).

A partir de estos datos y de la tabla 1, se puede afirmar que el Lago de La Albufera, es un sistema hipertrófico. Esta situación es originada principalmente, por las entradas de materia alóctona y de nutrientes los inorgánicos: nitrógeno y fósforo.

Por otro lado, los sólidos suspendidos se encuentran siempre por encima de los 25 mg/l. En un sistema hipertrófico, la concentración de estos está íntimamente relacionada con la concentración de fitoplancton, por lo que es de esperar que ambos sigan tendencias similares.

El estado de hipertrofia también influye en la presencia de materia orgánica y de oxígeno disuelto en el lago. Se acepta, que la mayor parte de la materia orgánica particulada del sistema procede del propio fitoplancton. Además, el excesivo crecimiento del fitoplancton provoca grandes oscilaciones diarias en la concentración de oxígeno, siendo esta muy elevada durante el día (en ocasiones por encima de la concentración de saturación) y disminuyendo drásticamente durante la noche como consecuencia del alto consumo de oxígeno provocado por la respiración del abundante fitoplancton.

En la figura a continuación se presenta la evolución, durante una semana de las concentraciones de oxígeno disuelto en un punto del lago.



**Figura 2.** Evolución Oxígeno Disuelto. Fuente: Pruebas preliminares en zona piloto sobre la relación entre los sedimentos, los metales pesados y el ciclo de nutrientes. TYPASA-UPV (2004).

En esta gráfica, se observan claramente las oscilaciones diarias del oxígeno disuelto, con picos diarios por encima de la concentración de saturación y picos nocturnos por debajo de esta, alcanzándose en momentos puntuales condiciones de anoxia. También se observa, la influencia de la temperatura en la actividad fotosintética, siendo esta última, mayor a temperaturas más elevadas, desencadenando en oscilaciones en las concentraciones de oxígeno disuelto mayores.

Por otra parte, la intensa actividad fitoplanctónica que se da en el lago, provoca también que los valores diurnos del pH rara vez se encuentren por debajo de 8,5, ello se debe al consumo de grandes cantidades de CO<sub>2</sub>, que provocan al mismo tiempo, un desplazamiento del equilibrio del carbonato hasta la formación de este gas.

Las poblaciones de fitoplancton en el lago no son controladas por el zooplancton, ya que la abundancia de estos últimos es muy reducida frente a la abundancia de los primeros.

Además de las características expuestas anteriormente, los sistemas hipereutrofizados también presentan otras peculiaridades. Por ello, a modo de resumen, se pasa a citar las principales características de estos sistemas:

- Proliferación casi permanente de algas.
- Dominancia de unos pocos grupos de fitoplancton. Habitualmente ciertas diatomeas y cianofíceas.
- Desaparición de la vegetación macrófita del fondo de los lagos debido, a la extinción de la luz en las capas más superficiales, a la escasa o nula concentración de oxígeno y al carácter reductor de los sedimentos.
- Grandes oscilaciones diarias de la concentración de oxígeno disuelto entre los periodos de máxima y mínima productividad primaria.
- Disminución puntual de la concentración de oxígeno por debajo del umbral límite para el mantenimiento de la vida.
- Valores muy elevados de pH permanentemente (entre 8 y 10).
- Aparición de formas tóxicas de compuestos nitrogenados ( $\text{NH}_3$ ).

A partir de unos estudios realizados por Soria, se estableció una zonificación para el lago en función de los niveles de eutrofia. Se propusieron tres zonas:

- La zona A, de máxima eutrofización, situada en el norte y noreste del lago. Aquí desembocan las acequias con una gran carga de vertidos urbanos e industriales. Son aguas oscuras, con escaso oxígeno, mucha materia orgánica, potencial de oxidorreducción bajo y cargadas de amonio y fosfatos.
- La zona B, de eutrofización intermedia, es la franja central que cruza el lago en sentido noreste-suroeste.
- La zona C, de eutrofización menor, situada al sur y sureste del lago. Es donde desembocan las acequias que transportan agua de riego. Son aguas oxigenadas y más transparentes, con concentraciones altas de nitratos y nitritos.

En los últimos años, los datos que se han ido obteniendo, muestran una concentración de fitoplancton en el lago mucho más homogénea que la comentada anteriormente.

Este estado del sistema, no solo afecta a la calidad de las aguas del lago, sino que además, como cabe esperar, afecta a todo el ecosistema en conjunto. A continuación se enumeran los principales problemas que presenta La Albufera en relación con el estado de hipertrófia:

- Crecimientos explosivos de cianobacterias que producen diferentes tipos de toxinas, generando un factor de riesgo para la población humana y animal.
- pH muy elevados y temperaturas altas pueden aumentar la concentración en las aguas del compuesto amoniacal no ionizado que también es tóxico, sobre todo para los peces. Además, las bajas concentraciones de oxígeno que se dan durante la noche, aumentan la susceptibilidad de los organismos frente a su toxicidad.
- Liberación de sulfhídrico como consecuencia de la degradación anaeróbica que se da en los sedimentos durante los periodos de anoxia. Ello provoca el mal olor de las aguas.
- Pérdida de la mayor parte de las especies filtradoras de zooplancton.
- Desaparición de la vegetación sumergida, como consecuencia de la reducción de la transparencia, fenómeno que indica el avanzado estado de regresión del algo.
- Pobreza de la fauna bentónica y asociada a plantas. Ello determina la reproducción y permanencia de los peces y aves en el lago.
- Disminución de la biodiversidad. Desaparición o disminución drástica de especies de gran importancia económica y ecológica, como las “gambetes”, el “fartet” o el “samaruc”.
- Incremento de la tasa de colmatación del lago.
- Muertes masivas de peces y otros organismos en momentos puntuales.
- La acumulación de nutrientes en los sedimentos del lago, es tal, que se sospecha de que aunque cesaran completamente los aportes de nutrientes al sistema, el estado de eutrofia podría mantenerse durante bastante tiempo más.

#### *Restauración de sistemas naturales eutrofizados.*

Las primeras medidas aplicadas sobre estos sistemas, han consistido en reducir el aporte de nutrientes al sistema. Ello se puede conseguir de diversa manera:

- Tratando previamente las aguas residuales.
- Modificando la composición de las sustancias que los originan (por ejemplo el fósforo en los detergentes).
- Desviando los caudales de aguas residuales hacia otras zonas mucho menos sensibles.
- Gestionando de manera más eficaz el uso de fertilizantes.

Estas medidas se ha comprobado que no son suficientes para alcanzar el estado ecológico anterior al proceso de eutrofización. En numerosos casos, el propio sistema aporta los nutrientes suficientes desde el sedimento, por lo que a largo plazo no dan buenos resultados.

Es por ello, que no solo hay que actuar sobre los aportes externos, sino que además, se han de realizar actuaciones dentro del propio sistema. Entre las posibles intervenciones se pueden citar:

- El dragado completo del sistema. De este modo se elimina la capa de sedimentos que acabará siendo fuente de nutrientes.
- La fijación de fósforo en los sedimentos, mediante la adición de algún compuesto químico. De esta forma, se impide que se movilice este elemento hacia la columna de agua inmediatamente superior.
- El empleo de humedales artificiales o filtros verdes para tratar las aguas eutrofizadas.

A partir de experiencias relacionadas con la implantación de sistemas de tratamientos de aguas residuales basados en humedales artificiales con macrófitos, se plantea la posibilidad de implantar un Humedal Artificial de Flujo Superficial para depurar las propias aguas del lago. Una actuación así en la Albufera de Valencia, supondría las siguientes ventajas sanitarias, medioambientales y sociales:

- Reducción de la concentración de fitoplancton.
- Eliminación de sólidos suspendidos.
- Eliminación de nitrógeno mediante procesos de nitrificación y desnitrificación.
- Eliminación de fósforo mediante procesos de adsorción y precipitación del fósforo.
- Eliminación de patógenos.
- Asimilación del nitrógeno, fósforo y metales por las plantas.
- Creación de zonas para la nidificación de las aves.
- Atracción de especies animales (mamíferos, reptiles, aves e insectos).
- Creación de espacio para el estudio de la fauna, la ornitología y la botánica.
- Simbiosis entre el medio natural y el sistema de tratamiento.
- Atracción social, creando aceptación por el tratamiento sanitario y medioambiental.

- Creación de rutas de senderismo e integración socio-ambiental.
- Se trata de un método sencillo, natural y económico.

## 1.2. Tratamiento de aguas mediante humedales artificiales.

Antes de describir un humedal artificial, es conveniente comprender que es un humedal natural, y como se puede aplicar este sistema natural a las necesidades del hombre. La Convención de Ramsar<sup>1</sup> emplea un criterio amplio para determinar qué humedales quedan comprendidos en su alcance. El texto de la Convención (artículo 1.1), define los humedales como: "*Extensiones de marismas, pantanos y turberas, o superficies cubiertas de agua, sean éstas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluidas las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda de seis metros*". Además, la Convención de Ramsar en su artículo 2.1, estipula que los humedales: "*podrán comprender sus zonas ribereñas o costeras adyacentes, así como las islas o extensiones de agua marina de una profundidad superior a los seis metros en marea baja, cuando se encuentren dentro del humedal*".

Por otro lado los humedales específicamente contruidos con el propósito de controlar la contaminación del agua han recibido gran cantidad de nombres en las distintas partes del mundo donde son usados. La denominación más extendida es "Humedales Artificiales" o "Humedales Contruidos" ("Constructed Wetlands"; U.S. Environmental Protection Agency, 1988).

Los humedales artificiales son sistemas pasivos de depuración contruidos por lagunas y canales poco profundos (normalmente menos de 1 metro), plantados con plantas propias de zonas húmedas (macrófitos acuáticos), y en los que los procesos de descontaminación son ejecutados simultáneamente por componentes físicos, químicos y biológicos. Estos humedales también se pueden utilizar para restaurar ecosistemas y entonces la depuración puede ser un objetivo secundario. (García et al, 2004).

El humedal artificial, es un sistema de depuración donde la mayor parte del volumen del influente sale depurado del sistema. Los humedales artificiales son sistemas de depuración sencillos que no requieren de energía externa para funcionar, ya que el agua se mueve por gravedad y los procesos, como el de aireación, se producen mediante el intercambio gaseoso de los macrófitos.

### 1.2.1. Componentes de un humedal artificial

Los humedales artificiales consisten en el diseño de una cubeta de diferentes dimensiones en función de las necesidades, que contiene, básicamente, agua, substrato sobre el cual se fijan las plantas emergentes. Otros componentes importantes de los humedales son los microorganismos, asociados a las raíces de vegetación, elemento fundamental en la degradación de la materia orgánica y la absorción de nutrientes y asociado al funcionamiento del humedal, también se desarrolla una comunidad

---

<sup>1</sup> La Convención sobre los Humedales, firmada en Ramsar, Irán, en 1971, es un tratado intergubernamental que sirve de marco para la acción nacional y la cooperación internacional en pro de la conservación y uso racional de los humedales y sus recursos. Hay actualmente 154 Partes Contratantes en la Convención y 1650 humedales, con una superficie total de 149.6 millones de hectáreas, designados para ser incluidos en la Lista de Humedales de Importancia Internacional de Ramsar. ([www.ramsar.org](http://www.ramsar.org))

bacteriana, planctónica y de invertebrados acuáticos que colonizan el medio de forma natural, fomentado el aumento de la biodiversidad y la renaturalización de los aportes hídricos.

### *Agua.*

Para la formación de un humedal se requiere una pequeña capa de agua sobre una superficie de terreno suficientemente impermeable para prevenir la infiltración al subsuelo. Con esta premisa puede construirse un humedal en casi cualquier parte, modificando la superficie del terreno para que pueda almacenar agua y sellando la cubeta para retener el agua aunque esto no implica que cualquier ubicación sea adecuada para este tipo de tratamiento, ya que previamente hay que estudiar otros factores (morfología del terreno, climatología de la zona, etc.).

La hidrodinámica en un humedal artificial de flujo superficial, esta definida por las entradas de agua como la precipitación y el agua a tratar; y las salidas como la evapotranspiración y el agua tratada.

Por lo anterior se debe considerar, que el estudio de la hidrología es un aspecto fundamental en humedales artificiales de flujo superficial, a continuación se nombran algunos aspectos importantes:

- Pequeños cambios en la hidrología pueden tener efectos importantes en el humedal y en la efectividad del tratamiento.
- Debido al área superficial del agua y a su poca profundidad, el sistema actúa recíproca y fuertemente con la atmósfera a través de la lluvia y la evapotranspiración (la pérdida combinada de agua por evaporación de la superficie de agua y pérdida a través de la transpiración de las plantas).
- La densidad de la vegetación en un humedal afecta fuertemente a su hidrodinámica, primero, obstruyendo caminos de flujo siendo sinuoso el movimiento del agua a través de la red de tallos, hojas, raíces y rizomas; y segundo, bloqueando la exposición al viento y al sol.

Sobre la distribución del agua en los humedales artificiales, es importante garantizar una distribución homogénea de la misma, en todo el terreno, evitando la presencia de zonas muertas y la formación de caminos preferenciales.

### *Vegetación.*

En los humedales artificiales de flujo superficial las plantas actúan como base para el crecimiento de la biopelícula encargada de la biodegradación, así como de la filtración mecánica de las partículas. La presencia de la vegetación distribuye y ralentiza la velocidad del agua (Pettecrew y Kalff, 1992) lo que favorece la sedimentación de los

sólidos suspendidos y aumenta el tiempo de contacto entre el agua y la vegetación. La vegetación disminuye la velocidad del viento, reduciendo la resuspensión; la luz y amortiguando los cambios de temperatura permitiendo temperaturas más cálidas en invierno y más frías en verano (Brix, 1994a). En climas fríos por tanto la vegetación protege de la congelación, favoreciendo la continuidad del flujo en profundidad. Este efecto protector es mayor en sistemas de flujo subsuperficial los cuales han demostrado seguir trabajando adecuadamente a temperaturas de -40 °C (Kadlec et al., 2000).

Así pues, las plantas emergentes contribuyen al tratamiento del agua residual y escorrentía de varias maneras:

- Estabilizan el sustrato y limitan la canalización del flujo.
- Evitan la formación de caminos preferenciales.
- Disminuyen la velocidad del agua mejorando la sedimentación de materiales en suspensión.
- Toman el carbono, nutrientes y elementos traza y los incorporan a los tejidos de la planta.
- Aumentan la transferencia de gases entre la atmósfera y los sedimentos oxigenando el sustrato y disminuyendo las posibilidades de generación de condiciones de anoxia.
- El tallo y los sistemas de la raíz dan lugar a sitios para la fijación de microorganismos, así como dan estructura al sustrato.

Según algunos manuales, para sistemas de flujo superficial debería favorecerse la mayor diversidad de especies posibles (Merz, 2000), ya que ello permite una mayor estabilidad a largo plazo frente a las perturbaciones (por ejemplo frente a plagas), aumenta la superficie colonizada por las bacterias, y mejora el valor ecológico del humedal. Sin embargo una mayor biomasa heterogénea también tendrá un efecto negativo debido a la mayor producción de necromasa y su degradación.

#### *Subsustratos, sedimentos y restos de vegetación.*

Los sustratos en los humedales artificiales incluyen suelo, arena, grava, roca y materiales orgánicos como el compost. Sedimentos y restos de vegetación se acumulan en el humedal debido a la baja velocidad del agua y a la alta productividad típica de estos sistemas. El sustrato, sedimentos y los restos de vegetación son importantes por varias razones:

- Soportan a muchos de los organismos vivientes en el humedal.

- La permeabilidad del sustrato afecta el movimiento del agua a través del humedal.
- Muchas transformaciones químicas y biológicas (sobre todo microbianas) tienen lugar dentro del sustrato.
- El sustrato proporciona almacenamiento para muchos contaminantes, por ello, favorece su retención en el sistema, eliminándolos del agua.
- La acumulación de restos de vegetación aumentan la cantidad de materia orgánica en el humedal.

La materia orgánica es un elemento fundamental en el ciclo de materia del sistema, la fijación de microorganismos, y es una fuente de carbono, que es la fuente de energía para algunas de las más importantes reacciones biológicas en el humedal. Sin embargo, a pesar de estas ventajas, será necesario realizar ciertas operaciones de mantenimiento para evitar la retroalimentación del agua desde los sedimentos.

Las características físicas y químicas del suelo y otros sustratos se alteran cuando se inundan. En un sustrato saturado, el agua reemplaza los gases atmosféricos en los poros y el metabolismo microbiano consume el oxígeno disponible. Aunque se presenta difusión de oxígeno de la atmósfera, la velocidad de consumo puede ser mayor a la velocidad a la que se produce la difusión, por lo que puede darse lugar a la formación de un sustrato anóxico, lo cual será importante para la remoción de contaminantes como el nitrógeno y metales.

Así pues, dependiendo de los objetivos del humedal artificial será necesario mantener un calado u otro de la masa de agua, unas características específicas de flujo y unas condiciones de oxigenación determinadas.

### *Microorganismos.*

Una característica fundamental de los humedales es que sus funciones son principalmente reguladas por los microorganismos y su metabolismo. Los microorganismos incluyen bacterias, levaduras, hongos, y protozoarios. La biomasa microbiana consume gran parte del carbono orgánico y muchos nutrientes.

Esta actividad microbiana:

- Transforma un gran número de sustancias orgánicas e inorgánicas en sustancias inocuas e insolubles.
- Altera las condiciones de sustrato y por tanto la capacidad de proceso del humedal.

Algunas transformaciones microbianas son aeróbicas (requieren la presencia de oxígeno), mientras que otras son anaeróbicas (requieren condiciones de falta de oxígeno). Otras muchas especies de bacterias son facultativas, capaces de funcionar tanto en condiciones aeróbicas como de anaerobiosis, adaptándose según los cambios ambientales.

Las poblaciones microbianas se ajustan a los cambios en el agua que les llega y se pueden extender rápidamente cuando se tiene la suficiente energía. Cuando las condiciones medioambientales no son convenientes, muchos microorganismos se inactivan y pueden permanecer en estado de latencia durante años.

La comunidad microbiana de un humedal construido puede ser afectada por sustancias tóxicas, como pesticidas y metales pesados. Debe pues, prevenirse la introducción de estas sustancias en concentraciones que puedan ser perjudiciales para los microorganismos, a no ser que el objetivo del humedal sea el tratamiento de aguas contaminadas con metales pesados, aunque el caso que nos ocupa no es este.

### *Fauna.*

Los humedales artificiales proveen de un hábitat para una rica diversidad animal, tanto de invertebrados como de vertebrados que pueden llegar a formar un ecosistema estable. Obviando posibles cambios estructurales o funcionales durante ciertas fases del mantenimiento del mismo, se puede considerar que los humedales artificiales son hábitats estables.

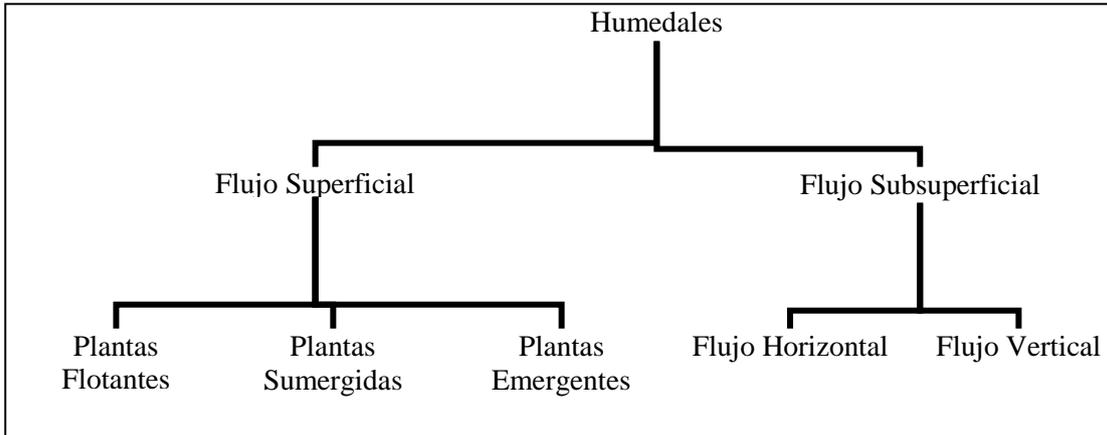
Tanto los invertebrados como los vertebrados tienen una serie de funciones dentro del ecosistema del humedal, por lo que su establecimiento en el mismo es fundamental para el correcto funcionamiento de los procesos que se producen en el mismo.

Los invertebrados mejoran la calidad del agua al consumir la materia orgánica en forma de detritus. También controlan las diferentes comunidades de invertebrados creando un ecosistema donde los de mayor tamaño (p. ej. las libélulas) son predadoras de larvas de moscas y mosquitos, manteniendo la población de los mismos dentro de unos límites aceptables. Además ciertas clases de invertebrados también son bioindicadores de la contaminación del medio en el que se desarrollan, sirviendo pues para identificar los posibles problemas de contaminantes en el agua de entrada y solucionarlos rápidamente, realizando un seguimiento de las especies del humedal.

Los vertebrados, se alimentan de los anteriores, con lo que ejercen un control demográfico sobre estos y aumentan el valor ecológico del humedal. Por estos motivos, es fundamental una explotación lo menos intervenida posible, de modo que se favorezca una estabilización de la fauna en el humedal, facilitando aún más la renaturalización buscada en la zona destinada a la implantación del humedal artificial.

### 1.2.2. Tipos de Humedales Artificiales.

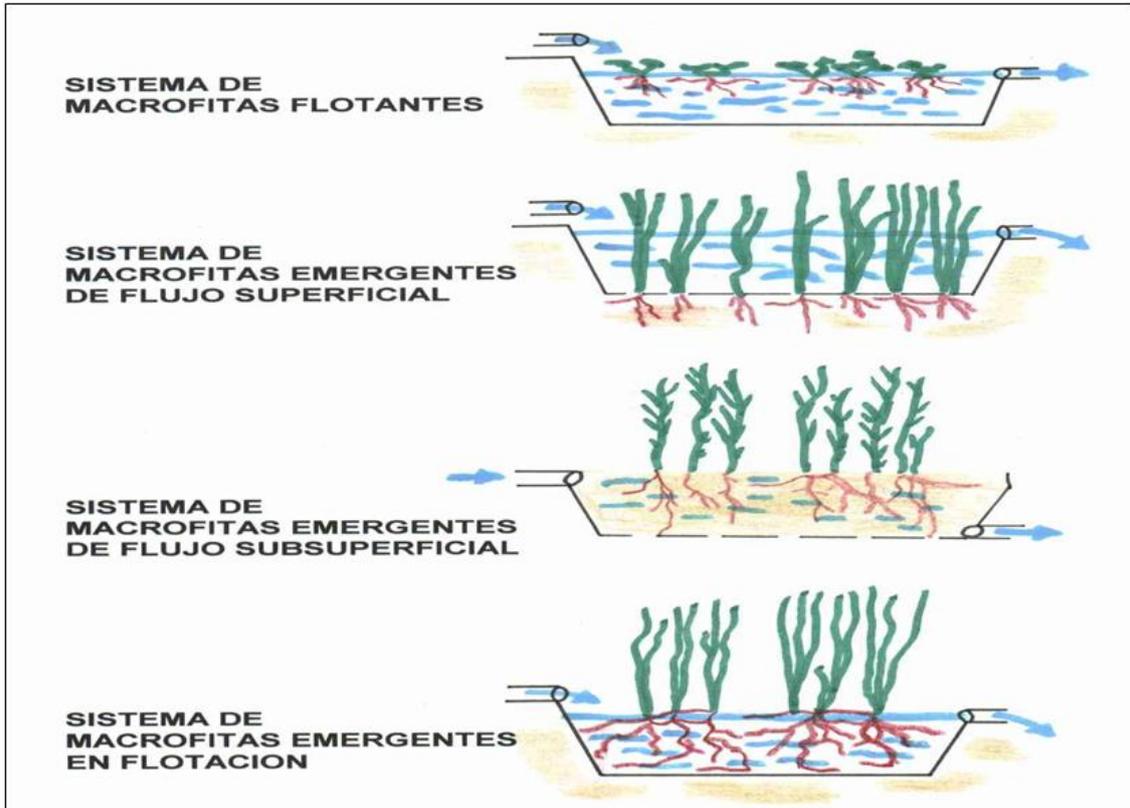
Los humedales artificiales, se han clasificado tradicionalmente en dos tipologías atendiendo a si la circulación del agua es de flujo libre o superficiales y de flujo subsuperficial (horizontal y vertical). Cada tipo tiene unas características particulares y consiguen distintos rendimientos de depuración.



**Figura 3.** Tipos de Humedales Artificiales.

Los sistemas que utilizan plantas macrófitas acuáticas se basan en un monocultivo o policultivo de plantas superiores (macrófitas) dispuestas en lagunas, tanques o canales poco profundos. Aunque realizan normalmente tratamientos terciarios del agua que reciben, pueden incluso llegar a realizar tratamientos secundarios. Las propias plantas suministran el oxígeno al proceso de depuración que se realiza en el sistema radicular. Las propias plantas degradan, absorben y asimilan en sus tejidos los contaminantes, pero también proporcionan una extensa superficie donde se posibilita el crecimiento bacteriano y se filtran los elementos sólidos en suspensión.

Los diferentes sistemas de depuración que utilizan macrófitas acuáticas se clasifican, según se presenta en la figura a continuación:



**Figura 4.** *Sistemas de Humedales Artificiales con macrófitos.*

*Sistema de macrófitas emergentes de flujo superficial*

Este sistema y el siguiente utilizan plantas enraizadas y tolerantes al encharcamiento. Suelen ser vivaces y sus hojas se secan en invierno, rebrotando en primavera a partir de rizomas, como los carrizos (*Phragmites* sp.), juncos (*Scirpus* sp.), ó, Eneas (*Typhasp*).

En los sistemas de flujo superficial la eliminación de contaminantes se produce por reacciones que tienen lugar en el agua y en la zona superior de contacto, ya que por las raíces circula una escasa cantidad de agua residual, por lo que su potencial de depuración es muy restringido.

Pero las ventajas de este sistema es su bajo coste de ejecución y mantenimiento.

*Sistema de macrófitas emergentes de flujo subsuperficial*

Similar al anterior, utiliza una capa de grava o de suelo por donde circula el agua por gravedad. Se obliga a pasar toda el agua residual por las raíces, lo que incrementa enormemente el rendimiento depurativo. Su mayor inconveniente es la rápida colmatación del terreno con el paso de los años, ya sea por las propias raíces y rizomas o por los sólidos sedimentados. Eliminar los contaminantes significa entonces destruir el sistema.

### *Sistema de macrófitas flotantes*

Utilizan especies que son flotantes de forma natural, como las lentejas de agua (Lemna, Wolfia, Spirodell el helecho Azolla sp., el jacinto de agua (Eichornia crassipes) o los nenúfares (Victoria regia).

Estos sistemas tienen la ventaja de que el contacto entre las raíces y el agua residual es total y presenta una gran superficie. Sin embargo, estas especies no alcanzan un gran tamaño y su producción de biomasa es limitada, lo cual reduce su valor depurativo absoluto, aunque absorben grandes cantidades de nitrógeno y fósforo. Sin embargo, son muy efectivos cuando las concentraciones de materia orgánica y de sólidos disueltos son bajas.

### *Sistema de filtro de macrófitas en flotación*

Este sistema utiliza macrófitas de tipo emergente, que de forma natural se encuentran enraizadas en el terreno, pero que aquí se transforman artificialmente en flotantes. Se trata de un método novedoso que combina las ventajas de los sistemas flotantes y los de macrófitas emergentes, eliminando o reduciendo sus inconvenientes.

El sistema es capaz de realizar un tratamiento terciario de los efluentes secundarios de sistemas de depuración convencionales eliminando elementos eutrofizantes, especialmente fósforo y nitrógeno. Efectúa un tratamiento secundario descomponiendo la materia orgánica por medio de los microorganismos adheridos al sistema radicular de las plantas, y también favorece la disminución de sólidos en suspensión al quedarse adheridos en el entramado de raíces. Algunas especies de plantas emergentes tienen la capacidad de absorber cantidades importantes de metales pesados o descomponer fenoles, por lo que el sistema es también válido para tratar vertidos industriales.

El sistema lo constituye básicamente un tapiz de vegetación flotante que ocupa toda la superficie de una laguna o de una serie de canales por donde circula el agua. La profundidad de los mismos varía entre los 25 y 75 cm. Las plantas deben ser en lo posible autóctonas de la región y se disponen de tal forma que sus raíces, rizomas y parte del tallo se encuentren sumergidos. Hasta la fecha se ha trabajado especialmente con carrizos (Phragmites sp.), esparganios (Sparganium sp.), juncos (Scirpus, Schoenus), lirio de agua (Iris pseudocorus) y espadañas o enes (Typha sp.). Estas últimas parecen haber dado los mejores resultados, con altos rendimientos de crecimiento y depuración.

Al crecer flotando, estas especies forman una densa esponja de raíces y rizomas que ocupan todo el volumen del vaso (laguna o canal), y obligan a que el agua circule por esta maraña de vegetación, que actúa a su vez de soporte de los microorganismos que degradan la materia orgánica. Las hojas, paralelamente, bombean oxígeno a las raíces, lo que favorece el proceso de degradación de los contaminantes.

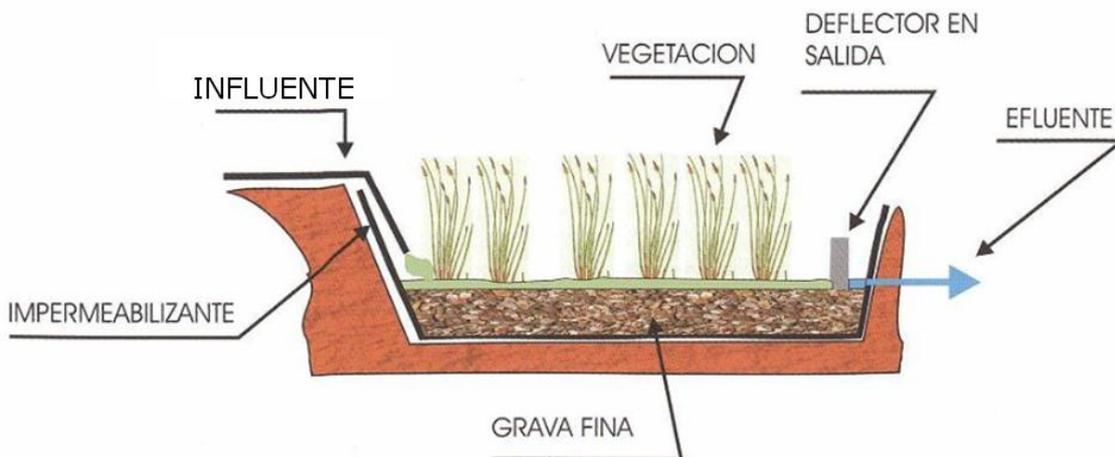
### 1.2.2.1 Humedales Artificiales de Flujo Superficial

En inglés *free water surface constructed wetlands, FWS*, en estos sistemas el agua está expuesta directamente a la atmósfera y circula preferentemente a través de los tallos de los macrófitos. En realidad estos filtros se pueden entender como una modificación del lagunaje convencional con menor profundidad (no más de 0.4 m) y con plantas.

Los Humedales Artificiales de Flujo Superficial, *FS*, suelen ser sistemas de gran tamaño con extensiones de varias e incluso hasta centenares de hectáreas, normalmente se les aplica agua residual pretratada en forma continua y el tratamiento se produce durante la circulación del agua a través de los tallos y raíces de la vegetación emergente implantada. Tallos, raíces y hojas caídas sirven de soporte para la fijación de la película bacteriana responsable de los procesos de biodegradación, mientras que las hojas que están por encima de la superficie del agua dan sombra a la masa de agua, limitando el crecimiento de microalgas.

Se suelen utilizar en programas de restauración ambiental donde la depuración es un valor añadido, se pueden diseñar con el objetivo de crear nuevos hábitats para la fauna y flora o para mejorar las condiciones de humedales naturales próximos. Esta clase de sistemas suele incluir combinaciones de espacios abiertos y zonas vegetadas e islotes con la vegetación adecuada para proporcionar hábitats de cría para aves acuáticas.

Los humedales de flujo superficial se suelen utilizar como tratamiento adicional a efluentes previamente tratados en depuradoras de tipo convencional. Hay muy pocos sistemas a escala real que traten directamente las aguas residuales (Kadlec y Knight, 1996).



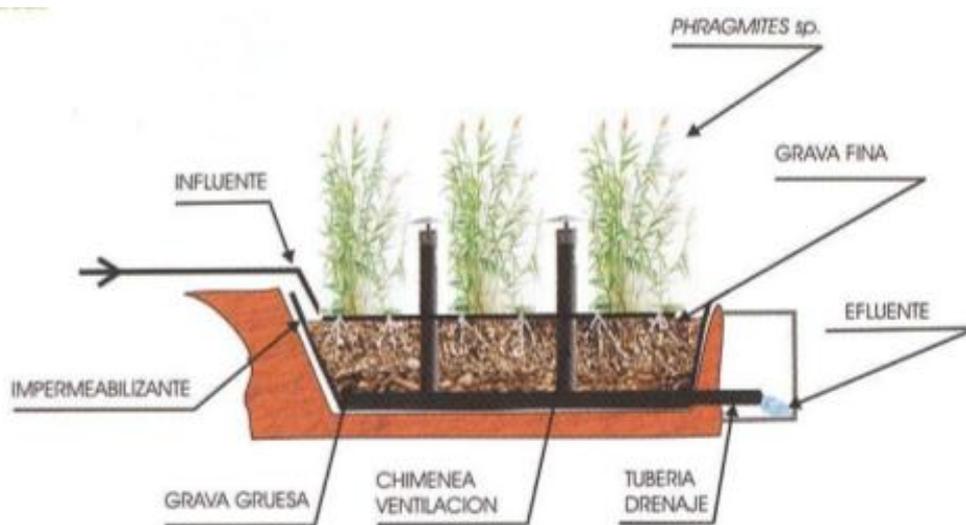
**Figura 5.** Corte longitudinal de un Humedal Artificial de Flujo Superficial

### 1.2.2.2. Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial

En inglés *vegetated submerged beds*, *VSB*, aquí la circulación de agua es subterránea a través de un medio granular (arena, gravilla, grava), de permeabilidad suficiente, confinado en un recinto impermeabilizado, y que sirve de soporte para el enraizamiento de la vegetación, que habitualmente suele ser carrizo. Con una profundidad de la lámina de agua de alrededor de 0.6 m y en contacto con los rizomas y raíces de los macrófitos clásicos de infiltración del terreno. Este tipo de humedales se podría entender como una modificación de los sistemas clásicos de los sistemas de infiltración en el terreno.

Se suelen construir para tratar aguas simplemente pretratadas y constituyen, por tanto, la unidad de proceso clave en la instalación de depuración. Este tipo de instalaciones se suelen utilizar para depurar las aguas residuales generadas en pequeños núcleos de población de menos de 2000 habitantes.

A su vez, los humedales artificiales de flujo Subsuperficial, *FSS*, se clasifican en el sentido de circulación del agua en horizontales o verticales. Los humedales con flujo horizontal funcionan perfectamente inundados, aunque hay algunas experiencias recientes satisfactorias con sistemas intermitentes (Vymazal y Masa; 2003). Los humedales con flujo vertical se diseñan con funcionamiento intermitente, es decir, tienen fases de llenado, reacción y vertido. La intermitencia y la inundabilidad permanente confieren propiedades muy diferentes a los sistemas verticales y horizontales respectivamente.



**Figura 6.** Corte longitudinal de un Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial

Según el caso de aplicación requerido los Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial presentaran ventajas e inconvenientes sobre los de Flujo Superficial. Las principales ventajas del flujo subsuperficial sobre el superficial son:

- Menor incidencia de malos olores debido a la naturaleza subterránea del flujo. Esta ventaja es relativa ya que los sistemas de flujo superficial se suelen aplicar para mejorar la calidad del efluente secundario, con lo que ya reciben aguas bastante tratadas, con bajo potencial para la emisión de malos olores.

- Bajo riesgo de exposición directa de las personas y de aparición de insectos gracias también al flujo subterráneo.
- Protección térmica debida a la acumulación de restos vegetales y de flujo subterráneo que reduce la posible estratificación térmica del agua y evita flujos preferenciales. Esta es una ventaja interesante en países nórdicos, donde la cobertura de hielo y nieve invernal afectan de esta forma al proceso. También evita la aparición de gradiente térmico medido en verano ha sido de hasta 12°C/m, mientras que en un humedal con plantas (1800 g/m<sup>2</sup> de biomasa aérea expresada en peso seco) y restos vegetales (310 g/m<sup>2</sup>) ha sido de 3.4°C/m (García et al., 2003).

Entre los inconvenientes cabe destacar:

- Mayor coste de construcción debido fundamentalmente al material granular. Según los estudios de Collado (2000), basados en proyectos constructivos de sistemas de lagunaje y humedales de flujo subsuperficial, el coste se puede llegar a incrementar hasta un 30% como consecuencia del material granular.
- Menor valor como ecosistemas para la vida salvaje debido a que el agua es difícilmente accesible a la fauna.

### **1.2.3. Características de dimensionamiento y diseño de humedales artificiales de flujo superficial**

#### *Tratamientos previos*

En los sistemas de flujo subsuperficial el tratamiento primario es imprescindible para evitar la colmatación de la instalación y garantizar una buena conductividad hidráulica.

En los Filtros Verdes del Tancat de la Pipa, se trata del lago de La Albufera sin ningún pretratamiento, aquí radica la novedad de operación ya que es usual en los sistemas de flujo superficial un tratamiento previo, generalmente un tratamiento secundario.

#### *Evapotranspiración*

Entre los aspectos hidrológicos unos de los más importantes es la Evapotranspiración (ET). Se considera que en sistemas de FS está entre el 70 y 80% de la evaporación obtenida con un evaporímetro (Reed et al. 1995; Kadlec y Knight 1996). En zonas cálidas la EVT de un humedal superficial en verano puede llegar a ser de 5 mm/d (USEPA, 2000). El efecto de la EVT aumenta a medida que disminuye el tamaño

del humedal, de forma que humedales superficiales de 0.5 Ha. pueden llegar a perder el doble de agua por EVT que la calculada por el evaporímetro. Diversos estudios han demostrado que obviar la EVT puede originar cálculos erróneos de rendimientos (Soto et al., 1999).

#### *Gradiente hidráulico*

El agua se mueve a través de un humedal por la diferencia de cotas entre la entrada y la salida, movimiento que se verá impedido por las pérdidas de carga a la resistencia de los tallos de las plantas del humedal, aquí el agua apenas circula por el sustrato, este gradiente se consigue regulando la altura de salida del agua.

#### *Profundidad de la lámina de agua*

La profundidad está determinada por la tolerancia de la vegetación a la inundación, que como máximo suele ser de 0,6m, utilizándose valores entre 0,25 a 0,5 m de lámina de agua libre.

#### *Porosidad*

La proporción del sistema que realmente está ocupada por el agua varía según el tipo de humedal. En sistemas de flujo superficial se admite que la porosidad fluctúa entre 0,65 y 0,75 según la densidad de vegetación (Kadlec y Knight, 1996).

#### *Tiempo de permanencia*

Se define como la relación entre el volumen efectivo de agua y el caudal de entrada. Sin embargo este tipo de retención teórico no tiene por que coincidir con el real, lo habitual es que los tiempos medidos sean inferiores al teórico debido a la existencia de flujos preferenciales (Kadlec et al. 2000).

Combinar las zonas plantadas y sin plantar parece minimizar posibles cortocircuitos en sistemas de flujo superficial. La presencia de estas zonas sin vegetación favorece además otros procesos, como la mezcla de la columna de agua y por lo tanto su reaireación, así como su mayor contacto con la luz.

#### *Pendiente*

La pendiente del lecho del humedal es un factor importante a tener en cuenta ya que favorece el flujo hidráulico. En sistemas de FS la pendiente puede ser muy baja ya que la regulación del nivel salida puede crear el gradiente hidráulico suficiente.

#### *Geometría del humedal*

La relación longitud/ancho se recomienda como mínimo 5/1, en humedales de flujo superficial debe potenciarse la hidráulica en flujo pistón (Persson et al, 1999), con anchuras máximas de 10-15 m, y distribución uniforme de agua en la entrada.

### *Distribución del agua*

El buen funcionamiento del humedal depende en gran medida de que todo el volumen del humedal permanezca activo evitando flujos preferenciales. Lo ideal sería que la entrada del agua fuese lo más uniforme posible. En caso de aportes puntuales, estos no deben superar los 3 – 5 m de distancia en grandes sistemas de flujo superficial.

#### 1.2.4. Mecanismos de eliminación de contaminantes en humedales artificiales

Los mecanismos involucrados en la eliminación de los principales contaminantes presentes en las aguas residuales a tratar mediante el empleo de Humedales Artificiales son los siguientes:

### *Eliminación de sólidos en suspensión*

La eliminación de la materia en suspensión se realiza mediante los siguientes procesos:

- *Sedimentación*: La materia en suspensión sedimentable (principalmente de naturaleza orgánica), presente en las aguas a tratar decanta por la acción exclusiva de la gravedad.
- *Floculación*: Permite la sedimentación de partículas de pequeño tamaño, o de menor densidad que el agua, al producirse agregados de las mismas con capacidad para decantar.
- *Filtración*: Se produce la retención de materia en suspensión al pasar las aguas a través del conjunto que forman el sustrato, los rizomas, las raíces y los tallos de la vegetación.

En los de flujo libre o superficiales, la eliminación de la materia en suspensión tiene lugar principalmente, por fenómenos de sedimentación y de filtración de las aguas a su paso por toda la masa de tallos y de los restos de vegetación caídos a la masa de agua. En este tipo de humedales para conseguir elevados rendimientos de eliminación de materia en suspensión se requiere disponer de zonas con abundante vegetación, que faciliten la sedimentación (al disminuir la velocidad de paso de las aguas) y la filtración, a la vez que, por el efecto sombra, se evita el crecimiento excesivo de microalgas, que

como en el caso de los lagunajes, podría incrementar los contenidos en sólidos en suspensión de los efluentes finales.

Los sólidos de naturaleza orgánica retenidos en el sustrato experimentan reacciones de biodegradación, que se aceleran en los momentos del año de las temperaturas más elevadas. Esta degradación supone una fuente interna de materia orgánica disuelta, lo que podría explicar, según el informe USEPA (2000), el porqué los de flujo subsuperficial no presentan en época veraniega rendimientos más elevados de eliminación de materia orgánica que los que se logran en periodo invernal.

### *Eliminación de Materia Orgánica*

En los Humedales Artificiales la materia orgánica en suspensión irá decantando y la presente en forma particulada, quedará retenida por filtración, al pasar por el entramado sustrato-raíces-tallos.

En cuanto a la materia orgánica disuelta, al igual que sobre la particulada, actúan los microorganismos presentes en el humedal, principalmente bacterias, que utilizarán esta materia orgánica a modo de sustrato.

En las distintas modalidades de Humedales Artificiales se dan zonas con presencia o ausencia de oxígeno molecular, por lo que la acción de las bacterias sobre la materia orgánica tiene lugar tanto a través de procesos biológicos aeróbios como anaeróbios.

En el caso de los de flujo superficial la principal fuente de aportación de oxígeno a la masa líquida viene presentada por los fenómenos de reaeración superficial provocados por el viento. Sin embargo la acción de la reaeración superficial se ve minimizada cuando la vegetación del humedal presenta una elevada densidad. Además de lo anterior, la aportación de oxígeno por las propias plantas acuáticas tiene una menor importancia ya que todo el oxígeno aportado por las plantas se consume por la demanda existente en los sedimentos presentes en el fondo del humedal. Limitando con frecuencia la zona aerobia a las zonas de aguas abiertas y a una proporción mayor, bastante limitada, de la columna de agua.

### *Eliminación de Nutrientes*

Las dos vías principales de eliminación del nitrógeno amoniacal en los Humedales Artificiales se dan mediante procesos de nitrificación-desnitrificación y asimilación de las propias plantas del humedal.

En el caso de la asimilación del nitrógeno amoniacal por las plantas del humedal, numerosos estudios han concluido que, mediante esta asimilación y la posterior siega de las plantas, no se llega a eliminar más allá del 15-20% del nitrógeno amoniacal presente en las aguas a tratar, si no se procede a la siega y retirada periódica de la vegetación de los humedales.

La adsorción del fósforo por las plantas de los humedales se dan en mucha menor cuantía que en el caso del nitrógeno, siendo aproximadamente del 10%, con lo cual tienen más relevancia los procesos fisicoquímicos, como la adsorción sobre el sustrato filtrante y sobre las partículas orgánicas y la precipitación mediante reacciones del fósforo con el hierro, aluminio y calcio presentes en las aguas y en el sustrato, dando lugar a la formación de fosfatos insolubles.

#### *Eliminación de Metales Pesados*

En Humedales Artificiales la eliminación de los metales pesados (cadmio, cinc, cobre, mercurio, selenio y plomo), se da mediante los siguientes procesos:

- Procesos de adsorción.
- Precipitación química.
- Sedimentación.
- Asimilación por parte de las plantas.

Estos metales retenidos pueden volver a liberarse en ciertas épocas del año, en función de las variaciones del potencial de oxidación-reducción que tienen lugar dentro del sistema.

#### *Eliminación de organismos patógenos*

Los mecanismos más relevantes que tiene lugar en los Humedales Artificiales para la eliminación de organismos son:

- Adsorción sobre las partículas del sustrato filtrante.
- La toxicidad que los antibióticos liberados por las raíces de las plantas ejercen sobre los organismos patógenos.
- La acción depredadora de bacteriófagos y protozoos.

#### 1.2.5. Ventajas e inconvenientes de los Humedales Artificiales.

Al igual que otros sistemas de depuración, los humedales construidos presentan algunas ventajas frente a los sistemas convencionales mecanizados, entre los cuales cabe destacar (García et al., 1997; García et al., 2001a):

- Simplicidad en la operación. Requieren tiempo bajo en operarios y pocos equipos electromecánicos. El tiempo de operario necesario estimado en una evaluación sobre los sistemas de depuración de aguas residuales urbanas mediante lagunaje en Cataluña, similares a los humedales, llevada a cabo bajo el patrocinio de la agencia Catalana del Agua, fue media de 0.6 horas/día (García et al., 2001b). Pueden ser explotados por operarios con poca experiencia en tratamiento de aguas residuales.
- Consumo energético muy bajo. En general limitado al pretratamiento o a elevaciones. En sistemas de lagunaje con requerimientos similares de pretratamiento y elevaciones el consumo osciló entre 0 y 0.19 kWh/m<sup>3</sup> (García et al., 2001b).
- Baja producción de residuos durante la operación del sistema. Los residuos y fangos se suelen limitar a los generados por el pretratamiento y el tratamiento primario.
- Bajo coste de explotación y mantenimiento en la operación del sistema. Los costes actuales de los sistemas que gestiona la Agencia Catalana del Agua (EDARs de menos de 2000 hab-eq) se encuentran en entorno a 24000 y 30000 €/año (Robusté, 2004). Esta ventaja es en realidad una consecuencia de las anteriores.
- Fiabilidad en la operación del sistema de tratamiento. Son sistemas con tiempos de permanencia hidráulicos muy altos con lo que variaciones puntuales de caudal o carga contaminante afectan poco la nivel de depuración.
- Bajo impacto ambiental sonoro y muy buena integración en el medio ambiente natural.
- Creación y restauración de zonas húmedas aptas para potenciar la vida salvaje, la educación ambiental y las zonas de recreo.

Los principales inconvenientes frente a los sistemas convencionales son:

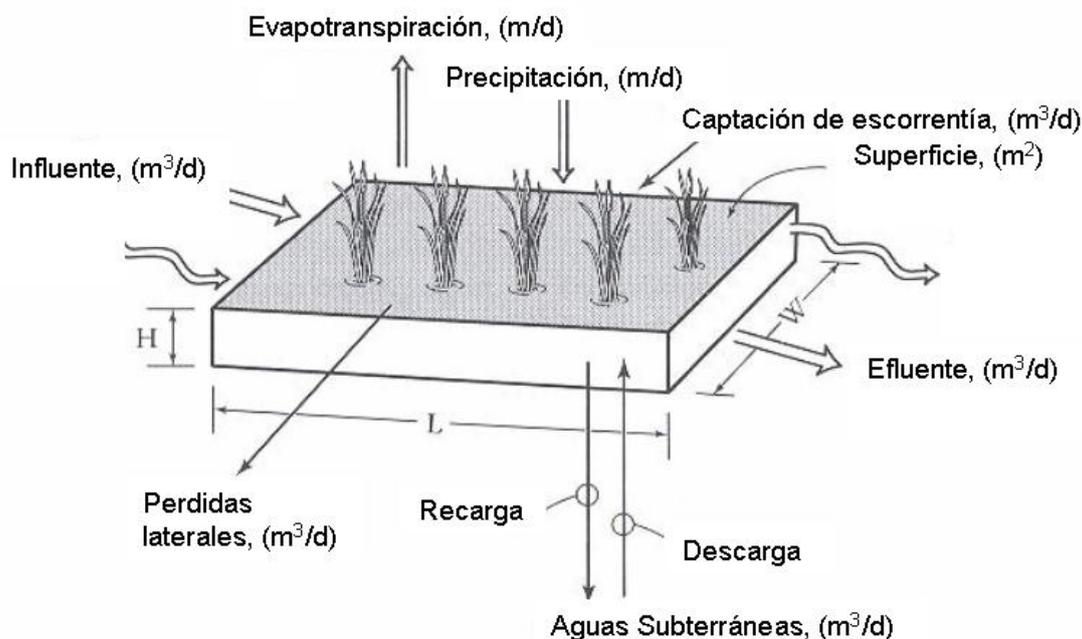
- Requieren una superficie netamente superior (entre 20 y 80 veces superior).
- Coste de construcción similar o incluso mayor si se debe adquirir el terreno donde se realiza la obra. En algunos casos, esto puede definir la viabilidad o inviabilidad del proyecto. La necesidad de equipos en instalaciones convencionales se ve compensada por los grandes movimientos de tierra que se precisan en sistemas de humedales. Se debe estudiar cada proyecto en particular.
- Larga puesta en marcha. Desde algunos meses o un año en sistemas con flujo subsuperficial hasta varios años en sistemas con flujo superficial (Kadlec et al., 2000).

- Difíciles de diseñar bien dado el alto número de procesos y mecanismos implicados en la eliminación de los contaminantes. No hay un acuerdo claro en cuanto a los valores de parámetros necesarios para el diseño.
- Pocos o ningún factor del control durante la operación. En muchos casos sólo se puede controlar la profundidad del agua. Los errores de diseño o constructivos son muy difíciles de corregir de forma sencilla. Si el efluente no tiene la suficiente calidad es complicado mejorarlo sin la necesidad de hacer una nueva inversión.
- Los de flujo subsuperficial son muy susceptibles a la colmatación del medio granular si el agua tiene un contenido elevado en determinados contaminantes, como por ejemplo grasas y aceites. También se colmatan si reciben aportes continuados de materiales finos inertes, por ejemplo debido a escorrentía superficial. Es muy costoso reemplazar el medio granular. En principio se parte de la idea que no se deberá reemplazar el material granular.
- Un aspecto importante es la captación de  $\text{CO}_2$  de la atmósfera por la vegetación. También sería necesario estudiar respecto al balance de gases de efecto invernadero, en que medida la captación de  $\text{CO}_2$  es capaz de compensar la emisión de  $\text{CH}_4$  y  $\text{N}_2\text{O}$  (Mander et al., 2003). Este es un aspecto que requiere de investigación.

### 1.3. Componentes del balance hídrico en humedales artificiales.

El balance hídrico en un humedal artificial permite analizar los intercambios atmósfera-suelo y vegetación, y evaluar así las fluctuaciones de las reservas de agua disponible. Los procesos hidrológicos que ocurren en los humedales, son los mismos procesos que ocurren fuera de los humedales y se conocen como el ciclo hidrológico. Los principales componentes del ciclo hidrológico son la precipitación, flujo de agua superficial y la evapotranspiración.

En el balance hídrico de un humedal se debe considerar, que el inventario de los aportes y de las pérdidas en un periodo determinado debe ser igual a la variación del volumen de agua retenido en el humedal durante ese mismo período. Los componentes del balance hídrico de los humedales artificiales ya sean de flujo superficial o de flujo subsuperficial se observan en la figura a continuación.



**Figura 7.** Componentes del balance hídrico en un humedal. Fuente: Traducido de : Kadlec y Knight, 1996. *Treatment Wetlands*.

Según el informe USEPA (2000). El balance hídrico de los humedales artificiales de flujo superficial, puede ser expresada en unidades de genéricas ( $L =$  longitud,  $T =$  tiempo), con la siguiente expresión.

$$\frac{dV_A}{dt} = Q_{entrada} + Q_{escorrentía} + Q_{deshielo} - Q_{bermas} - Q_{salida} + (P + ET + I) * A_{humedal}$$

**Ecuación 1**

Donde:

- $Q_{\text{entrada}}$  = caudal de entrada de agua a tratar captado en el humedal ( $L^3 / T$ ),
- $Q_{\text{escorrentía}}$  = caudal captado de escorrentía, proveniente de la cuenca ( $L^3 / T$ ),
- $Q_{\text{deshielo}}$  = caudal de deshielo ( $L^3 / T$ ),
- $Q_{\text{bermas}}$  = caudal de agua pérdida por la franja de terreno del humedal entre el borde exterior y la cuneta, ó, mota ( $L^3 / T$ ),
- $Q_{\text{salida}}$  = caudal de salida de agua a tratado en el humedal ( $L^3 / T$ ),
- $P$  = precipitación ( $L / T$ ),
- $ET$  = evapotranspiración ( $L / T$ ),
- $I$  = infiltración de las aguas subterráneas ( $L / T$ ),
- $A_{\text{humedal}}$  = área de la superficie de agua del humedal ( $L^2$ ),
- $V_A$  = Volumen de agua almacenada en el humedal ( $L^3$ ),
- $t$  = Tiempo ( $T$ )

La ecuación anterior es una ecuación muy general pues algunos términos pueden simplificarse según las características del humedal en estudio. Por ejemplo si se trata de terrenos impermeables la infiltración del agua ( $I$ ) y las pérdidas berma ( $Q_{\text{bermas}}$ ) se puede despreciar, y el deshielo ( $Q_{\text{deshielo}}$ ) es importante sólo en ciertos lugares.

El balance hídrico de un humedal es dinámico, esto debido a las fluctuaciones climatológicas que lo afectan. Sin embargo, los balances hídricos, junto con información sobre la geología local, proporcionan una base para comprender los procesos hidrológicos y la química del agua de un humedal, la comprensión de sus funciones, y la predicción de los efectos de catástrofes naturales o las alteraciones hidrológicas inducidas por el hombre. A continuación se analizan sus principales componentes.

### 1.3.1. Agua Superficial.

Los aportes a un humedal se deben a las precipitaciones, a los vertidos contaminantes y en algunos casos, al aporte de la escorrentía superficial de zonas de tierras situadas más arriba.

### 1.3.2. Precipitación.

La precipitación es cualquier forma de agua, tal como lluvia, nieve, aguanieve, granizo o niebla, que cae de la atmósfera y llega al suelo. La precipitación abastece de agua a los humedales directa e indirectamente.

El agua es proporcionada a un humedal cuando la precipitación cae directamente sobre el humedal o indirectamente, cuando la precipitación cae fuera del humedal, y se transporta a la superficie de humedales por infiltración o escorrentía. Por ejemplo, la nieve que cae en las cuencas de los humedales proporciona la superficie de flujo de agua a los humedales durante el deshielo de primavera. El deshielo de la nieve también

pueden recargar las aguas subterráneas, realizando descarga de agua a los humedales durante el verano, otoño e invierno.

### **1.3.3. Evapotranspiración.**

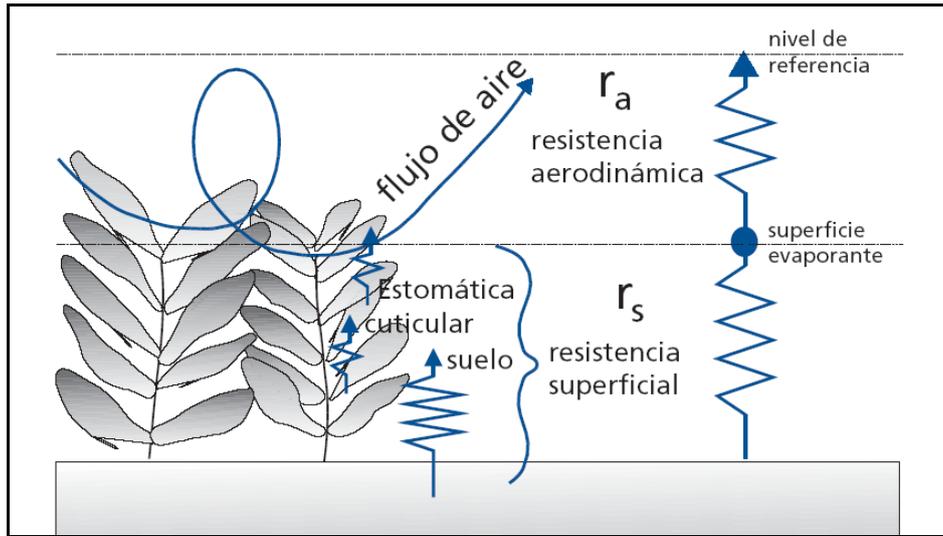
La pérdida de agua a la atmósfera es un componente importante del balance hídrico de los humedales. El agua eliminada por evaporación desde el suelo o la superficie de los cuerpos de agua y por transpiración de las plantas se denomina evapotranspiración ET en (mm). Los factores atmosféricos que influyen en la evapotranspiración son: la radiación solar, la temperatura del aire, la humedad atmosférica, el viento. Los factores de la masa de agua son: el tamaño de la masa de agua evaporante, la salinidad, además el tipo y densidad de vegetación.

La evapotranspiración potencial es la evapotranspiración que puede ocurrir desde una superficie bien cubierta por vegetación cuando el suministro de humedad es ilimitado, y se calcula de una forma similar a la que se aplica para la evaporación sobre una superficie abierta de agua.

Cuando el suelo tiene una cubierta vegetal, y aunque esta no lo cubra en su totalidad, los intercambios por evapotranspiración son muy superiores a los de evaporación directa que es la que se tendría en ausencia de vegetación. Esto se debe a que por un lado la superficie que proporciona la vegetación es superior a la que proporcionaría un suelo desnudo y por otro lado la vegetación actúa como una especie de bomba de succión, transportando agua desde la zona radicular hacia la atmósfera.

Penman (1948) fue el primero en desarrollar un método combinado que consideraba tanto las fuentes de energía debidas a la radiación como el transporte turbulento del vapor de agua a partir de una superficie, pero no tenía en cuenta el tipo de superficie. Hay que recordar que la evapotranspiración abarca tanto la evaporación como la transpiración, y que precisamente la transpiración depende sólo del tipo de cubierta vegetal que tengamos, por lo que los métodos de Thornthwaite y Penman desestiman los procesos de transpiración.

En el método de Penman-Monteith (1963) se distingue ya una resistencia del cultivo, denominada resistencia estomática, y una resistencia aerodinámica que corresponde a las condiciones aerodinámicas de la superficie para la transferencia del agua entre el aire y la superficie. La resistencia estomática es debida a la respuesta de los estomas, que son los orificios por donde sale el vapor de agua de las hojas de las plantas, y que responden a procesos fisiológicos como la regulación térmica, principalmente, y mantienen el flujo de agua en el interior de la planta, que es el único mecanismo de entrada de nutrientes del suelo a través de las raíces.



**Figura 8.** Representación simplificada de la resistencia superficie (total) y de la resistencia aerodinámica al flujo de vapor de agua. Fuente: Evaporación del cultivo. FAO.

Los parámetros de la resistencia superficial se combinan a menudo en un solo valor, el de la resistencia superficial total que se combina en serie con la resistencia aerodinámica.

Aunque el proceso del intercambio en la vegetación es demasiado complejo para ser descrito completamente por los dos factores de resistencia mencionados, con esta estimación se obtienen buenas correlaciones entre los valores medidos y calculados de evapotranspiración, especialmente en el caso de una superficie de pasto uniforme (referencia), ó, evapotranspiración del cultivo de referencia ( $ET_0$ ).

La ecuación para el cálculo de la evapotranspiración del cultivo de referencia ( $ET_0$ ) de Penman-Monteith es:

$$\lambda ET = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a c_p \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma \left( 1 + \frac{r_s}{r_a} \right)}$$

**Ecuación 2**

Donde:

- $R_n$  es la radiación neta,
- $G$  es el flujo del calor en el suelo,
- $(e_s - e_a)$  representa el déficit de presión de vapor del aire,
- $\rho_a$  es la densidad media del aire a presión constante,
- $c_p$  es el calor específico del aire,
- $\Delta$  representa la pendiente de la curva de presión de vapor de saturación,
- $\gamma$  es la constante psicrométrica,

- $r_s$  y  $r_a$  son las resistencias superficial (total) y aerodinámica.

Las condiciones estándar de los cultivos son: que se desarrollen en campos extensos, bajo condiciones agronómicas excelentes y sin limitaciones de humedad en el suelo. La evapotranspiración de un cultivo ( $ET_c$ ) será diferente a la del cultivo de referencia ( $ET_o$ ) en la medida en que sus características de cobertura del suelo, propiedades de la vegetación y resistencia aerodinámica difieran de las correspondientes al pasto.

Los efectos de las características que distinguen al cultivo del pasto están incorporados en el coeficiente único del cultivo ( $K_c$ ). De acuerdo al enfoque del coeficiente del cultivo, la evapotranspiración del cultivo  $ET_c$  se calcula como el producto de la evapotranspiración del cultivo de referencia,  $ET_o$  y el coeficiente del cultivo  $K_c$  (adimensional):

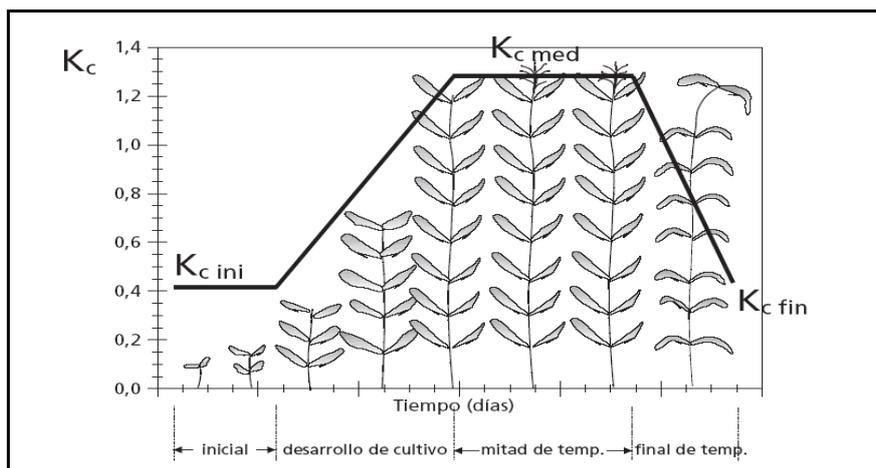
$$ET_c = K_c * ET_o$$

### Ecuación 3

Durante el período de crecimiento del cultivo, la variación del coeficiente del cultivo  $K_c$ , expresa los cambios en la vegetación y en el grado de cobertura del suelo. Esta variación del coeficiente  $K_c$  a lo largo del crecimiento del cultivo está representada por la curva del coeficiente del cultivo. Para describir y construir la curva del coeficiente del cultivo se necesitan solamente tres valores de  $K_c$ : los correspondientes a la etapa inicial ( $K_c$  ini), la etapa de mediados de temporada ( $K_c$  med) y la etapa final ( $K_c$  fin). En la Figura 9 se presenta, en forma generalizada, la curva del coeficiente del cultivo.

El valor de  $K_c$  comienza a aumentar, a partir de este valor inicial de  $K_c$ , al comenzar el desarrollo rápido de la planta y alcanza su valor máximo,  $K_c$  med, al momento del desarrollo máximo, o cercano al máximo, de la planta.

Durante la etapa de final de temporada, a medida que las hojas comienzan a envejecer y se produce la senescencia debido a procesos naturales o las prácticas culturales, el valor de  $K_c$  comienza a disminuir hasta alcanzar un valor mínimo al final de la temporada de crecimiento igual a  $K_c$  fin.



**Figura 9.** Curva generalizada del coeficiente del cultivo, correspondiente al procedimiento del coeficiente único del cultivo Fuente: Evaporación del cultivo. FAO

Los valores del coeficiente único (promedio temporal) del cultivo,  $K_c$  y alturas medias máximas de las plantas para cultivos no estresados y bien manejados de humedales en climas templados, se presentan en la tabla a continuación.

**Tabla 2** Valores del coeficiente único (promedio temporal) del cultivo,  $K_c$ , en un humedal en climas templados. Fuente: Evaporación del cultivo. FAO.

Cultivo	$K_c$ ini <sup>1</sup>	$K_c$ med	$K_c$ fin	Altura Máx. Cultivo (h) (m)
Enea (Typha), Junco (Scirpus), muerte por heladas	0.30	1.20	0.30	2
Enea, Junco, sin heladas	0.60	1.20	0.60	2
Vegetación pequeña, sin heladas	1.05	1.10	1.10	0.3
Carrizo (Phragmites), con agua sobre el suelo	1.0	1.2	1.0	1-3
Carrizo, suelo húmedo	0.90	1.20	0.70	1-3

Para calcular la curva generalizada del coeficiente de cultivo, es importante, conocer la duración de cada una de las etapas de crecimiento del cultivo, en la Tabla a continuación se presentan los valores en días, para cada fase del cultivo típico en humedales.

**Tabla 3.** Valores Duración de las etapas de crecimiento\* del cultivo para distintos períodos de siembra y regiones climáticas (días). Fuente: Evaporación del cultivo. FAO

Cultivo	Inic. ( $L_{ini}$ )	Des. ( $L_{des}$ )	Med. ( $L_{med}$ )	Final ( $L_{fin}$ )	Total	Fecha de Siembra	Región
Humedales (Enea, Junco)	10	30	80	20	140	Mayo	Utah, EU; heladas
	180	60	90	35	365	Noviembre	Florida, EU
Humedales (veg. Baja)	180	60	90	35	365	Noviembre	Climas sin heladas

El procedimiento de cálculo de la evapotranspiración del cultivo es el siguiente:

1. identificar las etapas de desarrollo del cultivo, determinando la duración de cada etapa y seleccionando los valores correspondientes de  $K_c$ ;
2. ajustar los valores de  $K_c$  seleccionados según la frecuencia de humedecimiento o las condiciones climáticas durante cada etapa;
3. construir la curva del coeficiente del cultivo (la cual permite la determinación de  $K_c$  para cualquier etapa durante el período de desarrollo);
4. calcular  $ET_c$  como el producto de  $ET_o$  y  $K_c$

Cuando no se tiene disponibilidad total de datos meteorológicos de radiación solar, humedad relativa, ó, velocidad del viento, la  $ET_o$  se puede estimar usando la ecuación de Hargreaves (1985) donde:

$$ET_o = 0,0023(T_{\text{media día}} + 17,8)(T_{\text{max}} - T_{\text{min}})^{0,5} R_a$$

**Ecuación 4**

#### **1.3.4. Infiltración.**

La infiltración es la penetración del agua en el suelo, y está condicionada por las modificaciones instantáneas del volumen de agua y de la presión en la superficie del suelo cuando este es sometido a una precipitación más o menos intensa, a un riego, o a un vertido contaminante, por lo que en algún caso puede ser considerada como una perturbación provocada en el suelo, que se propaga en él y que se va atenuando con la profundidad.

El régimen de infiltración de un suelo depende sobre todo de su régimen de alimentación. La capacidad de absorción de agua de un suelo es limitada, de forma que si el régimen de alimentación la supera, el agua se acumula en charcos en la superficie si esta es llana, o discurre por escorrentía superficial si existe pendiente.

## 1.4. Modelización Hidráulica de Humedales Artificiales

Existen diversos modelos con el objetivo de predecir el transporte de masa en un humedal, con respecto al grado de mezcla interna y la distribución de tiempo de residencia. Como primer tipo se encuentran los denominados modelos de dispersión que provienen de considerar los procesos de convección y difusión existentes en el flujo medio, y los formados por reactores ideales o combinaciones en serie o en paralelo de estos reactores.

### 1.4.1. Modelos ideales y sus combinaciones

#### *Reactor de flujo en pistón (RFP).*

En un reactor de flujo en pistón las partículas del flujo pasan a través del tanque y salen en la misma secuencia en que entran. Las partículas mantienen su identidad y permanecen en el interior del tanque un tiempo igual al tiempo de retención teórica. Este tipo de flujo puede aproximarse al que se produce en un tanque de gran longitud con una relación longitud/ancho elevada, en el cual la dispersión longitudinal es mínima o nula.

El hecho de que se empleen unos u otros modelos, dependerá de la geometría de las celdas. Un reactor de flujo en pistón (RFP) es mucho más largo que ancho, en cambio un reactor continuo de tanque agitado (RCTA) es regular.

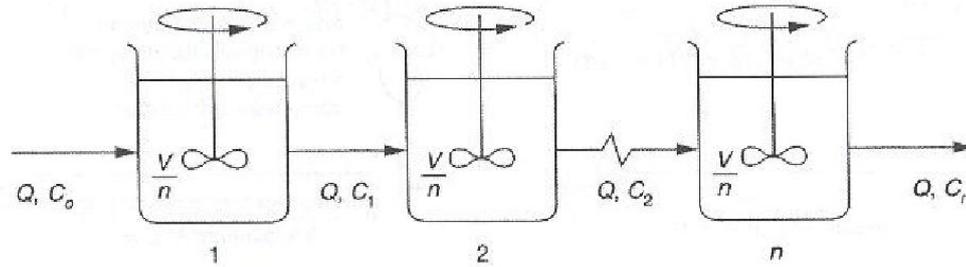
El reactor de flujo en pistón ideal se usa corrientemente para describir el funcionamiento de humedales, a pesar de que difícilmente un humedal se va a comportar como un reactor de estas características.

#### *Reactor de mezcla completa.*

Un reactor de mezcla completa es aquel en que una masa de trazador inyectada en el reactor se reparte de forma instantánea a todo el reactor, de manera que todo el reactor tiene siempre la misma concentración de contaminante en todos los puntos, puesto que la mezcla es completa. La concentración de trazador en el efluente disminuye de forma exponencial a lo largo del tiempo. El modelo de reactor de mezcla completa no suele utilizarse para describir el funcionamiento de humedales.

#### *Reactores de mezcla completa en serie.*

Este modelo se obtiene de combinar reactores de mezcla completa en serie, permitiendo representar el comportamiento no ideal de un humedal. Un modelo para varios reactores conectados en serie puede ser usado para describir la variación de la calidad del agua de humedales artificiales.



**Figura 10.** Reactores Flujo de Pistón. Fuente. *Sistemas de manejo de aguas residuales para núcleos pequeños y descentralizados. Crites 2000.*

En la figura anterior se observa como aumenta la concentración en el primer reactor ya que la cantidad de trazador es la misma independientemente del número de reactores conectados entre sí.

#### 1.4.2. Reactor de flujo en pistón con dispersión.

Es una variación del modelo de flujo en pistón, la principal diferencia es que en este se tienen en cuenta los procesos de difusión y dispersión, en cualquier punto del humedal. Este modelo no tiene en cuenta los caminos preferenciales y las zonas muertas que puedan existir en el humedal. Funciona bastante bien para aquellos flujos similares al flujo en pistón. Cuando mayor sea la dispersión longitudinal, menor es la aproximación del modelo.

En realidad la presencia de zonas muertas juega un papel trascendental en la hidrodinámica de un humedal artificial, ya que en estas zonas, una partícula de contaminante llega y permanecerá durante el periodo de tiempo indefinido, hasta que consiga ser transportado otra vez al flujo principal del microcanal.

La situación anterior aumenta su tiempo de residencia. La existencia de un porcentaje elevado de estas zonas puede hacer aumentar bastante la dispersión en la circulación de un impulso de un trazador. Pero el resto del agua alimentada al sistema dispone de un área menor para hacer su recorrido por lo tanto se espera que el tiempo de residencia disminuya.

Diferentes estudios indican que los porcentajes de estas zonas muertas en los humedales se pueden situar entre un 10% y 60%. Así Tanner y Sukias (1995) entre 20 y 60 %, Batchelor y Loots (1996) indican un 23% y Simi y Mitchell (1999) un 30%.

Debido a lo anterior, modelos que no consideran la presencia de zonas muertas, pueden llegar a ser una representación alejada de la realidad, en humedales que presenten este tipo de irregularidades en el funcionamiento hidráulico.

El hecho de que se empleen unos u otros modelos dependerá de la geometría de las celdas.

## 1.5. Medición de caudales en sistemas a superficie libre.

Conocer los caudales circundantes en un cauce natural es esencial para evaluar tanto la viabilidad de alguna actuación como las condiciones a las que debe quedar circunscrita, marcando las pautas que han de regir el equilibrio entre los intereses ecológicos, sociales y económicos.

Para medir los caudales circulantes se aplican distintos métodos en función de las peculiaridades del hidrosistema y los medios técnicos disponibles. Los principales métodos de aforo se analizan a continuación.

Los métodos de aforo son los más empleados; consisten en medir el área de la sección transversal del flujo de agua y la velocidad media de este flujo.

$$Q = A * v$$

**Ecuación 5**

Donde:

Q = el caudal del agua.

A = área de la sección transversal del flujo de agua.

v = la velocidad media del agua.

Generalmente el caudal Q se expresa en litros por segundo (l/s) o en metros cúbicos por segundo (m<sup>3</sup>/s). En la ecuación si Q el caudal se expresa en (m<sup>3</sup>/s), A se expresa en (m<sup>2</sup>) y v en (m/s), V se expresa en (m<sup>3</sup>) y T que es el tiempo en (s).

El problema principal es medir la velocidad media en los canales o cauces ya que la velocidad varía en los diferentes puntos al interior de una masa de agua. Los métodos más conocidos de medición de caudal de agua se analizan a continuación.

### 1.5.1. Sección tipo velocidad media estimada.

#### 1.5.1.1. Método del molinete.

En este método la velocidad del agua se mide por medio de un instrumento llamado molinete que mide la velocidad en un punto dado de la masa de agua. Existen varios tipos de molinetes, siendo los más empleados los de hélice de los cuales hay de

varios tamaños; cuando más grandes sean los caudales o más altas sean las velocidades, mayor debe ser el tamaño del aparato.

El molinete de hélice, consiste en una hélice que gira sobre un eje horizontal. Se inserta en la corriente paralela al flujo y en cada vuelta completa produce el cierre de un circuito y una señal acústica que se registran mediante un contador el número de cierres y el tiempo.

**Cuerpo del molinete**

El cuerpo del molinete, de línea aerodinámica, está fabricado en acero inoxidable de alta calidad. El eje de la hélice, con baño de aceite, gira sobre dos rodamientos de bolas, con ausencia de fricción.

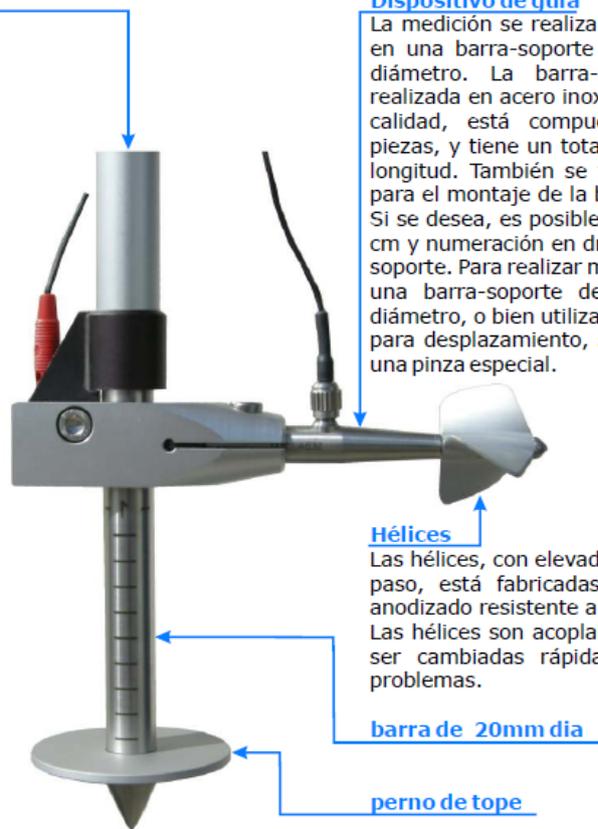
**Mecanismo de contacto**

La caja-contador registra un impulso por cada revolución de la hélice. El mecanismo de contacto para la captación de las revoluciones de la hélice está reunido en una unidad miniaturizada.

La frecuencia de impulso para la caja-contador mecánica Z1 está limitada a un máximo de 10 impulsos por segundo. Con la caja-contador electrónica Z4 se pueden recoger frecuencias de impulso para cualquier velocidad de la corriente. En el equipo completo están incluidas seis hélices de 50 ó 30 mm de diámetro, con distintos pasos (ver tabla). Si se desea, el equipo puede ser suministrado también con hélices independientes.

**Dispositivo de guía**

La medición se realiza normalmente en una barra-soporte de 9 mm de diámetro. La barra-soporte está realizada en acero inoxidable de alta calidad, está compuesta de tres piezas, y tiene un total de 1,5 m de longitud. También se facilita un pie para el montaje de la barra-soporte. Si se desea, es posible la división en cm y numeración en dm de la barra-soporte. Para realizar mediciones con una barra-soporte de 20 mm de diámetro, o bien utilizando una pieza para desplazamiento, se dispone de una pinza especial.



**Figura 11.** Descripción del minimolinete. Fuente: Catálogo SEBA Hydrómetrie

A continuación se presenta la ecuación para el cálculo de la velocidad de la corriente de agua, medida con el molinete.

$$v = k * n + \Delta$$

**Ecuación 6**

Donde:

V = velocidad de la corriente (m/s)

k = paso hidráulico de la hélice (m) \*

n = revoluciones de la hélice por segundo

$\Delta$  = constante del molinete (m/s)

Donde  $k$  y  $\Delta$ , son parámetros de calibración dados por el fabricante, según la dimensión y rango de medida de la hélice utilizada.

Como el molinete mide la velocidad en un punto, para obtener la velocidad media de un curso de agua se deben en ciertos casos, la velocidad en dos, tres o más puntos, a diversas profundidades a lo largo de una vertical y a partir de la superficie del agua.

Las profundidades en las cuales se mide las velocidades con el molinete en función de la altura de lámina del agua  $h$ , se observan en la Tabla a continuación.

**Tabla 3.** Profundidad de lectura del Molinete. Fuente: Simon, Andrew L., *Hidráulica Practica*, Limusa Noriega Editores, 1994

Calado de agua $h$ (cm)	Profundidad de lectura del Molinete (cm)
< 15	$h / 2$
$15 < h < 45$	$0,6 h$
> 45	$0,2 h$ y $0.8 h$ , ó, $0.2 h, 0.6 h$ y $0.8 h$

Conocidas las profundidades se calcula el área de la sección transversal, la que se utilizara para el cálculo del caudal. Según la ecuación 1.

#### 1.5.1.2. Método Del Flotador.

El método del flotador se utiliza cuando no se tiene equipos de medición y para este fin se tiene que conocer el área de la sección y la velocidad del agua, para medir la velocidad se utiliza un flotador con el que se mide la velocidad del agua de la superficie, pudiendo utilizarse como flotador cualquier cuerpo pequeño que flote: como un corcho, un pedazo de madera, una rama, etc. Este método se emplea en los siguientes casos:

- A falta de molinete.
- Excesiva velocidad del agua que dificulta el uso del molinete.
- Presencia frecuente de cuerpos extraños en el curso del agua, que dificulta el uso del molinete.

- Cuando peligran la vida del que efectúa el aforo.
- Cuando peligran la integridad del molinete.

### 1.5.2. Estructuras hidrométricas.

Para la medición de caudales es posible recurrir a la creación de una sección de control, siendo el vertedero la estructura hidráulica sobre la cual se efectúa una descarga a superficie libre. El vertedero puede tener diversas formas según las finalidades a las que se destine. Si la descarga se efectúa sobre una placa con perfil de cualquier forma pero de arista aguda, el vertedero se llama de pared delgada; cuando la descarga se realiza sobre una superficie, el vertedero se denomina de pared gruesa. Ambos tipos pueden utilizarse como dispositivos de aforo en el laboratorio o en canales de pequeñas dimensiones. El vertedero de pared gruesa se emplea además como obra de control o de excedencias en una presa y como aforador en grandes canales.

Los vertederos más utilizados son de tres tipos:

- Cuando peligran la integridad del molinete.
- Sin escotadura: No producen contracciones laterales pues el vertedero coge toda la anchura del caudal.
- Con escotadura rectangular donde la vena líquida experimenta una contracción.
- Con escotadura triangular en ángulo de  $90^\circ$

El vertedero triangular es preferido cuando las descargas son pequeñas, porque la sección transversal de la lámina vertiente muestra de manera notoria la variación en altura.

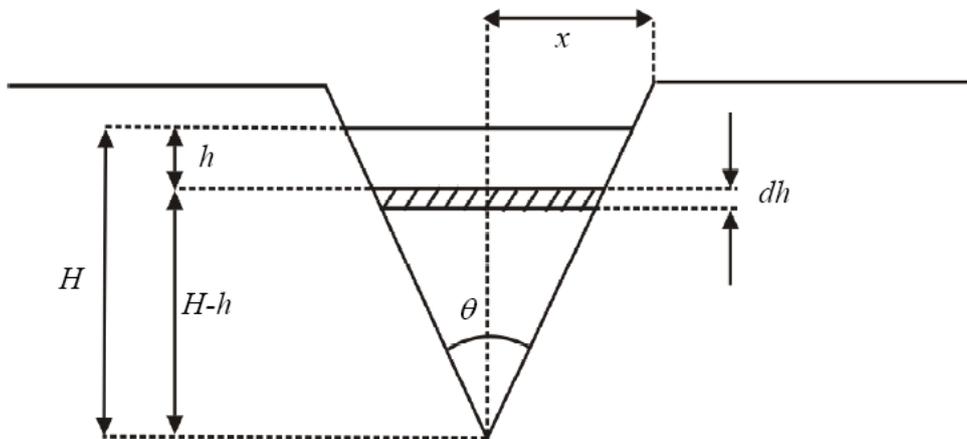


Figura 12. Estructura del vertedero triangular.

En el Anexo I, se encuentran las tablas para medición de caudales en este tipo de vertedero.

### **1.5.3. Inyección de trazadores en la corriente.**

Consiste en incorporación a la corriente de cierta sustancia química durante un tiempo dado; tomando muestras aguas abajo donde se estime que la sustancia se haya disuelto uniformemente, para determinar la cantidad de sustancia contenida por unidad de volumen.

Una técnica que se encuentra en auge, es el método de las diluciones comparadas, que relaciona el caudal con el cambio de concentración que experimenta un producto químico que se utiliza como trazador, resulta de gran exactitud, aunque su aplicación, en algunos casos, no carece de dificultades técnicas u operativas, entre ellas, la analítica y el requerimiento de un equipo complejo y especializado, en particular cuando como trazador se utiliza una sustancia radiactiva o fluorescente.

Dentro de este método son dos los procedimientos que se emplean de forma tradicional: el de inyección continua y el de inyección instantánea.

Los trazadores naturales del agua, son utilizados para obtener información sobre la procedencia de las aguas, ó, en estudios de dinámica de flujos, la cual se basa en los cambios producidos a lo largo del tiempo en la concentración de un determinado componente químico o isotópico, contenido en un cuerpo de agua, que pueda considerarse característico de la misma.

Los trazadores naturales, más importantes son: Temperatura, Conductividad, Composición química (incluyendo sólo los componentes mayoritarios del agua), Isótopos estables del agua (deuterio), entre otros.

En el caso de la medida de la conductividad, a efectos prácticos en estudios relacionados con régimen de distribución de caudales, más que el valor absoluto de la conductividad del agua, lo que interesa, generalmente, son los valores relativos de este parámetro de unos puntos a otros, para lo cual es preciso que todas las medidas se realicen utilizando el mismo equipo.

## 2. OBJETIVOS Y JUSTIFICACION

Con el fin de frenar y tratar de reparar el deterioro causado a La Albufera, actualmente se cursan varios proyectos gubernamentales, como por ejemplo el **Proyecto de “RESTAURACIÓN DE HÁBITATS Y ADECUACIÓN PARA EL USO PÚBLICO EN LA DESEMBOCADURA DEL POYO ( P. N. ALBUFERA)”** de la Confederación Hidrográfica del Júcar en colaboración con la Consellería de Medio Ambiente, Agua, Urbanismo y Vivienda de la Generalitat Valenciana. El cual permitió la creación del **Tancat de la Pipa**, un espacio donde entre otras actuaciones se encuentra la creación de un sistema de Humedales Artificiales de Flujo Superficial, de aquí en adelante **Filtros Verdes**.

El sistema de Filtros Verdes se considera un experimento piloto ya que no existen experiencias anteriores como esta, pues con este se pretende depurar el agua del lago sin tratamientos previos, como usualmente se aplica en estos sistemas.

El objetivo del presente estudio, es evaluar la influencia de las variables hidrológicas y operativas (caudal, tiempo de residencia, etc.), en un modelo de calidad de aguas, empleando la conductividad como referencia.

Lo anterior, permitirá tener un conocimiento un poco más aproximado sobre el funcionamiento hidráulico y el régimen de distribución de caudales del Sistema de Filtros Verdes del Tancat de la Pipa.

También se realizarán dos balances hídricos, uno a escala semanal y otro mensual, donde se analizará detalladamente la influencia de las variables climatológicas sobre el sistema.

Para alcanzar los objetivos planteados ha sido necesario:

- Planteamiento de mejoras destinadas a la correcta gestión hídrica del Tancat.
- Realización de una campaña de muestreos comprendida entre los meses de abril de 2009 y abril de 2010, donde se obtendrá información de calidad de aguas y velocidades del flujo.
- Recopilación de datos provenientes de estaciones agroclimáticas próximas a la zona, facilitados por el Sistema de Información Agroclimática para el Regadío.
- Desarrollo de los Balances Hídricos del sistema *Filtros Verdes*, a escala semanal y mensual.
- Desarrollo del modelo de calidad de aguas que represente el régimen de distribución de caudales en el sistema de *Filtros Verdes*.

- Calibración del modelo mediante la comparación de los valores experimentales, con los simulados. Para lo cual se emplearán los datos obtenidos en la campaña de muestreo y los obtenidos en la bibliografía consultada.

Este modelo de calidad de aguas servirá como herramienta preliminar de futuros estudios, destinados a la determinación de la capacidad de tratamiento del sistema. Con esta información se podrá estimar los requerimientos para la creación de un sistema total de depuración del agua del lago de La Albufera mediante el Sistema de Filtros Verdes.

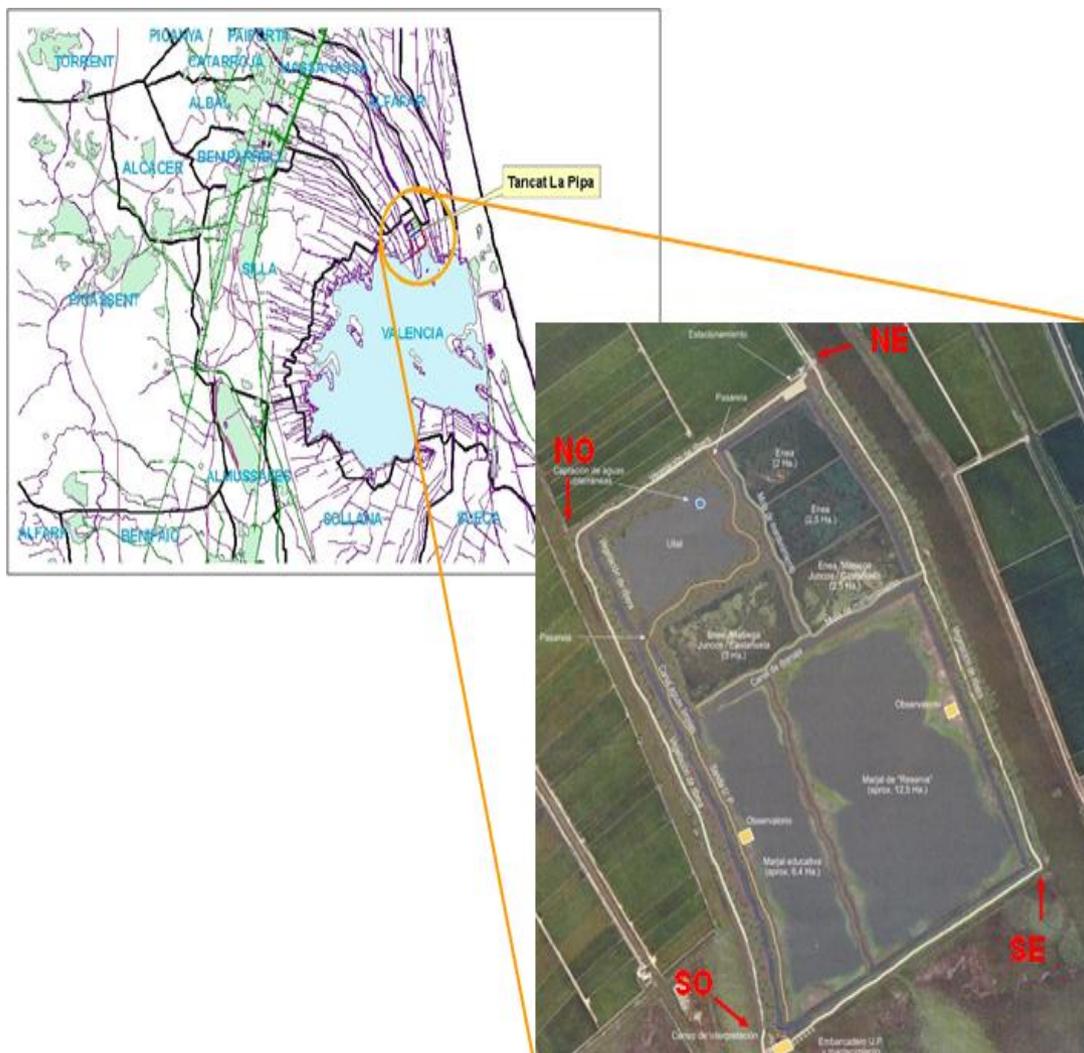
### 3. AREA DEL ESTUDIO

#### 3.1. El Tancat de la Pipa

##### 3.1.1. Localización.

El Tancat de la Pipa está situado en la zona norte del Parque Natural de La Albufera, entre las acequias de Catarroja y el Barranco del Poyo. Se localiza a orillas de la laguna, en la zona conocida como Punta de LLebeig.

Se trata de un espacio con una extensión aproximada de 40 hectáreas, perteneciente al término municipal de Catarroja.



**Figura 13.** Mapa de situación. Fuente: “Estudio Específico de AfECCIÓN de Obras a la Red Natura 2000”

En la tabla siguiente, se presenta la ubicación exacta del Tancat de la Pipa, en coordenadas UTM.

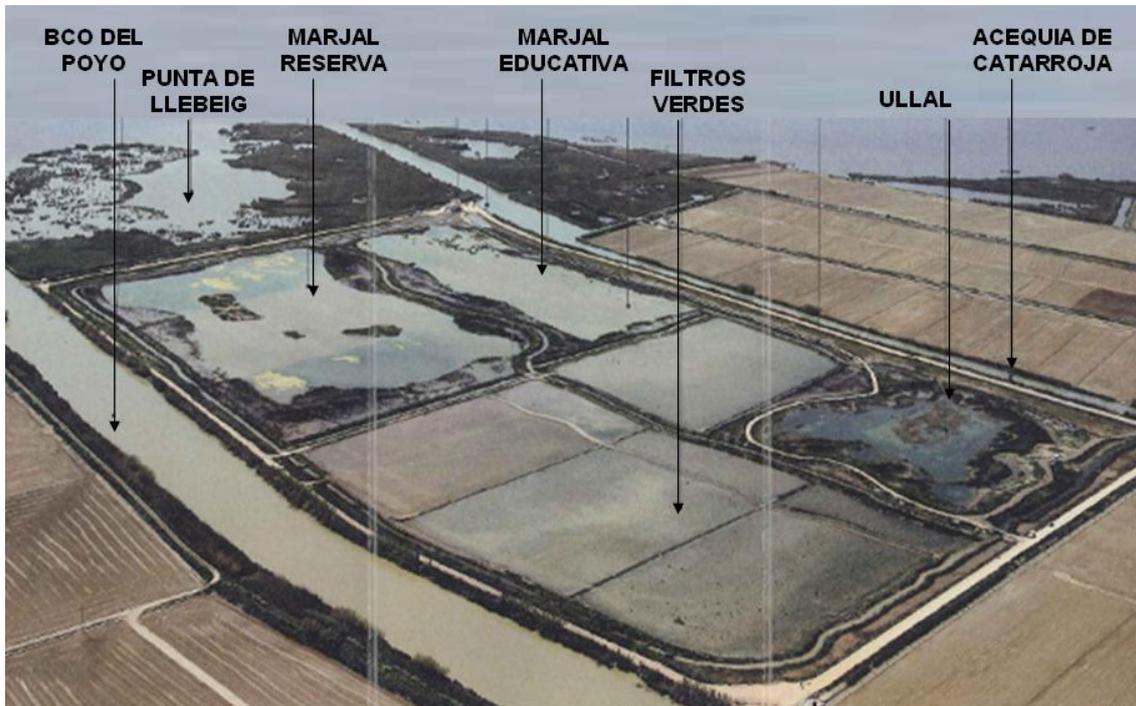
**Tabla 4** Ubicación Tancat de la Pipa

COORDENADAS UTM	X	Y
Noreste	728736	4361191
Noroeste	728368	4360944
Suroeste	728668	4360183
Sureste	729088	436047163

### 3.1.2. Descripción del Tancat de la Pipa

El Tancat de la Pipa, es el resultado del proyecto de Restauración de hábitats y adecuación para el Uso Público en la desembocadura del Poyo, de la Confederación Hidrográfica del Júcar, en colaboración con la Consellería de Medio Ambiente, Agua, Urbanismo y Vivienda de la Generalitat Valenciana.

A través de las sucesivas fases del proyecto, iniciado en el año 2007 se han transformado 40 hectáreas de campos de arroz, en un conjunto de hábitats de agua dulce típicos del Parque Natural de La Albufera con carácter de "Área de Reserva". A continuación se presenta una vista aérea, del Tancat de la Pipa, esta imagen fue tomada, cuando aun no se encontraban cultivados los Filtros Verdes, sin embargo se aprecia claramente la distribución del Tancat.



**Figura 14.** Distribución del Tancat de la Pipa. Fuente: cedido [www.tancatdelapipa.net](http://www.tancatdelapipa.net)

#### 3.1.2.1 Características Meteorológicas y Climáticas

Para describir los aspectos meteorológicos y climáticos más significativos del

Tancat de la Pipa, se han elegido las estaciones meteorológicas del área de influencia de la zona.

La distribución del agua por los diferentes ambientes naturales descritos anteriormente, se ve altamente influenciada por los parámetros climáticos, ya que el principal objetivo del Tancat es el de restaurar ambientes palustres en los que la evaporación y la precipitación determinarán los objetivos de calidad y depuración de las aguas, así como el desarrollo y evolución de los diferentes ambientes.

En la tabla a continuación se presentan las estaciones meteorológicas más cercanas al Tancat.

**Tabla 5.** Estaciones Meteorológicas de Influencia en el Tancat de la Pipa. Fuente: SIG del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación

ESTACION METEREOLÓGICA	Altitud	Latitud (°)	Latitud (')	Longitud (°)	Longitud (')
ALGINET	31	39	15	00	28
ALMUSSAFES	11	39	17	00	24
PICASSENT	54	39	21	00	27
SILLA 'MASIA ALBUDOR'	20	39	20	00	25
SILLA 'FITOSANITARIA'	7	39	23	00	24
VALENCIA 'HORNO DE ALCEDO'	8	39	26	00	22

Las características de estas estaciones y los parámetros meteorológicos recogidos en cada una de ellas se resumen en los apartados siguientes.

### 3.1.2.2 Datos Meteorológicos de las estaciones.

#### Pluviometría media mensual.

**Tabla 6.** Pluviometría media a escala mensual. Fuente: SIG del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.

ESTACION METEREOLÓGICA	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
ALGINET	44	49	49	41	34	22	6	26	48	108	74	63	565

ALMUSSAFES	46	45	33	36	35	19	11	21	61	82	69	64	522
PICASSENT	38	39	33	35	33	21	8	19	54	85	71	56	492
SILLA 'MASIA ALBUDOR'	41	34	37	41	41	26	13	22	60	91	69	67	542
SILLA 'FITOSANITARIA'	56	50	31	44	31	25	27	6	64	72	115	53	575
VALENCIA 'HORNO DE ALCEDO'	39	39	36	39	32	25	9	21	55	99	59	55	509
ZONA ACTUACION	44	43	37	39	34	23	12	19	57	90	76	60	534

*Temperatura media mensual.*

**Tabla 7.** . *Temperatura media a escala mensual. Fuente: SIG del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.*

ESTACION METEREOLÓGICA	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
ALGINET	9.8	10.8	12.7	15.2	19.2	23.1	25.8	25.5	22.8	18.0	13.4	10.1	17.2
ALMUSSAFES	10.4	11.4	13.3	14.8	17.7	21.7	24.5	25.1	22.6	18.2	14.0	11.2	17.1
SILLA 'MASIA ALBUDOR'	10.2	11.3	12.6	14.3	17.2	21.4	24.4	24.9	22.6	18.1	13.6	10.7	16.8
SILLA 'FITOSANITARIA'	11.0	11.8	13.4	14.8	17.9	21.8	24.5	25.3	23.1	18.8	14.7	12.0	17.4
ZONA ACTUACION	10.4	11.3	13.0	14.8	18.0	22.0	24.8	25.2	22.8	18.3	13.9	11.0	17.1

*Otros datos de temperatura.*

**Temperatura media de máximas del mes más cálido.**

**Tabla 8.** *Temperatura media de máximas del mes más cálido. Fuente: SIG del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.*

ESTACION METEREOLÓGICA	TEMPERATURA (°C)
ALGINET	31.4
ALMUSSAFES	29.9
SILLA 'MASIA ALBUDOR'	30.0

SILLA 'FITOSANITARIA'	29.5
ZONA ACTUACION	30.2

Temperatura media de mínimas del mes más frío.

**Tabla 9.** Temperatura media de mínimas del mes más frío. Fuente: SIG del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.

ESTACION METEREOLÓGICA	TEMPERATURA (°C)
ALGINET	5.1
ALMUSSAFES	5.4
SILLA 'MASIA ALBUDOR'	4.9
SILLA 'FITOSANITARIA'	6.1
ZONA ACTUACION	5.4

Temperatura media mensual de las mínimas absolutas.

**Tabla 10.** Temperatura media mensual de las mínimas absolutas. Fuente: SIG del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.

ESTACION METEREOLÓGICA	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
ALGINET	-0.8	0.1	1.2	4.6	8.5	13.2	16.4	16.7	13.0	7.6	2.6	0.2	-1.9
ALMUSSAFES	-0.4	-0.1	2.0	3.9	7.7	12.2	15.1	16.0	11.8	7.4	2.6	0.4	-1.6
SILLA 'MASIA ALBUDOR'	-1.6	-2.0	0.5	3.0	5.9	11.5	14.8	15.5	11.3	6.4	1.2	-1.1	-3.1
SILLA 'FITOSANITARIA'	0.2	0.8	3.2	4.4	8.0	12.7	16.5	17.5	13.2	8.2	3.9	0.6	-1.2
ZONA ACTUACION	0.7	0.3	1.7	4.0	7.5	12.4	15.7	16.4	12.3	7.4	2.6	0.1	2.0

### 3.1.2.3 Climograma y clasificación de Papadakis.

Según los datos de precipitación y temperatura, a continuación se presente climograma que define el tipo de clima que posee el Tancat de la Pipa.

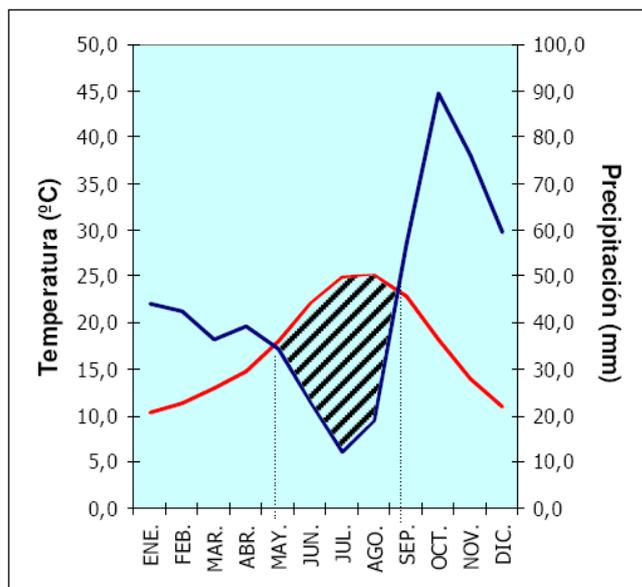


Figura 15. Climograma del Tancat de la Pipa.

Como se observa, en la figura anterior, el clima de la zona es mediterráneo con un periodo de sequía estival, que transcurre entre los meses de mayo y septiembre, y un periodo de fuertes precipitaciones (lluvias torrenciales) entre los meses de octubre y diciembre.

No hay periodo de heladas, sin embargo, por los datos de temperatura media de las mínimas se comprueba que si es posible que algunos días de enero y más raramente en febrero y diciembre se hayan producido heladas.

El clima mediterráneo se caracteriza por inviernos suaves y veranos calurosos, aunque posee la influencia del mar que se refleja en una humedad más elevada, lo que reduce las diferencias térmicas que se producen en el clima mediterráneo continental.

Por otro lado, la evaporación, ETP, es de 866 mm, por encima de la precipitación de 534 mm, lo que afectará al régimen de las aguas que circularán por el Tancat, dado que las entradas se reducirán al caudal superficial procedente de los barrancos de El Poyo o de Catarroja y a la precipitación, y en las salidas, además de los bombeos de que se realicen por la estación o centro de bombeo, parte del agua se evaporará. Para mantener los niveles de agua más o menos constantes en todos los sistemas a restaurar en el Tancat, se tendrán que regular las entradas y salidas en función de los parámetros meteorológicos que se produzcan mensualmente.

Según la clasificación de Papadakis el Tancat de la Pipa se puede clasificar como mediterráneo subtropical, dado que las temperaturas medias de las máximas se encuentran entre los 10-21 °C y las temperaturas medias de las mínimas del mes más cálido superan los 20 °C.

#### 3.1.2.4 Suelos.

Toda la zona septentrional de La Albufera de Valencia esta recubierta de sedimentos, no deformados tectónicamente y de orígenes muy diversos: marinos, mixtos continentales-marinos y continentales de edad que oscila entre el cuaternario más reciente (Holoceno) y el Pleistoceno Superior.

Concretamente los suelos del Tancat de la Pipa están formados por sedimentos constituidos por limos arcillosos con gran cantidad de materia orgánica, los llamados limos negros. También, cabe destacar que debido a su origen marino, hay una presencia considerable de conchas marinas.

### 3.1.3. Distribución general del Tancat de la Pipa

El Tancat de la Pipa posee una extensión de unas 40 ha aproximadamente en las cuales se aprecian los ambientes naturales, que se describen en los puntos a continuación.

#### 3.1.3.1 Ecosistemas presentes en el Tancat de la Pipa.

##### ***Filtros Verdes***

Los Filtros Verdes, objeto del presente estudio, abarcan aproximadamente un 25% (10 Has) del Tancat de la Pipa, este ecosistema tiene como objetivo, brindar un espacio natural, para la vida salvaje, y además para la depuración de las aguas procedentes del Lago de La Albufera, que presentan una elevada carga de nutrientes.

##### ***Ecosistema de Ullal***

Formada a partir de una excavación de 1,0 metro de profundidad; con la tierra extraída se creó la mota que circunda y forma el ambiente de Ullal una altura de 2,5 metros respecto del fondo del mismo. Cabe indicar, que este ambiente de Ullal sólo sustentará una columna de agua de 1,5 metros de altura, por lo que la mota estará a una altura de 1,0 metro respecto de la lámina de agua

En el Tancat de la Pipa se ha excavado un pozo de 250 metros de profundidad, del que proviene el agua del Ullal, con un caudal promedio de 4 l/s, que aporta aguas limpias y ha favorecido la presencia de unas algas conocidas como *asprella*, indicadoras de aguas de buena calidad. Este ecosistema permite el mantenimiento de algunas de las especies más emblemáticas y sensibles como la gambeta, el fartec y el samaruc, entre otras poblaciones de macrófitos sumergidos y especies de la fauna piscícola y macroinvertebrada propias de la zona.

### ***Ecosistema de Marjal***

Este ecosistema se compone de dos lagunas, marjal de “reserva” y “educativa”, estas son zonas tanto de alimentación, como de nidificación, para muchas especies de aves acuáticas como ejemplo la focha cornuda, entre otras, algunas con serios problemas de conservación; también se desarrollan especies piscícolas endémicas del litoral mediterráneo y en peligro de extinción.

Las lagunas poseen una extensión total aproximada de 18.9 Has. Conformada por motas de separación respecto de los canales perimetrales e interiores. La altura de la lámina de agua en las marjales, va desde los 20 cm, en los puntos lindantes con los canales interiores de regulación hídrica, hasta los 60 cm, en los puntos lindantes con el canal perimetral paralelo a la mota que linda con el lago de La Albufera.

Igualmente entre el ecosistema de Ullal y el de Marjal existe un canal de conexión, en el que transita agua limpia o de muy baja concentración de nutrientes. Al mismo tiempo, este canal de conexión funciona como reservorio de aguas limpias para el desarrollo de comunidades de macrófitos sumergidos y poblaciones piscícolas.

Acompañando a estos tres ecosistemas, se cuenta con canales de drenaje y alimentación, necesarios para la gestión hídrica del Tancat, cada uno de estos canales, cuenta con unas motas con vegetación de ribera o vegetación palustre, según la situación y altura de las motas.

Por otro lado, hay un canal de drenaje central en todo el Tancat, por el cual se realiza el desagüe de las aguas de los Filtros Verdes a las de marjal, además funciona como reservorio de la vegetación y fauna acuáticas.

También está el edificio del centro de interpretación, en donde se encuentran los despachos del personal encargado del Tancat, en el mismo sector se ubica el embarcadero y el "motor de la Pipa", antiguo sistema de bombeo utilizado para el vaciado del arrozal y que actualmente sirve de apoyo al nuevo sistema de bombeo de los efluentes depurados del Tancat vertidos al lago de La Albufera.

#### *3.1.3.2 Regulación Hídrica.*

##### *Entradas.*

El flujo de agua a través del Tancat de la Pipa se da por gravedad y se abastece del agua proveniente de la Acequia de Catarroja, la Acequia del Poyo y de una captación de aguas subterráneas que alimenta el ambiente de Ullal.

##### *Canales Perimetrales*

- Canal Perimetral Norte (CPN)
- Canal Perimetral del Poyo (CPP)
- Canal Perimetral de Catarroja (CPC)

- Canal Perimetral Sur (CPS)

### Canales Interiores

- Canal de Drenaje Interior (CD): Comunica los diferentes sistemas del Tancat (Filtros Verdes, Ullal, Marjales y resto de canales).
- Canal del Ullal o de aguas limpias (CU) está conectado con el Filtro 4, con el canal de drenaje interior y con el marjal educativo.

En la figura a continuación se presenta la ubicación de los canales, comentados anteriormente.

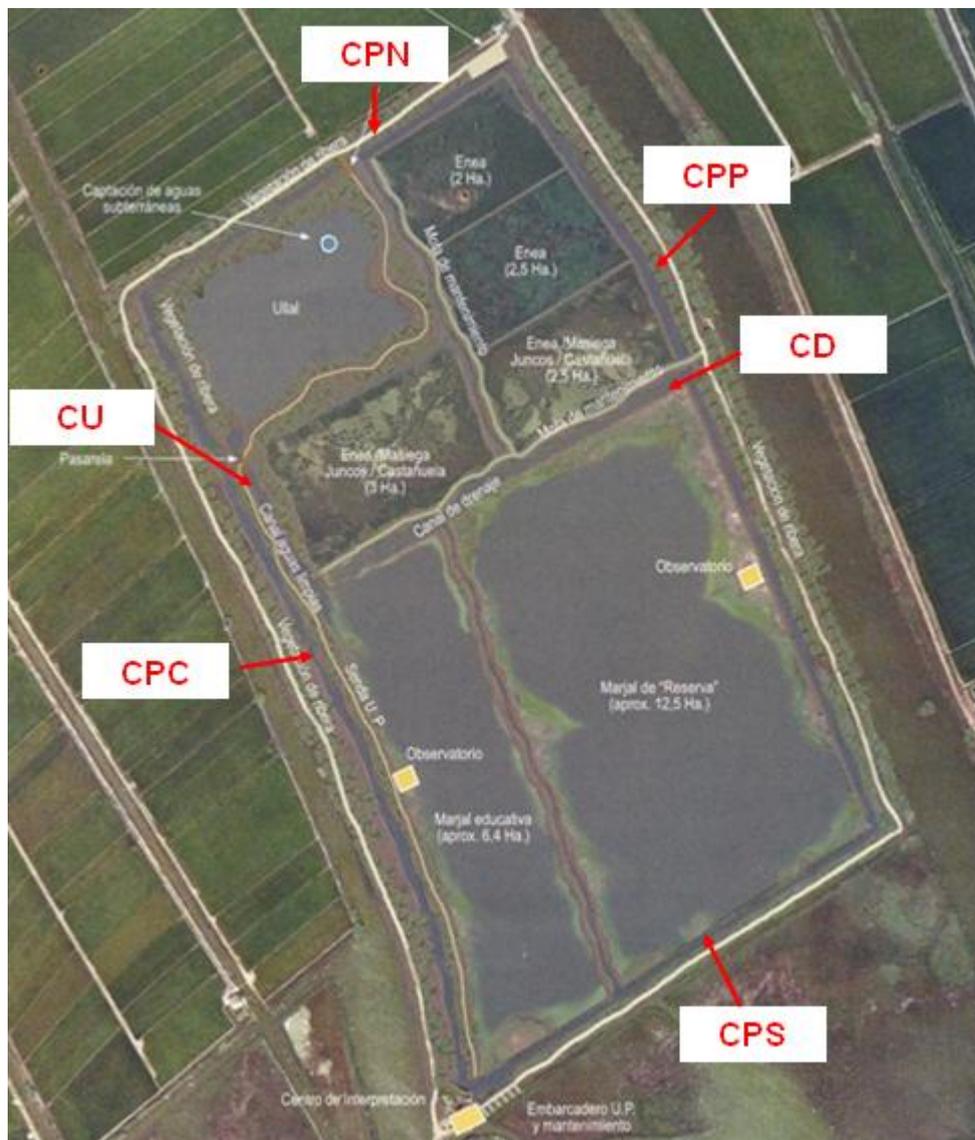


Figura 16. Ubicación canales Tancat de la Pipa.

### *Salidas*

Las salidas de agua desde el Tancat de la Pipa hacia el lago de La Albufera, se realizaron inicialmente con la turbina antigua del motor de la Pipa, que tiene una capacidad de 8,33 l/s, posteriormente a partir del mes de abril entró en operación un sistema de bombas, con capacidad de bombeo de 250 l/s.

#### *3.1.2.2. Motas interiores de mantenimiento.*

En el interior del Tancat, se ubican motas de mantenimiento de 4 metros de anchura en la cima y 1 metro de altura, compactadas con material con la consistencia necesaria para el paso de maquinaria requerida para las labores de gestión y mantenimiento del sistema.

### 3.2. Filtros Verdes del Tancat de la Pipa.

Los Filtros Verdes del Tancat de la Pipa, constituyen una versión de lo que académicamente se conoce como Humedales Artificiales de Flujo Superficial con macrófitos emergentes, en los cuales se utilizan plantas enraizadas y tolerantes al encharcamiento, autóctonas del sistema humedal de La Albufera.

Por tratarse de un proyecto de restauración de ecosistemas, se ha integrado, este sistema de depuración de aguas, de la forma más natural posible al Tancat de la Pipa, generando un espacio que permite el desarrollo de comunidades biológicas prioritarias y potencia la recuperación de especies raras y amenazadas presentes en este tipo de ambientes.



Figura 17. Detalle Filtros Verdes.

Debido a lo anterior, el diseño de los Filtros Verdes, se adaptó a las características del terreno y del ecosistema preexistente, y las actuaciones para su construcción se gestionaron de tal manera que se causará el menor impacto posible al ambiente inicial.

Por otra parte y como se comentó anteriormente, la bibliografía recomienda relaciones longitud/anchura, mínimas de 5/1, pero esto no se cumplía en los Filtros, por tal motivo se subdividieron transversalmente los Filtros 1, 2 y 3, mediante la construcción de un canal de agua cerrado, ligeramente sinuoso, denominado *Anguilera*.

Con la división anterior, se pretendía además, tener espacios más pequeños, para su estudio, que permitieran por ejemplo: controlar minuciosamente la influencia de las variables atmosféricas, sobre la distribución de caudales y la vegetación.

Lo ideal, hubiese sido realizar más de una división, pero claro, esto no era posible, ya que el ecosistema natural se hubiese alterado seriamente.

### 3.1.3. Descripción del Sistema de Filtros Verdes del Tancat de la Pipa

El Sistema de Filtros Verdes del Tancat de la Pipa, está conformado por siete *Filtros* “parcelas” con características y áreas diferentes. En la tabla a continuación se presentan las áreas ocupadas por cada Filtro y se incluyen además las áreas de los otros ecosistemas, tales como: las lagunas, el Ullal y los canales.

**Tabla 11.** Áreas ambientes del Tancat de la Pipa.

Ambientes	Área (m <sup>2</sup> )
Filtro 1	13509
Filtro 2	18240
Filtro 3	17207
Filtro 4	25596
Filtro 1 pequeño	3575
Filtro 2 pequeño	5155
Filtro 3 pequeño	5902
<b>Total Área Filtros</b>	<b>89185</b>

Ambientes	Área (m <sup>2</sup> )
Ullal	45000
Laguna Educativa	64000
Laguna Reserva	125000
Canales	50000
<b>Área Total Tancat</b>	<b>373185</b>

La vegetación (macrófitas) empleada en los Filtros Verdes, se sembró entre los meses de enero y febrero de 2009, con lo cual ya se encontraba sembrada en el momento de iniciar el presente estudio, sobre esto se sabe, que cada filtro posee diferentes tipos de vegetación y que aproximadamente el 90% es Enea (*Typha Latifolia*). Sin embargo adicionalmente a este se han sembrado otras especies en el sistema. La tabla continuación presenta la distribución de estas en los Filtros

**Tabla 12.** Espacios de Plantas Macrófitas Cultivadas en los Filtros Verdes

FILTRO	CULTIVO
1 Grande	Enea ( <i>Typha Latifolia</i> )
1 Pequeño	Enea ( <i>Typha Latifolia</i> )
2 Grande	Enea ( <i>Typha Latifolia</i> )
2 Pequeño	Enea ( <i>Typha Latifolia</i> )
3 Grande	Enea ( <i>Typha Latifolia</i> ) Juncos ( <i>Scirpus Maritimus</i> , <i>S. Holoschoenus</i> , <i>Juncus Acutus</i> , etc) Castañuelas ( <i>Scirpus Mucronatus</i> , <i>Cyperus Rotundus</i> ) Masiega ( <i>Cladium Mariscus</i> )
3 Pequeño	Enea ( <i>Typha Latifolia</i> ) Juncos ( <i>Scirpus Maritimus</i> , <i>S. Holoschoenus</i> , <i>Juncus Acutus</i> , etc) Castañuelas ( <i>Scirpus Mucronatus</i> , <i>Cyperus Rotundus</i> ) Masiega ( <i>Cladium Mariscus</i> )
4	Enea ( <i>Typha Latifolia</i> ) Juncos ( <i>Scirpus maritimus</i> , <i>S. holoschoenus</i> , <i>Juncus acutus</i> , etc) Castañuelas ( <i>Scirpus mucronatus</i> , <i>Cyperus rotundus</i> ) Masiega ( <i>Cladium mariscus</i> )

### 3.1.4. Flujo de aguas por los Filtros Verdes del Tancat de la Pipa.

El agua a tratar en los Filtros Verdes, proviene por el este del Barranco del Poyo y por el oeste de la Acequia de Catarroja. Estas dos corrientes se mezclan en el canal norte e ingresan al sistema, mediante las compuertas de entrada al filtro 1 (grande y pequeño) y por las compuertas de entrada al filtro 4.

El sistema de compuertas entre todos los canales del Tancat permite el manejo de las aguas a voluntad, según las características de calidad de las aguas entrantes, periodo de depuración, mantenimiento de los Filtros Verdes, etc.

Este sistema de compuertas, permite el vaciado y limpieza de cada uno de los Filtros, por ejemplo cuando un filtro este en periodo de corta de la vegetación “siega”, las compuertas permiten el paso al siguiente filtro para continuar con el proceso de depuración.

Igualmente este sistema de compuertas permite repartir el agua a tratar de manera uniforme por los Filtros o evitar su entrada en los mismos cuando pueda producirse un episodio de avenidas o de entrada de aguas de muy mala calidad.

La distribución de las compuertas en los Filtros Verdes, se observa en el esquema a continuación, donde aparece la nomenclatura utilizada en la campaña de muestreo y adicionalmente las flechas indican el flujo normal de agua en el sistema.

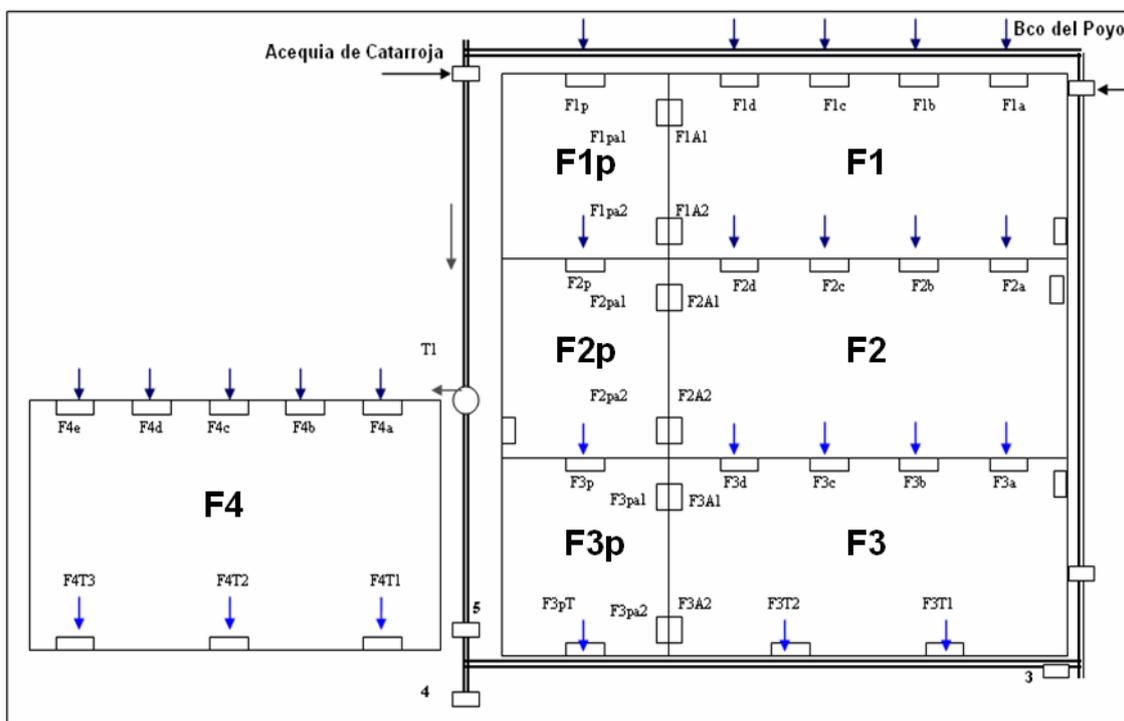


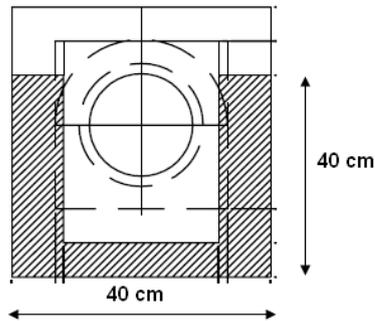
Figura 18. Flujo de agua a través de las compuertas de los Filtros Verdes

El ingreso de agua desde el Barranco del Poyo y la Acequia de Catarroja, ingresan al canal norte y se controla su flujo mediante válvulas, las mediciones de estos

caudales se realizan con el sistema de vertedero.

Las aguas realizan el ingreso al sistema, como ya se comentó desde el Barranco del Poyo y la Acequia de Catarroja, se mezclan en el canal norte y mediante tuberías de derivación, ingresan a través de las compuertas de entrada al Filtro 1 grande (F1a, F1b, F1c, F1d) y al Filtro 1 pequeño, (F1p).

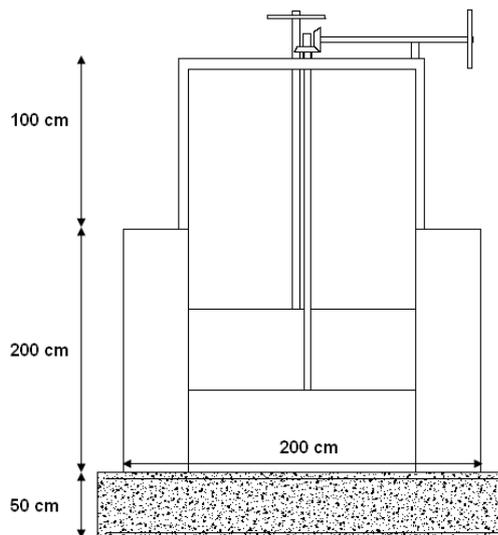
En el esquema a continuación se observa la vista frontal de la tubería y las compuertas de entrada de tipo tajadera, de 40 x 40 cm.



**Figura 19.** Dimensiones de las compuertas tipo tajadera de entrada.

Las compuertas son como las utilizadas de manera tradicional en los campos de arrozal, mediante las cuales se controla el flujo de agua de la manera más rentable para un buen rendimiento y funcionamiento de todo el sistema de depuración.

Las compuertas de salida y laterales son de tipo tajadera, las cuales se presentan en la figura a continuación.

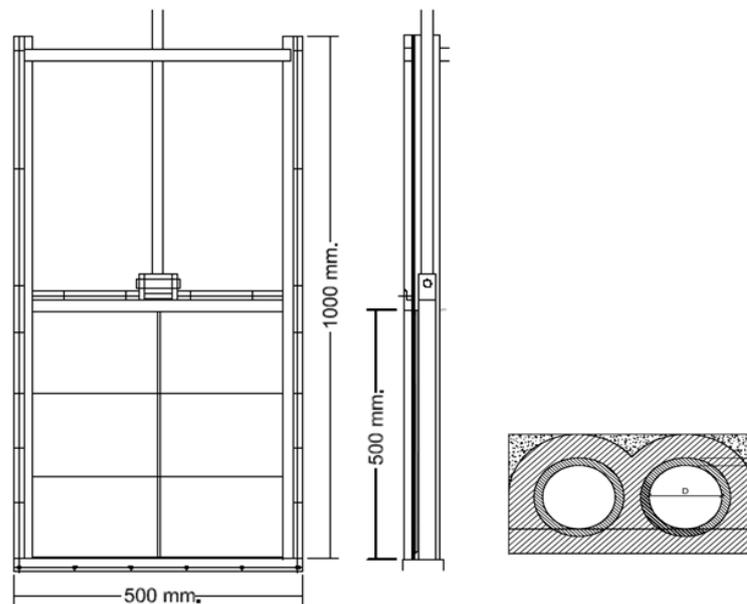


**Figura 20.** Dimensiones compuertas de tajadera, los Filtros Verdes

Las compuertas de salida del Filtro 3 (F3T1, F3T2), del Filtro 3 pequeño (F3pT) y del Filtro 4 (F4T1, F4T2, F4T3), para un total de seis compuertas tipo mural de 500 x 500 cm.

Cada filtro está nivelado a una misma cota para permitir que el tiempo de residencia del agua sea uniforme en toda la superficie del sistema. El nivel de agua en los Filtros se controlaba inicialmente mediante las compuertas de salida, por las cuales, mediante dos tuberías se evacua el agua tratada del sistema al canal perimetral sur y de ahí, pasa a las marjales.

Una de las propuestas de mejora, con el fin de conseguir la correcta gestión hídrica del Tancat, fue la instalación de juegos de tablonces de 10 cm. de altura, los cuales se ubicaron en las diferentes compuertas, con el fin de regular el nivel de la lámina de agua en los Filtros Verdes.

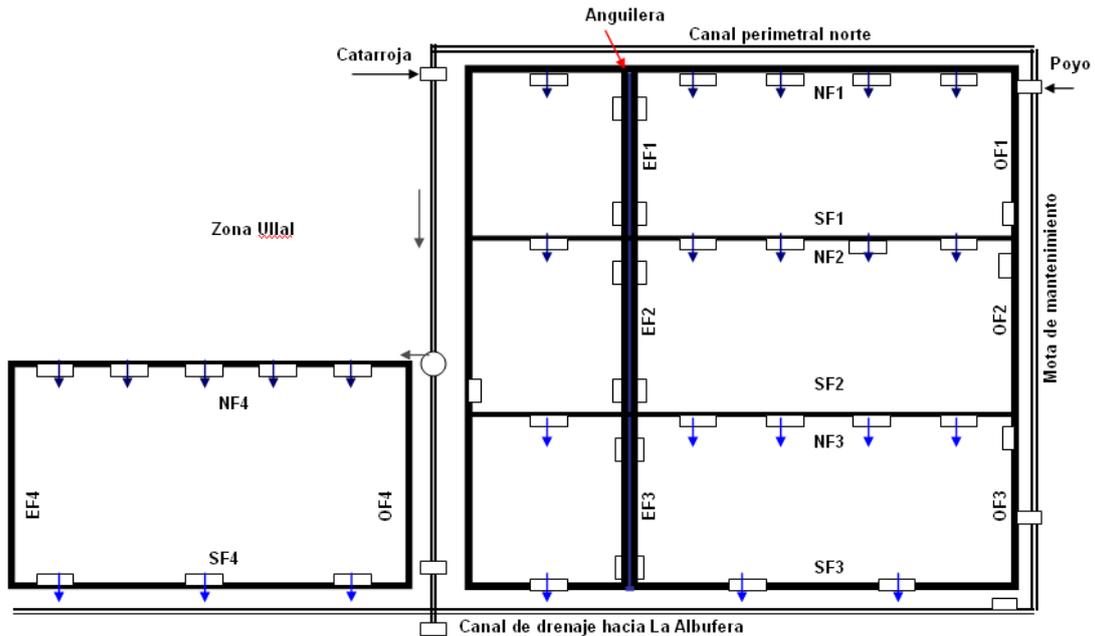


**Figura 21.** Dimensiones de las compuerta tajadera de salida y un detalle de la ubicación de las tuberías.

Las compuertas de tajadera, tienen como inconveniente, que solo permiten la apertura o el cierre total de las mismas, esto dificulta la regulación del nivel en los filtros, debido a esto fue necesaria la instalación de los tablonces, ya que permiten de una manera más económica y fácil controlar la altura de la lámina de agua en el sistema.

Por otro lado, están delimitados perimetralmente por motas de altura variable, donde se instalaron las compuertas descritas anteriormente, para permitir la entrada y salida de las aguas de cada filtro.

En la figura a continuación se observan las motas perimetrales que delimitan cada filtro, del exterior, entre sí y en algunos de la anguilera.



**Figura 22.** Delimitación Filtros Verdes

### Filtro 1

- Norte (NF1): Separa del canal perimetral norte, tiene una altura de 50cm, con las compuertas de tajadera de 40 x 40 cm. ubicadas cada 40 metros.
- Sur (SF1): Separa del Filtro 2, tiene una altura de 40 cm., con unas compuertas de tajadera de 40 x 40 ubicadas cada 40 metros. Las compuertas poseen un aliviadero de 30 cm. de altura para regular la altura de la columna de agua en los filtros.
- Este (EF1): Separa de la anguilera, tiene una altura de 1 metro.
- Mota Oeste (OF1): También llamada mota de mantenimiento tendrá una altura de 1 metro.

### Filtro 2

- Mota Norte (NF2): Separa del Filtro 1, (así como la Sur separa del Filtro 3), con una altura de 40 cm, con sus correspondientes compuertas de tajaderas de 40 x 40 cm.
- Mota Este (EF2) y Oeste (OF2): Con 1 metro de altura.

### Filtro 3

- Mota Norte (NF3): Separa del Filtro 2, con una altura de 40 cm, con sus correspondientes compuertas de tajaderas de 40 x 40 cm.
- Mota Este (EF3) y Oeste (OF3): Con 1 metro de altura
- Mota Sur (SF3): Tiene compuertas de tajadera de 500 x 500 x 1000 sobre arqueta para la salida de las aguas tratadas hacia el canal de drenaje y 1 metro de

altura

Las motas que delimitan el Sistema de Filtros Pequeños poseen las mismas características que las anteriormente indicadas para el sistema de Filtros Grandes.

*Filtro 4*

- Mota Norte (NF4): Separa de la zona de ullal con una altura de 40 cm.
- Motas Este (EF4) y Oeste (OF4): Con altura de 1 metro.
- Mota Sur (SF4): Tiene compuertas de tajadera de 500 x 500 x 1000 sobre arqueta para la salida de las aguas tratadas hacia el canal de drenaje y 1 metro de altura.

#### 4. OBTENCIÓN DE DATOS DE CAMPO

El éxito o fracaso del tratamiento en humedales artificiales depende del diseño, el flujo y la profundidad de la lámina de agua a través del humedal, siendo este último crítico en la operación del humedal. Esta flexibilidad operacional es necesaria para mantener el régimen hidráulico considerando las variables hidrológicas y las necesidades de las plantas de los humedales. Por consiguiente, es necesario comprender los factores hidráulicos que se relacionan profundidad y velocidad de flujo, incluida la densidad de la vegetación y la relación de aspecto. (Kadlec y Wallace, 2009).

El presente estudio pretende conocer el funcionamiento hidráulico y el régimen de distribución de caudales del Sistema de Filtros Verdes del Tancat de la Pipa, para lo cual se realizó una campaña de muestreos comprendida entre los meses de febrero de 2009 y abril de 2010, en el transcurso de ese año se realizaron un total de 37 visitas, durante los dos primeros meses febrero y marzo, se inspeccionó el terreno que aún estaba en construcción, a partir de abril se tomaron datos de caudales de entrada, tomas de muestras de agua para posteriores análisis fisicoquímicos y medición de caudales en las compuertas.

De las 37 visitas de campo a los Filtros Verdes, en 27 de ellas se realizaron mediciones para la determinación de los caudales circulantes en las compuertas, Las columnas de la gráfica siguiente, representan el número de muestreos realizados, en los que se realizo medición de velocidades de flujo a través de las compuertas.

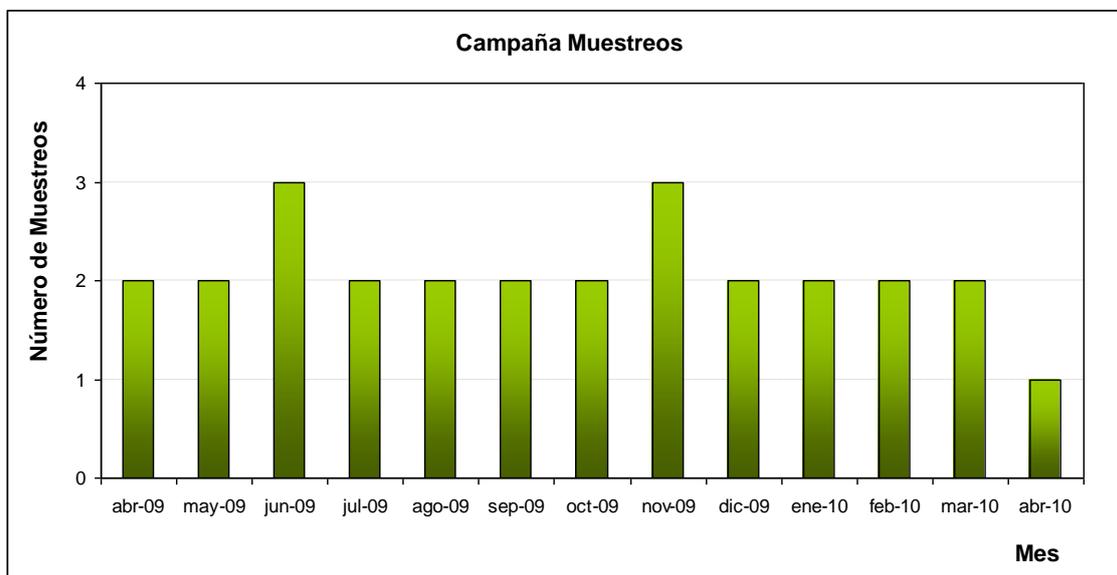


Figura 23. Campaña de Muestreos Filtros Verdes

Para realizar las mediciones se utilizaron distintos métodos, en función de las peculiaridades del hidrosistema en cada punto a controlar y teniendo en cuenta los medios técnicos disponibles.

Básicamente se realizaron tres tipos de mediciones para la estimación de caudales, mediante Vertederos se registraron los caudales provenientes de la Acequia de Catarroja y del Barranco del Poyo, y los caudales circundantes por las compuertas en los Filtros Verdes, mediante Molinetes y Flotadores.

#### 4.1. Medición de Caudales.

##### *Caudales de Entrada.*

La primera dificultad que se encontró a la hora de establecer los caudales circulantes por el sistema fue la inexistencia de sistemas de aforo en las entradas desde el Barranco del Poyo ni desde la Acequia del Puerto de Catarroja. Durante los meses de febrero y marzo de 2009 se estuvieron haciendo ensayos con el fin de determinar el mejor sistema a instalar. Finalmente se propuso la instalación de un vertedero triangular con ángulo de 90° y una regleta para la medición del nivel. (Ver Anejo I)

En la Arqueta del Barranco del Poyo se obtuvieron datos de caudales desde el 1 de junio, día en el cual se puso operación el vertedero y en el Puerto de Catarroja, a partir del día 13 de julio. Cabe anotar que los días en los que se realizaron las visitas, a pesar que no se hicieron mediciones de caudales en las compuertas de los Filtros, se registraron datos de caudales de entrada tanto del Barranco del Poyo como del Puerto de Catarroja.



**Figura 24.** *Detalle Vertedero Triangular.*

El procedimiento de cálculo de caudal de agua en las arquetas de entrada, fue:

- Registrar el valor del nivel del agua en (m), que marque la regleta en la arqueta.
- En la Tabla de caudales de descarga (Ver Anexo), ubicar la columna para vertederos triangulares con ángulo de  $90^\circ$  y anotar el caudal en (l/s), correspondiente al nivel observado.

#### *Caudales en las compuertas.*

En general para llevar a cabo las mediciones se de caudales en el sistema, fue un poco complicado ya que la estructura del mismo dificultaba dicha tarea, en la medición de caudales en las compuertas de los filtros, un factor de error introducido era el área de la sección transversal donde se llevaba a cabo la medición, eso debido a la existencia de sedimentos, vegetación, etc., que aunque manualmente a la hora de medir se intentaban remover, no era posible hacerlo completamente.

Para medir la velocidad del flujo en las compuertas de entrada, se utilizó un Minimolinete M1 (Marca SEBA), el equipo completo está constituido por el molinete propiamente dicho, la barra-soporte con pie, cable y la caja-contador de impulsos, las mediciones se realizaron utilizando la hélice con referencia No. 50.488 (Ver Anejo II) Ficha Técnica Minimolinete.



**Figura 25. Posición del minimolinete en la tubería de la compuerta de salida.**

En la tabla a continuación se presentan la dimensión y rango de medida de la hélice utilizada en el minimolinete.

**Tabla 13.** Características de la hélice. Fuente: Ficha técnica del Minimolnete M1. SEBA

Diámetro (mm)	Paso de la hélice (mm)	Velocidad máx. con caja-contador Z1 (m/s)	Velocidad de arranque (m/s)
50	50	1,0	0,025

Con los datos obtenidos en la ficha técnica del equipo y según la ecuación 2., el cálculo de la velocidad media del flujo, con el molinete, será:

$$v = 0,05 * n + 0,025$$

**Ecuación 7**

Donde:

V = velocidad de la corriente (m/s)

k = paso hidráulico de la hélice = 0,05 (m)

n = revoluciones de la hélice por segundo

Δ = constante del molinete (m/s) = 0,025 (m)

Para realizar el cálculo velocidad (v), se realiza el siguiente procedimiento:

- Medir con una regla la altura de la lámina de agua en metros.
- Con base en los valores de la Tabla 2. y teniendo en el sistema un calado (h) promedio entre 15 y 45 cm, se fija la hélice a una altura de 0.6\*h.
- El molinete se introduce paralelo al flujo de agua, en el centro de la compuerta y se anotan las vueltas dadas por la hélice en un minuto, observadas en la caja contador de impulsos.
- Se realiza el procedimiento anterior durante tres minutos, manteniendo constante la altura de la hélice.
- Con base el los datos obtenidos anteriormente, calcular n, revoluciones de la hélice por segundo.
- Mediante la ecuación 3., calcular la velocidad media del flujo.

En el caso de las compuertas cuadradas de tajadera, se conoce su anchura (0,4 m.) y midiendo con una regla la altura de lámina de agua en cada compuerta en metros, se calcula el área de la sección transversal del flujo de agua, así:

$$\text{Área (m}^2\text{)} = \text{Anchura (m)} * \text{Calado (m)}$$

**Ecuación 8**

Lo que nos permite calcular el caudal según la Ecuación 1.

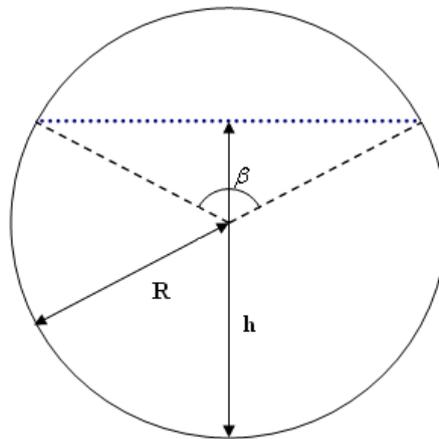
En las compuertas de salida tipo mural (50 x 50 x 100 cm.) al final de los Filtros Verdes, la salida del efluente se realiza por tuberías circulares en PVC de 0,480 m. de

longitud y diámetro interno de 0,380 m.; en cada compuerta de salida están instaladas dos tuberías iguales de las dimensiones anteriormente señaladas.

El cálculo de la sección transversal de flujo de agua en la tubería se realiza con base en la ecuación que describe el cálculo de la sección de un segmento circular, en este caso corresponde al área libre de agua de la tubería, en la figura a continuación se presenta el segmento medido en campo, (h) es la altura de la lámina de agua, con base a esto y conocido el radio de la tubería, se realizan los cálculos correspondientes mediante la ecuación:

$$S = \frac{1}{2} * R^2 * (0.017453 * \beta - \text{Sen } \beta)$$

**Ecuación 9**



**Figura 26. Esquema para el cálculo de la sección transversal de la tubería.**

De la figura anterior tenemos:

R = Radio de la tubería (m)

h = Altura de la lámina de agua, en el centro de la tubería (m)

β = Ángulo del segmento seco de la tubería.

Con base en lo anterior, el área de la sección transversal mojada de la tubería será, la resta entre el área total de la tubería y área libre de agua de la tubería.

*Caudales en las salidas.*

Para el cálculo de los caudales circulantes por las compuertas de salida de los Filtros Verdes, en los días que no se contaba con el minimolinete, también se midió la velocidad superficial del flujo de agua por las tuberías de salidas, por el método del flotador. Siguiendo los procedimientos anteriormente comentados.

## 4.2. Comentarios de la Campaña de Muestreos.

Durante el año de la campaña de muestreos se observaron situaciones relevantes en el Sistema de Filtros Verdes, los más relevantes se comentarán en este apartado.

La figura a continuación, presenta en las columnas todas las fechas de visitas al sistema, como ya se comento anteriormente, en algunas de estas se realizaron mediciones de velocidades (ver gráfica 1).

En todas las fechas de la campaña de muestreos se observaron situaciones unas con mayor relevancia que otra, lo cual se ha representado en la figura siguiente, asignando un valor de 1, ó 2, a cada fecha según la relevancia de las situaciones observadas, así:

- Se asigno un valor de (1); a algunas fechas en las que se apreciaron aspectos importantes como fugas entre las motas o las compuertas.
- Se asigno un mayor valor (2) a algunas fechas, pues en estas se presentaron situaciones muy relevantes para el funcionamiento del sistema, como ejemplo podemos nombrar el día 13 de julio, en el cual se comenzó a ingresar agua al sistema, procedente de la Acequia de Catarroja.

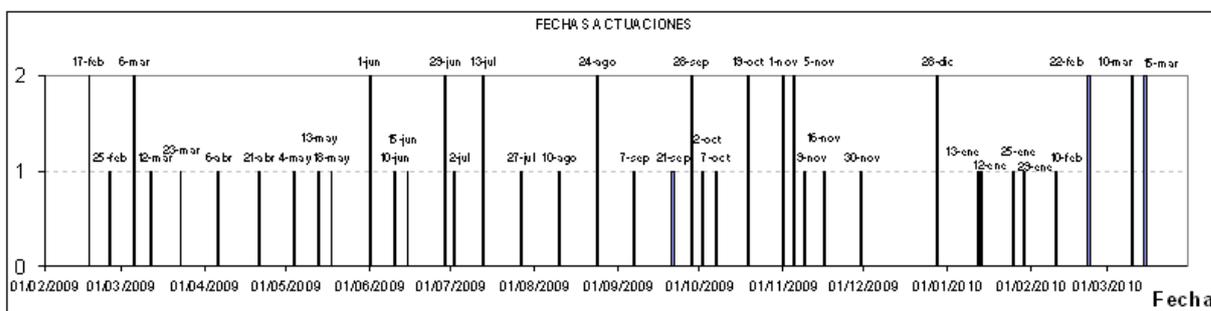


Figura 27 Fechas visitas realizadas a los Filtros Verdes.

A continuación se comentan algunas situaciones relevantes, que se han presentado en el proceso de puesta en operación del sistema de Filtros Verdes, y se han observado en las visitas realizadas al mismo:

- El Tancat de la Pipa, se creó con el objetivo principal, de restaurar un ecosistema degradado. Por tal motivo la construcción de los Filtros Verdes, se realizó buscando su integración a dicho ecosistema, ocasionando el menor impacto posible y así recuperar un espacio apto para la vida salvaje, sirviendo paralelamente, como un sistema pasivo de depuración del agua.

Debido a lo anterior, no se impermeabilizaron los terrenos y la creación de las “parcelas” que conforman los Filtros Verdes, se construyeron con los mismos

suelos del sistema, el principal inconveniente es que se presentaron filtraciones de agua en diferentes puntos del sistema. Como por ejemplo filtraciones por las compuertas laterales de los filtros grandes, hacia la acequia del Poyo, ó, de los filtros hacia la anguilera

- Desde Febrero de 2009 hasta Junio de 2009, no se contó con los vertederos de las entradas, lo cual impidió controlar los caudales de entrada al sistema. Además la apertura y cierre de válvulas en las entradas, se manejo a voluntad de los operarios del Tancat de la Pipa, y en algunas ocasiones no se informó con exactitud de estos hechos.
- La creación de la anguilera, tuvo como objetivo, dividir los filtros grandes y conseguir celdas de menor tamaño, que tuvieran mejor relación longitud/ancho, en la bibliografía se recomienda sea de 5/1. Además con los filtros pequeños se pretendía tener mayor control sobre la distribución de caudales y observar más detalladamente la influencia del viento sobre su superficie.
- El nivel del lago de La Albufera, afecta muchísimo al caudal y en algunas épocas, estos fluctúan de manera notable, incluso en pocas horas al día.

Durante la campaña se observaron anomalías en el funcionamiento del Sistema, algunos de estos hechos se registran en la tabla a continuación.

**Tabla 14.** Hitos registrados en la campaña de muestreos

Fecha	Actuación
17/02/2009	Se realizan las primeras pruebas de medición de caudales en las arquetas de entrada.
01/06/2009	Se instala el vertedero triangular en la Arqueta del Barranco del Poyo (Punto 1.1)
15/06/2009	Se constata el bajo caudal de salida del Ullal y se propone a instalación de un contador.
29/06/2009	Se decide aumentar el caudal a 60 l/s
02/07/2009	Se detiene la entrada desde el Bco. del Poyo por obras en la arqueta.
13/07/2009	Se instala el vertedero triangular en la Arqueta de la Acequia del Puerto de Catarroja (Punto 1.2) y comienza a ingresar agua por la misma.
Julio 2009	Se detiene la entrada a F4 por replantación.
29/06/2009 13/07/2009	Se detectan filtraciones a través de diversas compuertas de las acequias perimetrales y central. <ul style="list-style-type: none"> <li>• Entra agua a la anguilera por el tubo</li> <li>• En el Barranco del Poyo, está filtrándose agua a la compuerta izquierda</li> </ul>
27/07/2009	Se detecta la rotura de las motas de la anguilera: los filtros F3G, f2p y f3p se comunican.
03/08/2010	Se reparan las motas de la anguilera.
21/08/2009	Se instala el contador de agua del Ullal
16/11/2009	Se decide aumentar el caudal a 100 l/s
05/11/2009 a 30/11/2009	Se detiene la entrada a F1 por cosechado. Se detiene la entrada a Sector p por cosechado.

13/01/2010	Compuerta lateral F2P y F3P abierta y saliendo agua a la anguilera
15/03/2010	Se realizan pruebas de rebombeo

Los Filtros Verdes son un sistema dinámico, que actúa bajo la influencia de diversas variables tales como: precipitación, evapotranspiración e irregularidades observadas en la campaña de muestreos tales como: la variación constante en los niveles del lago de La Albufera, obstrucciones en las compuertas, fugas y filtraciones; por tanto es necesario, al momento de analizar los caudales obtenidos en la campaña de muestreos, considerar que lo que se está midiendo a la salida del sistema de Filtros Verdes, pueda tener poco que ver con lo que está entrando al sistema en ese momento.

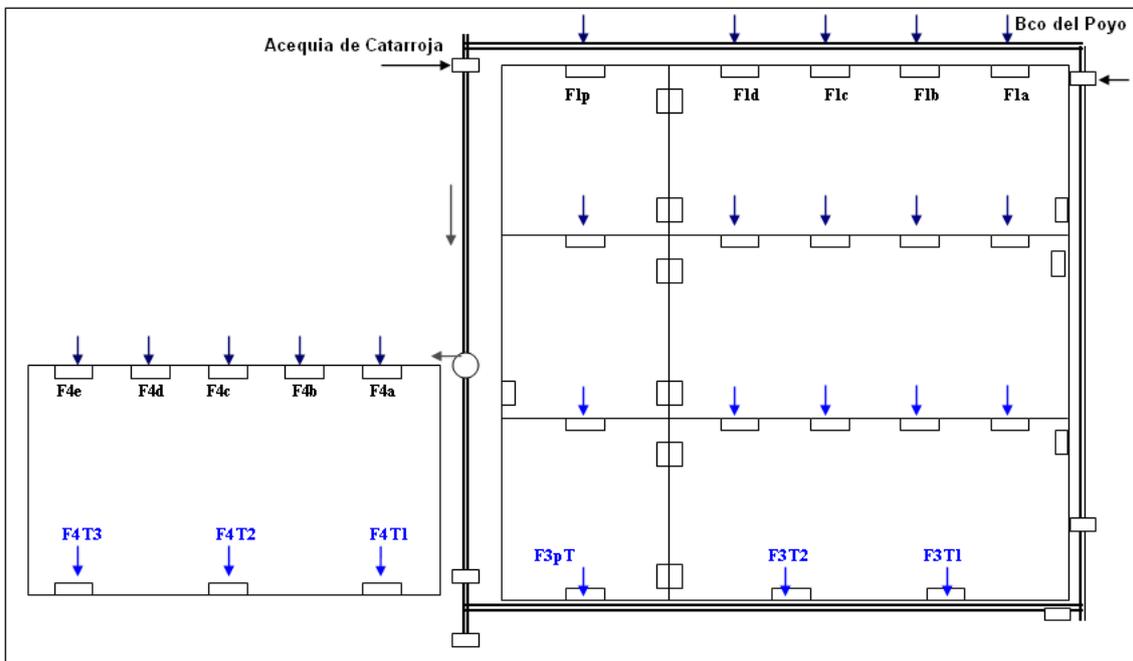
Para que los datos de caudal medidos en los vertederos de entrada, concuerden con los caudales medidos en las salidas, el sistema de Filtros Verdes debería permanecer en estado estacionario, lo cual en este tipo de sistemas es muy difícil de conseguir.

## 5. RESULTADOS DE LA CAMPAÑA DE MUESTREOS.

### 5.1. Aspectos generales.

#### 5.1.1. Medición de Caudales de Entrada los Filtros Verdes.

En el presente apartado, se comparan los valores de caudales de entrada medidos con los vertederos de Poyo y Catarroja; y los caudales de entrada medidos mediante molinete o flotador, en las compuertas de entrada a los Filtros Verdes, en la gráfica a continuación se observan las posiciones de los puntos analizados.



**Figura 28.** Puntos medición de caudales en los Filtros Verdes

En la tabla a continuación, se presentan las fechas que permiten comparar los valores de caudales de entrada medidos con los vertederos de Poyo y Catarroja y los caudales de entrada medidos en las compuertas.

**Tabla 15.** Caudales de entrada a Filtros Verdes

		<b>Total Filtros</b>	<b>Total Vertederos</b>
<b>Muestreo</b>	<b>Fecha</b>	<b>(l/s)</b>	<b>(l/s)</b>
1	06/04/2009	24.02	7.00
2	21/04/2009	35.14	7.00
3	04/05/2009	26.76	7.00
4	18/05/2009	26.76	7.00
5	01/06/2009	12.50	35.04
6	15/06/2009	8.91	26.48
7	29/06/2009	20.42	39.00
8	13/07/2009	68.68	52.00
9	27/07/2009	75.96	79.00
10	10/08/2009	45.84	66.40
11	24/08/2009	53.48	70.33
12	07/09/2009	76.39	79.53
13	21/09/2009	53.48	74.01
14	07/10/2009	45.84	82.13
15	19/10/2009	53.48	91.29
16	09/11/2009	90.14	80.00
17	16/11/2009	47.66	100.00
18	30/11/2009	79.67	72.35
19	16/12/2009	79.67	89.67
20	28/12/2009	100.01	111.00
21	13/01/2010	69.88	95.48
22	25/01/2010	87.61	87.36
23	10/02/2010	107.87	90.96
24	22/02/2010	66.21	87.36
25	10/03/2010	100.58	87.36
26	22/03/2010	64.72	74.71
27	06/04/2010	55.00	74.52

De la tabla anterior debemos considerar, los siguientes aspectos importantes:

- Los cuatro primeros datos de caudales registrados en la columna vertederos; dado que aún no se contaba con los vertederos, se obtuvieron, aproximando un dato de caudal según el número de vueltas de abertura de la válvula de entrada. Sin embargo debido a que no se dispone de medidas de niveles, no se conoce exactamente la cantidad de agua ingresada por esas fechas, por lo que estos valores son poco fiables.
- El día 29 de Junio solo se encontraba operando el vertedero del Barranco del Poyo. Misma fecha en la que el caudal medido en la Entrada a Filtros se contabilizó únicamente el caudal entrante por el Filtro 1, obviando el caudal entrante al Filtro 4.
- Desde el día 13 de Julio, se abrió pasó por Catarroja, y el caudal alimentado desde esta acequia se controla con el vertedero de Catarroja. Recordar que el vertedero del Poyo fue instalado desde el día 1 de Julio.

- Se debe recordar que el Sistema de Filtros Verdes es un ecosistema natural, el cual no posee ningún tipo de impermeabilización y por lo tanto las diferencias de valores entre los caudales de entrada medidos con los molinetes y en los vertederos puede deberse a filtraciones en el sistema.
- En las visitas realizadas a campo se observaron situaciones que sustentan la discrepancia entre los caudales medidos con los vertederos y los medidos en las acequias, tales como filtraciones entre las paredes de los filtros y los canales perimetrales, filtraciones entre las paredes de los filtros y el canal central que divide los filtros grandes de los filtros pequeños denominado Anguilera.
- Además de lo anterior, también se detecto debido a la gran población de cangrejos presentes en el ecosistema, que los caminos que estos hacen permiten filtraciones entre las celdas, todas estas filtraciones y/o fugas fueron observadas, pero no se tiene ningún registro de estos caudales.

Los datos anteriormente comentados, se representan en la gráfica siguiente.

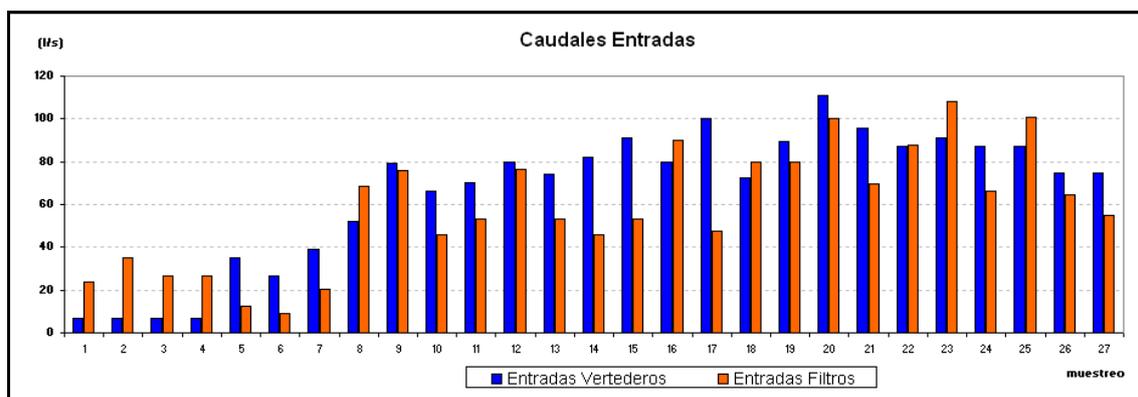


Figura 29. Caudales de entrada a Filtros Verdes.

### 5.1.2. Flujo de Caudales en los Filtros Verdes del Tancat de la Pipa.

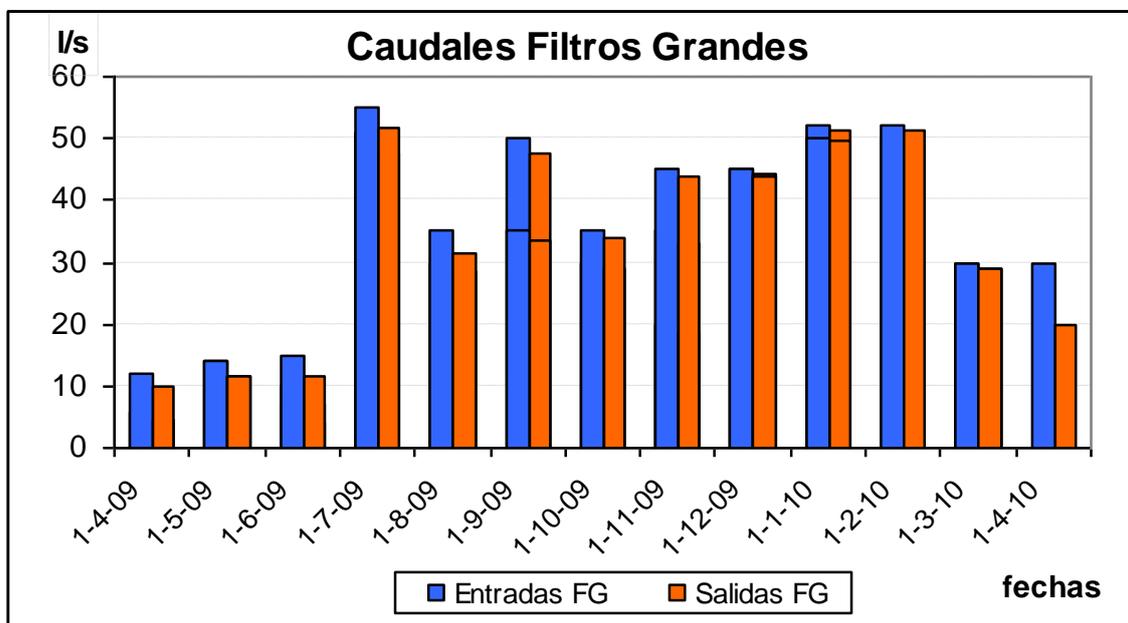
Tabla 16. Caudales circundantes en los Filtros Verdes.

Muestreo	Fecha	Filtros Grandes		Filtros Pequeños		Filtro 4	
		Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida
		l/s	l/s	l/s	l/s	l/s	l/s
1	06/04/2009	6	4.70	2.74	2.35	15.28	14.60
2	21/04/2009	12	9.79	4.62	3.96	18.52	17.36
3	04/05/2009	14	11.39	5.25	4.47	7.51	6.15
4	18/05/2009	14	11.51	5.25	4.50	7.51	6.21
5	01/06/2009	10	7.17	2.50	1.65	0	0
6	15/06/2009	7	4.05	1.91	1.03	0	0
7	29/06/2009	15	11.77	5.42	4.45	0	0
8	13/07/2009	51	47.77	6.62	5.65	11.06	9.37

9	27/07/2009	55	51.83	8.30	7.35	12.66	11.00
10	10/08/2009	30	28.73	8.20	7.82	7.64	6.98
11	24/08/2009	35	31.58	9.56	8.54	8.91	7.12
12	07/09/2009	50	47.76	13.66	12.99	12.73	11.56
13	21/09/2009	35	33.64	9.56	9.15	8.91	8.20
14	07/10/2009	30	28.78	8.20	7.83	7.64	7.00
15	19/10/2009	35	33.84	9.56	9.21	8.91	8.31
16	09/11/2009	35	33.05	10.86	10.28	44.28	43.27
17	16/11/2009	20	18.81	5.29	4.93	22.37	21.75
18	30/11/2009	45	43.79	12.30	11.94	22.37	21.74
19	16/12/2009	45	44.26	12.30	12.08	22.37	21.98
20	28/12/2009	45	43.98	10.07	9.77	44.94	44.41
21	13/01/2010	52	51.38	17.88	17.70	0	0
22	25/01/2010	50	49.73	9.50	9.42	28.11	27.97
23	10/02/2010	50	48.98	13.66	13.36	44.21	43.66
24	22/02/2010	52	51.20	14.21	13.97	0	0
25	10/03/2010	30	29.07	14.77	14.49	55.81	55.32
26	22/03/2010	30	28.98	8.20	7.90	26.53	25.98
27	06/04/2010	30	20.07	7.00	11.00	18.00	11.21

*Sistema de Filtros Grandes*

En la gráfica siguiente se presentan los caudales medidos en las compuertas de entrada al Filtro 1 grande y los caudales correspondientes a la salida del Sistema de Filtros Grandes, medidos en las compuertas de salida del Filtro 3 grande.



**Figura 30.** Caudales circundantes en el Sistema de Filtros Grandes.

En la gráfica anterior se observan tres periodos muy marcados, en cuanto a la alimentación de agua al sistema, estas oscilaciones son debidas a la variación en los niveles del lago.

- A partir de la puesta en funcionamiento hasta el mes de Julio, durante este periodo se ingreso por el Filtro 1, un caudal promedio de 11 l/s.
- A finales del mes de Julio se incrementó considerablemente el caudal de entrada al sistema, ingresando un caudal promedio de 40 l/s.
- Se observa claramente un descenso brusco del caudal de entrada el día 16 de Noviembre, debido a la siega del Filtro 1. Durante la siega el caudal se redujo y se ingreso al sistema mediante la compuerta lateral al Filtro 2.
- Aproximadamente durante un mes después de la siega el Filtro 1 permaneció fuera de funcionamiento, y durante este periodo el ingreso de caudal al sistema se realizó mediante el Filtro 2.
- Durante el periodo de Diciembre a Febrero se aumento el caudal, se mantuvo más constante, con un valor promedio de 50 l/s.
- El día 10 de Marzo de 2010, se presentó un vertido de pesticidas y los funcionarios del Tancat cerraron el paso de agua proveniente del Poyo hacia los Filtros, manteniendo la entrada desde Catarroja.

### Sistema de Filtros Pequeños

En la gráfica siguiente se presentan los caudales medidos en las compuertas de entrada al Filtro 1 pequeño y los caudales correspondientes a la salida del Sistema de Filtros Pequeños, medidos en las compuertas de salida del Filtro 3 pequeño.

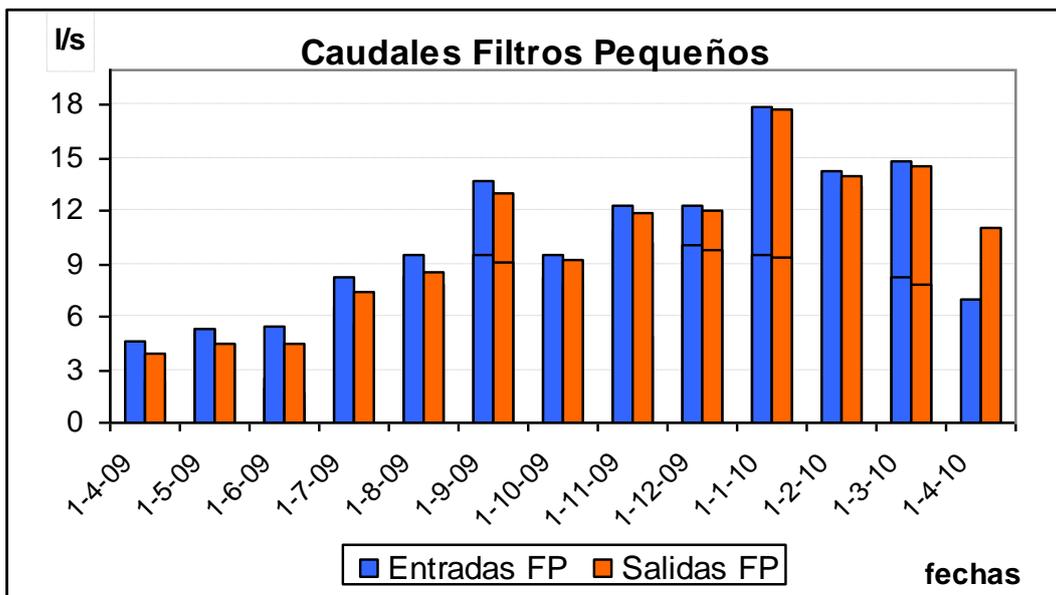


Figura 31. Caudales circundantes por el Sistema Filtros Pequeños

En el sistema de Filtros Pequeños, se presentan los periodos comentados anteriormente en el Sistema de Filtros Grandes, sin embargo se observan algunas particularidades:

- El caudal de entrada a los filtros pequeños, está más influenciado por el caudal proveniente de Catarroja que los filtros grandes. En la gráfica anterior podemos apreciar el aumento de caudales a partir del día 13 de Julio, fecha en la cual se abrió pasó por Catarroja.
- El día 11 de Enero de 2010, se observa un aumento de caudal 17 l/s, esto debido que se cerró la entrada al filtro 4.

### Filtro Cuatro

En la gráfica a continuación, se presentan los caudales circundantes por el Filtro 4, cabe resaltar que este filtro recibe en su mayoría agua ingresada por Catarroja.

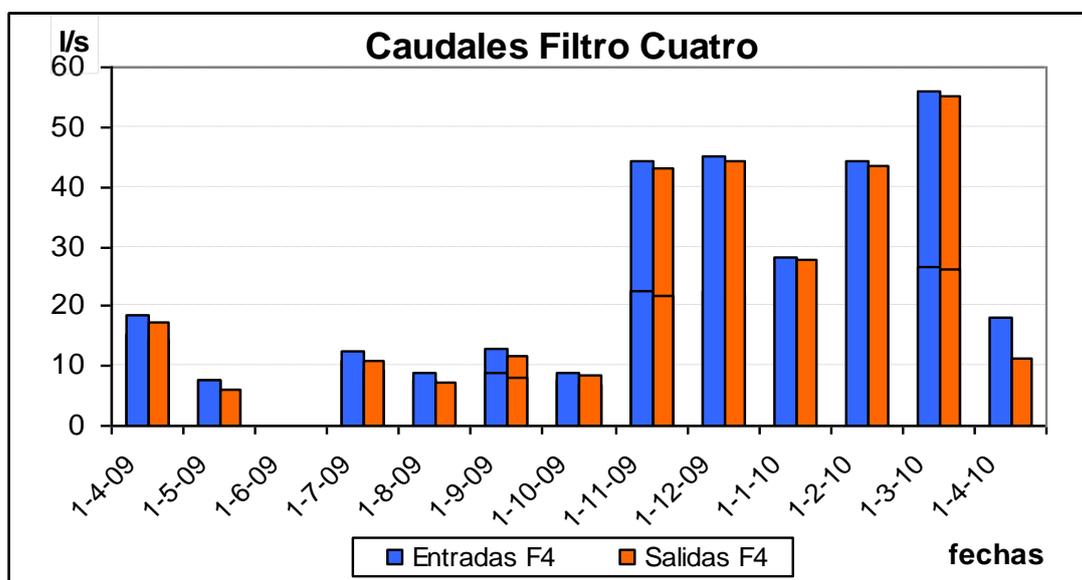


Figura 32. Caudales circundantes por el Filtro Cuatro

De la gráfica anterior se deben destacar algunas fechas en las que no circuló agua por el filtro cuatro, debido a las siguientes eventualidades:

- Durante el mes de Junio se replantó el filtro, ya que, en la primera siembra la densidad de vegetación fue muy baja y además esta no tuvo el desarrollo esperado.
- A inicios del mes de Enero se disminuyó el caudal de entrada al filtro cuatro con objeto de bajar el nivel, pero el operario cerró demasiado la válvula cortando el flujo agua por el filtro.

- A finales del mes de Febrero se realizaron pruebas de rebombeo, para lo cual fue necesaria la instalación de una compuerta a la entrada del filtro, debido a las obras se cerró la circulación.
- Luego de las pruebas de rebombeo se observa un aumento de caudal de entrada en el filtro, registrando el día 10 de marzo el valor más alto de caudal de 55 l/s.

### 5.1.3. Distribución de Caudales en los Filtros Verdes

Con el fin de determinar la distribución del agua en cada una de las compuertas de entrada, se midieron los caudales de entrada a las compuertas mediante los molinetes, en varias ocasiones no fue posible realizar las mediciones en todos los puntos, pues se presentaron inconvenientes tales como: obstrucciones en las tuberías debido a la vegetación, formación de caminos preferenciales que llevaban la mayoría del caudal por una compuerta, realización de obras en el sistema, cierre de las válvulas de entrada al sistema, etc.

En los apartados siguientes se muestran algunas de las fechas en las cuales se registraron valores de caudales en el Sistema de Filtros Verdes.

*Caudales medidos en Abril de 2009*

En la figura a continuación se presentan los caudales de entrada en (l/s), obtenidos mediante el uso de los molinetes, el día 21 de Abril de 2009.

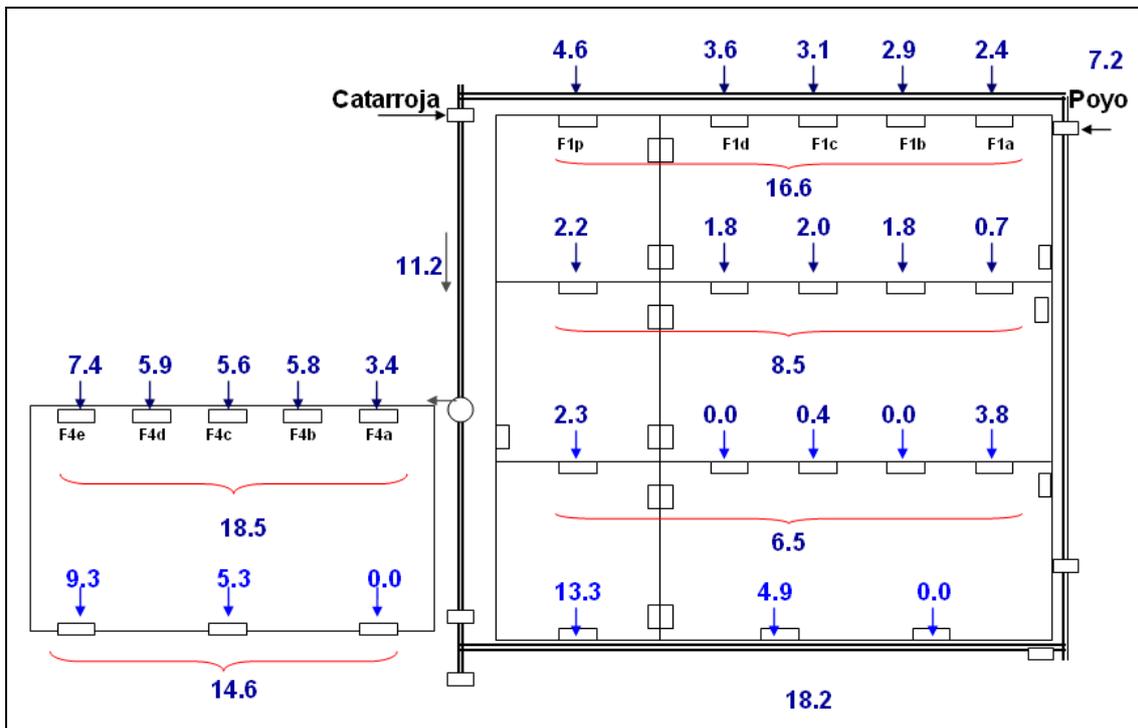


Figura 33. Distribución de caudales compuertas FV, el día 21 de Abril de 2009.

Los valores de caudales registrados nos dan una idea general sobre el régimen de distribución de caudales en el Sistema de Filtros Verdes.

Teniendo en cuenta que en esa fecha el sistema se alimentaba únicamente con el agua proveniente del barranco del Poyo y que no contaba con vertedero para medición de caudal, se calcula un dato aproximado basado en la apertura de la válvula de entrada (7.2 l/s).

Es importante observar la distribución del caudal a lo largo del recorrido del agua desde el Poyo durante la entrada al Filtro 1, como observamos por la compuerta F1a, ingresa muy poco caudal, sin embargo el agua que entra al filtro aumenta a medida que va circulando por el canal de distribución norte.

Los caudales medidos en los filtros 2 grande y pequeños son muy similares, sin embargo se aprecia que la sumatoria del caudal medido en este punto es mayor que la sumatoria del caudal medido en el Filtro 1.

El comportamiento de los caudales en el Filtro 3 es muy particular, por ejemplo no se dispone de valor en las compuertas de entrada F3b ni F3d, además la sumatoria de los caudales es menor que lo medido en el Filtro 2. Pero curiosamente la sumatoria de los caudales de salida es mayor que los de entrada.

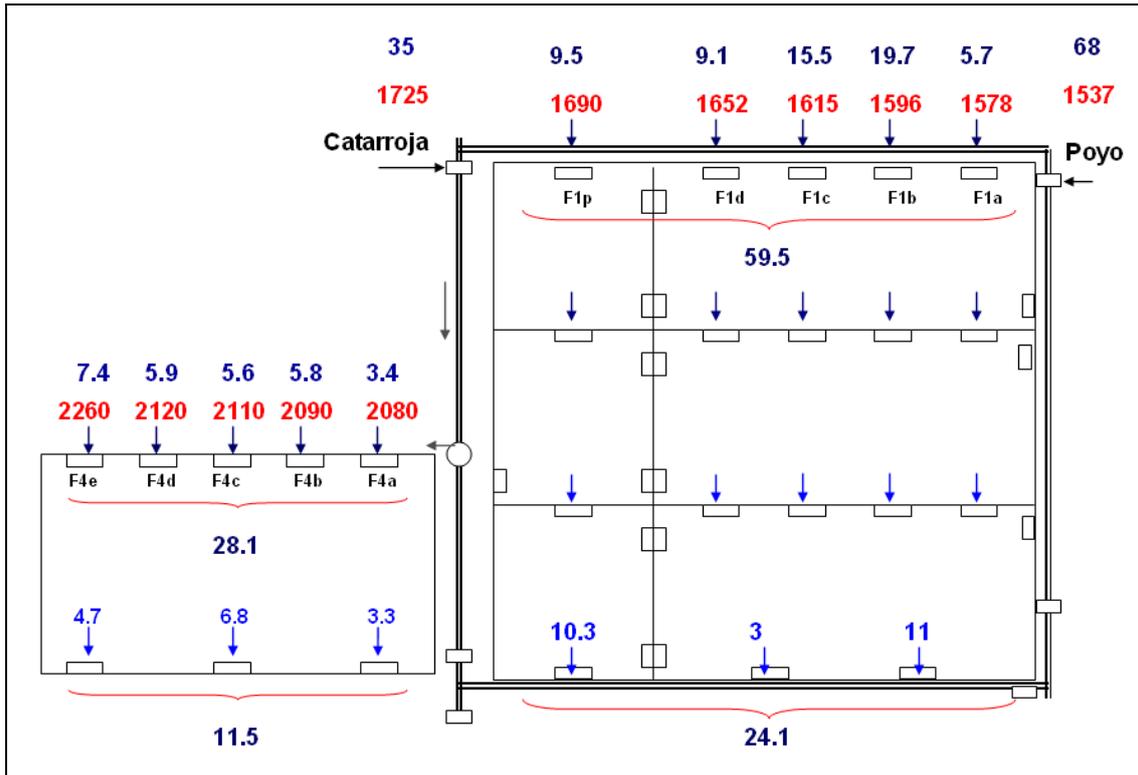
Por otra parte, cabe anotar que en esta fecha aun no estaba ingresando agua desde Catarroja, sin embargo, se midió un caudal considerable en la tubería de entrada al Filtro 4. También se tiene un valor de salida menor que el de entrada.

#### *Caudales y conductividades medidos en los Filtros Verdes.*

En las fechas posteriores, continuaron presentándose las mismas discrepancias comentadas anteriormente, en esas u otras compuertas, es importante subrayar que las estimaciones del caudal de entrada introducen bastante error y que además la vegetación comenzaba a desarrollarse, por lo que se decidió en cuanto se contaba con sistemas de medición de caudal a la entrada y una vegetación más desarrollada, controlar el valor tanto de caudal, como de conductividad y a partir de ello, intentar establecer más concretamente las posibles causas de las diferencias.

#### *Caudales medidos en Enero de 2010.*

En la figura a continuación se presentan en azul los caudales de entrada en (l/s) y en rojo las conductividades ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), medidos en los Filtros Verdes, el día 29 de Enero de 2010.



**Figura 34.** Distribución de caudales compuertas FV, el día 29 de Enero de 2010.

De la figura anterior, podemos concluir, que en promedio los caudales en el sistema se distribuyen de la siguiente manera: del caudal de entrada total proveniente de la Acequia de Catarroja y el Barranco del Poyo, medido en los verteros fue 103 l/s; y el caudal medido a las entradas de los Filtros, mediante los molinetes fue de 87,6 l/s, con cual solo en el recorrido de los vertederos a las entradas ya hay 15,4 l/s, que pueden estarse perdiendo por fugas.

Teniendo claro lo anterior y considerando un caudal de entrada a los Filtros de 87,6 l/s, podemos afirmar que la distribución de aguas en los Filtros se realiza de la siguiente manera: el 67% ingresa al sistema de filtro grandes por el F1, el 11% ingresa al sistema de filtros pequeños por el F1P y el 32% restantes ingresa al filtro cuatro. Lo anterior suma el 85% del caudal total alimentado medido en los vertederos, posiblemente el 15% restante no ha sido contabilizado ya que puede estarse desviando debido a las filtraciones presentadas a través de las motas de separación entre filtros y la anguilera.

Es importante destacar que en las primeras compuertas de los filtros de entrada (F1a y F4a) se registran los menores caudales de entrada comparando respecto a la sumatoria total del caudal medido en las entradas de cada filtro. Esta situación da pie a la formación de zonas muertas dentro de los filtros.

Los valores de caudal registrados en el Filtro 1, son coherentes con los valores de conductividad, lo que permite establecer, que efectivamente hay una mezcla de las aguas en el canal norte, sin embargo en las compuertas más cercanas al Barranco del Poyo, la composición será mayormente agua proveniente del Poyo, de igual manera con Catarroja.

El caudal total de entrada por las acequias medido en los vertederos es de 103 l/s, y al filtro 1 ingresan 59.5 l/s, lo lógico es que el caudal restante (43,5 l/s) ingresara al filtro 4, sin embargo únicamente se midió con los molinetes en la tubería de entrada al filtro 4 un caudal de 36 l/s.

Además de esta discrepancia, se debe analizar que el valor de conductividad registrado en el Barranco del Poyo es de 1537  $\mu\text{s}/\text{cm}$ . y en las compuertas de entrada del F1, se presentan valores superiores que confirman la mezcla de agua en el canal norte.

Otra discrepancia es que el valor de conductividad medida en la acequia de Catarroja es de 1725  $\mu\text{s}/\text{cm}$ ., sin embargo al medir la conductividad en la compuerta F4a, es muy superior 2080  $\mu\text{s}/\text{cm}$ .

Lo anterior se explicaría debido a la influencia de otra masa de agua salobre que pudiese estarse mezclándose en el recorrido del agua desde el canal norte hasta la entrada del Filtro 4.

En la tabla a continuación, se presentan otras fechas en las que se obtuvieron datos de todas las entradas, tanto de los vertederos como de las compuertas de entrada a los Filtros, que permitieron establecer el régimen de distribución de caudales en los Filtros Verdes.

**Tabla 17.** Distribución de los caudales de entrada en los Filtros Verdes.

Fechas	Caudales de entrada (l/s)		Distribución de entrada % (respecto a Filtros)		
	Acequias (vertederos)	Filtros (molinete)	F1	F1p	F4
13/07/2009	51,3	69,3	74,5%	9,5%	15,9%
28/12/2009	111,5	90,4	39,1%	11,1%	49,7%
12/01/2009	95,5	78,3	66,5%	22,8%	10,7%
29/01/2010	103,1	87,6	57,1%	10,8%	32,1%
10/03/2010	95,5	103,0	29,2%	14,3%	56,5%
06/04/2010	74,5	49,7	60,0%	12,7%	27,3%
<b>Promedio</b>	88,6	79,7	54,4%	13,6%	32,0%
<b>Desviación estándar</b>	22,0	18,6	17,1%	4,8%	18,2%

Considerando los resultados de la tabla anterior y los valores medidos el día 29 de enero, se concluye que la distribución del agua por las entradas de los Filtros Verdes, en términos generales se presenta así, por el Filtro 1 grande ingresa el 60%, por el Filtro 1 pequeño ingresa el 10% y por el Filtro 4 ingresa el 30% restante.

## 5.2. Tiempos de residencia teóricos en los filtros verdes

Uno de los parámetros estrictamente necesarios para caracterizar el comportamiento hidráulico o modelar un humedal, es el tiempo de residencia efectivo del humedal.

El tiempo de permanencia nominal es la relación existente entre el volumen de agua del humedal estimado y el caudal circulando a través de este:

$$\tau_n = \frac{V}{Q}$$

**Ecuación 10**

Donde:

- V es volumen de agua en el humedal, en m<sup>3</sup>
- $\tau_n$  es el tiempo de residencia nominal, en d
- Q es el caudal circulante a través del humedal, en m<sup>3</sup>/d

Para calcular el volumen se multiplica el área de cada Filtro Verde por la profundidad media establecida de 0.2 m. En la tabla a continuación se presentan los resultados de dichos cálculos.

**Tabla 18. Dimensiones Filtros Verdes**

	Áreas m <sup>2</sup>	Profundidades medias m	Volúmenes m <sup>3</sup>
<b>F1</b>	13508.8	0.2	2701.8
<b>F2</b>	18240.2	0.2	3648.0
<b>F3</b>	17207.0	0.2	3441.4
		<b>Volumen Filtros Grandes</b>	<b>9791.2</b>
<b>F4</b>	25596.5	0.2	<b>5119.3</b>
<b>F1p</b>	3574.6	0.2	714.9
<b>F2p</b>	5155.2	0.2	1031.0
<b>F3p</b>	5902.5	0.2	1180.5
		<b>Volumen Filtros Pequeños</b>	<b>2926.5</b>
<b>Total</b>	89184.9		27628.2

Para el cálculo del tiempo de residencia teórico en los Sistemas de Filtros Verdes, se ha supuesto un volumen de agua constante, como se describió anteriormente.

La variable más relevante en el cálculo del tiempo de residencia teórico en los Filtros Verdes, es el valor de caudal circulante a través del humedal, se ha realizado el cálculo con los caudales de entrada medidos y los caudales de salida calculados, mediante la resta del caudal de entrada y el agua perdida por evapotranspiración en los Filtros Verdes.

Es de esperar que el tiempo calculado con el caudal de salida, sea menor, que el de entrada, pues considera la influencia de la evapotranspiración, sobre el sistema. En algunas fechas no se registra dato de caudal, debido a que en ese momento el Filtro se encontraba fuera de operación. Los valores resultantes de dicho cálculo se presentan en la Tabla a continuación.

**Tabla 19.** Caudales de entrada y salida en los Filtros Verdes

FECHA	Caudales (m <sup>3</sup> /d)					
	Q entrada F Grandes (1,2 y 3)	Q salida F Grandes (1,2 y 3)	Q entrada F Pequeños (1p, 2p y 3p)	Q salida F Pequeños (1p, 2p y 3p)	Q entrada F4	Q salida F4
06/04/2009	518,4	405,8	236,7	203,1	1320,2	1261,3
21/04/2009	1036,8	845,9	399,2	342,1	1600,1	1500,3
04/05/2009	1209,6	984,4	453,6	386,3	648,9	531,1
18/05/2009	1209,6	994,2			648,9	536,2
01/06/2009			216,0	142,8		
15/06/2009	604,8	350,2	165,0	88,9		
29/06/2009	1296,0	1017,0	468,3	384,9		
13/07/2009	4406,4	4127,4	572,0	488,6	955,6	809,7
27/07/2009	4752,0	4477,8	717,1	635,2	1093,8	950,5
10/08/2009	2592,0	2482,1	708,5	675,6	660,1	602,7
24/08/2009	3024,0	2728,7	826,0	737,7	769,8	615,4
07/09/2009	4320,0	4126,1	1180,2	1122,3	1099,9	998,5
21/09/2009	3024,0	2906,5	826,0	790,9	769,8	708,4
07/10/2009	2592,0	2486,3	708,5	676,9	660,1	604,8
19/10/2009	3024,0	2924,1	826,0	796,1	769,8	717,6
09/11/2009	3024,0	2841,9	938,3	883,9	3825,8	3730,6
16/11/2009			457,1	423,7	1932,8	1874,4
30/11/2009	3888,0	3777,2	1062,7	1029,6	1932,8	1874,8
16/12/2009	3888,0	3824,4	1062,7	1043,7	1932,8	1899,5
28/12/2009			870,0	843,7	3882,8	3836,7
13/01/2010	4492,8	4424,3	1544,8	1524,3		
25/01/2010	4320,0	4290,6	820,8	812,0	2428,7	2413,3
10/02/2010	4320,0	4207,4	1180,2	1146,6	3819,7	3760,9
22/02/2010	4492,8	4404,7	1227,7	1201,4		
10/03/2010	2592,0	2489,2	1276,1	1245,4	4822,2	4768,5
22/03/2010	2592,0	2479,4	708,5	674,8	2292,2	2233,3
06/04/2010	2592,0	2469,6	604,8	568,2	1555,2	1491,2
<b>Promedio</b>	<b>2908,8</b>	<b>2752,7</b>	<b>771,4</b>	<b>725,7</b>	<b>1791,9</b>	<b>1714,5</b>

Teniendo en cuenta que el área de los filtros es constante y asumiendo una altura de lámina de agua también constante de 0.2 m, se ha realizado el calculo del tiempo de residencia teórico, se habla de tiempo de residencia teórico, ya que no es posible calcular el tiempo de residencia efectivo, pues para esto se deberían controlar con exactitud la formación de zonas muertas, caminos preferenciales y todas las situaciones que afecten la circulación del agua dentro del Sistema.

Con los datos anteriores, aplicamos la ecuación 6 y obtenemos los tiempos de residencia teóricos en cada uno de los filtros, los resultados se presentan en la tabla a continuación.

**Tabla 20.** *Tiempos de residencia teóricos (días)*

FECHA	Tiempo de residencia teórico (días)					
	Q entrada F Grandes (1,2 y 3)	Q salida F Grandes (1,2 y 3)	Q entrada F Pequeños (1p, 2p y 3p)	Q salida F Pequeños (1p, 2p y 3p)	Q entrada F4	Q salida F4
06/04/2009	18,9	24,1	12,4	14,4	3,9	4,1
21/04/2009	9,4	11,6	7,3	8,6	3,2	3,4
04/05/2009	8,1	9,9	6,5	7,6	7,9	9,6
18/05/2009	8,1	9,8			7,9	9,5
01/06/2009			13,5	20,5		
15/06/2009	16,2	28,0	17,7	32,9		
29/06/2009	7,6	9,6	6,2	7,6		
13/07/2009	2,2	2,4	5,1	6,0	5,4	6,3
27/07/2009	2,1	2,2	4,1	4,6	4,7	5,4
10/08/2009	3,8	3,9	4,1	4,3	7,8	8,5
24/08/2009	3,2	3,6	3,5	4,0	6,6	8,3
07/09/2009	2,3	2,4	2,5	2,6	4,7	5,1
21/09/2009	3,2	3,4	3,5	3,7	6,6	7,2
07/10/2009	3,8	3,9	4,1	4,3	7,8	8,5
19/10/2009	3,2	3,3	3,5	3,7	6,6	7,1
09/11/2009	3,2	3,4	3,1	3,3	1,3	1,4
16/11/2009			6,4	6,9	2,6	2,7
30/11/2009	2,5	2,6	2,8	2,8	2,6	2,7
16/12/2009	2,5	2,6	2,8	2,8	2,6	2,7
28/12/2009			3,4	3,5	1,3	1,3
13/01/2010	2,2	2,2	1,9	1,9		
25/01/2010	2,3	2,3	3,6	3,6	2,1	2,1
10/02/2010	2,3	2,3	2,5	2,6	1,3	1,4
22/02/2010	2,2	2,2	2,4	2,4		
10/03/2010	3,8	3,9	2,3	2,3	1,1	1,1
22/03/2010	3,8	3,9	4,1	4,3	2,2	2,3
06/04/2010	3,8	4,0	4,8	5,2	3,3	3,4
Promedio	5,0	6,2	5,2	6,4	4,3	4,7

En la gráficas siguientes podemos observar los tiempos de residencia, calculados con los caudales de entrada medidos, presentados en los sistemas Filtros Grandes, Filtros Pequeños y Filtro Cuatro, las diferencias se deben a los que los caudales de entrada presentaron múltiples fluctuaciones, durante la puesta en marcha del sistema.

Sin embargo, hacia finales del mes de julio y en adelante, se comienzan a tener valores mucho más homogéneos.

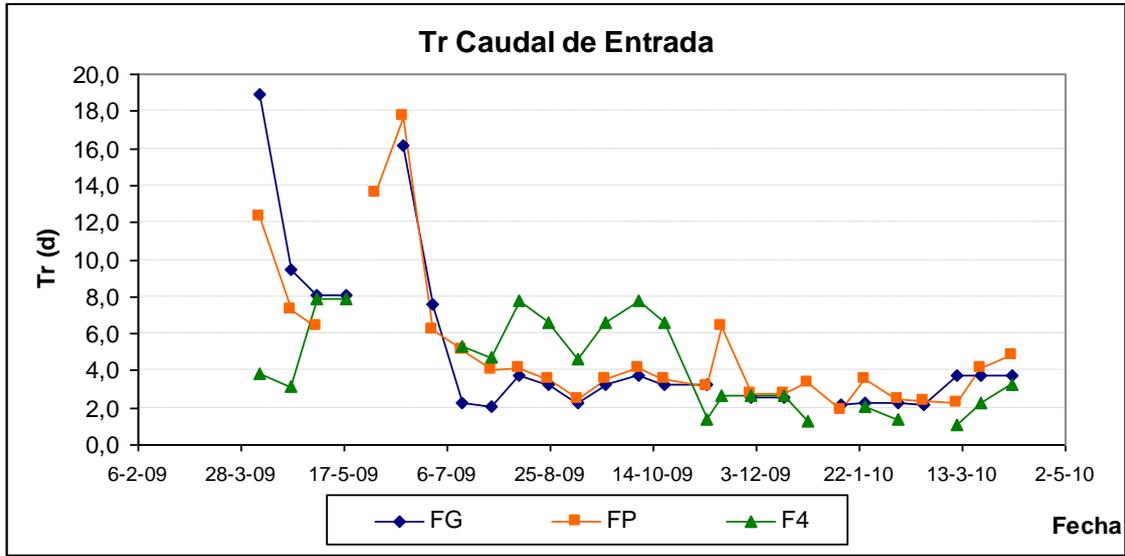


Figura 35. Tiempos de Residencia, con caudales de entrada.

En la gráfica siguiente podemos observar los tiempos de residencia, calculados con los caudales de salida, presentados en los sistemas Filtros Grandes, Filtros Pequeños y Filtro Cuatro.

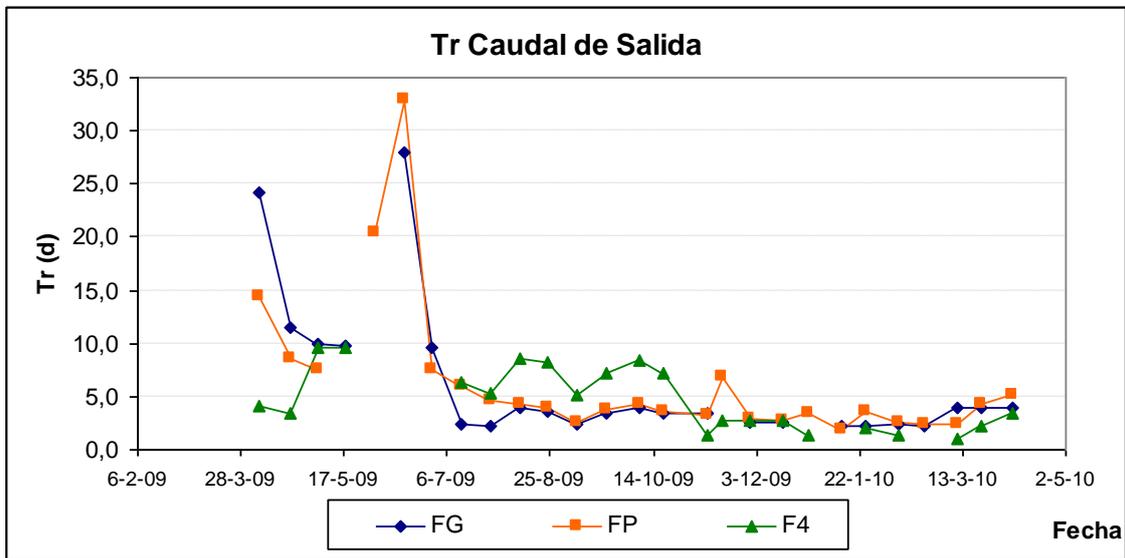


Figura 36. Tiempos de Residencia, con caudales de salida.

Como se comentó anteriormente, se aprecian dos periodos distintos, en especial para los Sistemas de Filtros Grandes y Pequeños, inicialmente el periodo de puesta en marcha del Sistema de Filtros Verdes, comprendido entre los meses de Abril a Junio y posteriormente se observan valores más constantes en el periodo de estabilización observado a partir del mes de Julio de 2010.

En la siguiente tabla se presentan los valores promedios obtenidos.

**Tabla 21.** *Tiempos de residencia teóricos Filtros Grandes y Pequeños.*

Tiempos de residencia teóricos				
	Q entrada	Q salida	Q entrada	Q salida
FECHA	F Grandes (1,2 y 3)	F Grandes (1,2 y 3)	F. Pequeños (1p, 2p y 3p)	F Pequeños (1p, 2p y 3p)
06/04/09 a 29/06/09	11,4	15,5	10,6	15,3
13/07/09 a 06/04/10	3,4	3,7	3,9	4,3

En resumen, los tiempos de residencia manejados entre los meses de Febrero a Junio de 2009 presentaron valores muy heterogéneos, ya que durante este tiempo se realizaron varios ajustes y obras complementarias, como es común en este tipo de sistemas.

Observando los tiempos de residencia teóricos calculados, para los Filtros Verdes en condiciones un poco más estables, podemos afirmar que bajo la hipótesis de que toda la superficie de los Filtros Verdes fuera útil, se tendría un tiempo de residencia promedio para caudal de entrada promedio de 3.6 d y calculado para caudales de salida (considerando la evapotranspiración) de 4.0 d, lo anterior es lógico ya que al restar el valor del agua evapotranspirada, se obtiene un caudal menor, por lo tanto aumentan los tiempos de residencia calculados.

En el caso del Filtro Cuatro, también se observaron dos periodos, pero se consideraron otras fechas, hay que tener en cuenta que en este Filtro hubo inconvenientes con el desarrollo de la vegetación, que obligó a resembrarlo, además se realizaron obras que obligaron a sacarlo de operación en varias ocasiones, esto influyó mucho en la disparidad de valores obtenidos para dicho Filtro. En la tabla a continuación se observan los valores de tiempo de residencia teórico calculados para el Filtro Cuatro.

**Tabla 22.** *Tiempos de residencia en el Filtro Cuatro*

FECHA	Tiempo de residencia teórico (días)	
	Q entrada	Q salida
	F4	F4
06/04/09 a 19/10/09	6,1	6,9
09/11/2009 a 06/04/10	2,4	2,6

Observando los tiempos de residencia teóricos calculados, para el Filtro Cuatro, en condiciones un poco más estables, podemos afirmar que bajo la hipótesis de que toda la superficie fuera útil, se tendría un tiempo de residencia promedio para caudal de entrada promedio de 2.4 d.

Con el fin de estudiar de forma más adecuada la influencia de los calados y por lo tanto el volumen de agua presente en el Sistema de Filtros Verdes, se desarrollará y aplicará el modelo de calidad de aguas, con base en la conductividad.

## 6. BALANCE HIDRICO

Considerando la expresión general del balance hídrico de un humedal artificial (Ecuación 1.) se procede a continuación a realizar el análisis de cada una de las variables que integran el balance hídrico y su relevancia en el balance hídrico del sistema en estudio.

$$\frac{dV_A}{dt} = Q_{\text{entrada}} + Q_{\text{escorrentía}} + Q_{\text{deshielo}} - Q_{\text{bermas}} - Q_{\text{salida}} + (P + ET + I) * A_{\text{humedal}}$$

**Ecuación 11**

Para el caso que nos ocupa, se define por un lado como unidad de longitud el metro (m) y por otro lado, elegimos como escala temporal una unidad mensual. Esto último se debe a que un balance hídrico anual no nos proporcionaría información útil, ya que puede pasar por alto importantes fluctuaciones estacionales de agua, como son los periodos de altas precipitaciones de invierno o el alta tasa de evapotranspiración en verano.

No obstante, un balance mensual, no permite apreciar la influencia de eventos puntuales, como es el caso de un episodio de lluvia torrencial, ó, un vertido contaminante por lo tanto se ha optado por realizar, también un balance hídrico a escala semanal.

Como se observa en la ecuación anterior unas de las variables más relevantes para llevar a cabo este estudio, son las variables meteorológicas tales como la precipitación y la evapotranspiración, para lo cual se ha recopilado información diaria del Sistema de Información Agroclimática para el Regadío, de la Comunidad Valenciana, procedente de la estación agroclimática de Picassent durante todo el periodo de estudio.

Adicionalmente de lo anterior, se cuenta con información meteorológica medida en el Tancat de la Pipa, sin embargo esta solo se tiene para el periodo de Junio de 2009 a Noviembre de 2009, lo cual también dificulta su utilización. La información se ha comparado con la registrada en la estación de Picassent, los resultados de esta comparación se presentan en el Anejo III, no se presentan diferencias considerables entre los datos registrados en estas dos estaciones, por lo tanto para la realización del presente balance hídrico se utilizará la información meteorológica registrada en la estación agroclimática de Picassent.

A continuación se describen las fuentes de información disponibles en el sistema y las consideraciones necesarias para la realización del balance hídrico.

- Como se ha dicho anteriormente el agua a tratar en los Filtros Verdes, procede por un lado del Barranco del Poyo y por otro lado del Puerto de Catarroja y los valores de caudales disponibles se han medido semanalmente en los vertederos de las arquetas de entrada.
- Debido a que no se dispone de un sistema de medición de caudales a la salida de los Filtros Verdes, se tomará como dato de los mismos, los valores registrados del bombeo desde la salida del Tancat al Lago de Albufera. Lo anterior nos obliga a considerar, todos los cuerpos de agua que aportan caudal a este bombeo, como son el Ullal, las Lagunas de Reserva y Educativa y los Canales. En consecuencia, hay que incluir los valores de entrada de agua a estos sistemas.
- Por tanto, las entradas de precipitación en el sistema resultan de calcular la precipitación directa (P) sobre la superficie de los Filtros Verdes, Ullal, las Lagunas de Reserva y Educativa y los Canales. Del mismo modo, se calculan las salidas por evapotranspiración.
- Para la recopilación de la información meteorológica, Precipitación (P) y Evapotranspiración (ET), se han tomado los valores diarios reportados por la Estación Agroclimática de Picassent del Sistema de Información Agroclimática para el Regadío, que presenta los datos meteorológicos y la evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>), calculada mediante el método de Penman-Monteith, de los últimos diez días y de pluviometría de la última semana natural.
- Como se ha dicho anteriormente en el Tancat de la Pipa se cuentan con algunos equipos para medición de datos meteorológicos, los cuales se han comparado con los registrados en la estación Agroclimática de Picassent, y no presentan diferencias considerables, por tal motivo se utilizarán los datos de la estación de Picassent de la cual se tenía mayor cantidad de datos.
- La evapotranspiración de referencia ET<sub>o</sub>, se utiliza para el cálculo del volumen de agua perdida por evapotranspiración desde las áreas del sistema no cultivadas (Ullal, las Lagunas de Reserva y Educativa y los Canales). Ya que los Filtros Verdes son áreas cultivadas, entonces se utiliza el valor de ET<sub>o</sub>, para el cálculo de la evapotranspiración del cultivo ET<sub>c</sub> y así obtener el volumen de agua perdida por evapotranspiración de los Filtros.
- Se considera que aproximadamente el 90% de la vegetación cultivada en los Filtros Verdes es Enea, con lo cual se calcula la ET<sub>c</sub>, para esta especie.
- Teniendo en cuenta que los suelos del Tancat de la Pipa son suelos ricos en arcilla y limos, materiales que tienden a compactarse restringiendo de esta manera la circulación del aire y el agua, la consideración anterior se utiliza como criterio, para suponer infiltración nula en el sistema de Filtros Verdes, con lo cual el balance hídrico se limita a el análisis de las aguas superficiales presentes en el sistema.
- El Tancat de la Pipa, posee un clima mediterráneo subtropical, dado que las temperaturas medias de las máximas se encuentran entre los 10 - 21 °C

y las temperaturas medias de las mínimas del mes más cálido superan los 20°C. En estas condiciones no se presentarán heladas, con lo cual el caudal de deshielo se desprecia en el balance.

Considerando lo anterior y realizando las simplificaciones correspondientes, la ecuación general del balance hídrico del sistema, tomando como paso de tiempo 1 día, será:

$$V_A = V_{entrada} + P * (A_{Ullal} + A_{L.Re s.} + A_{L.Edu.} + A_{Canales} + A_{F.V.}) - V_{salida} - ETO * (A_{Ullal} + A_{L.Re s.} + A_{L.Edu.} + A_{Canales}) - ETC * A_{F.V}$$

**Ecuación 12**

Donde:

- $V_A$  = Volumen de agua almacenada en el humedal. (m<sup>3</sup>).
- $V_{entrada}$  = El volumen entrante de agua en (m<sup>3</sup>), proveniente del Barranco del Poyo, Puerto de Catarroja y Ullal.
- $V_{salida}$  = El volumen saliente de agua en (m<sup>3</sup>), por bombeo al Lago de La Albufera.
- $P$  = Precipitación total en (mm.), registrada en la estación agroclimática de Picassent.
- $ETo$  = Evapotranspiración de referencia en (mm.), registrada en la estación agroclimática de Picassent.
- $ETc$  = Evapotranspiración del cultivo, calculada para los Filtros Verdes, en (mm.).

La evapotranspiración potencial es la evapotranspiración que puede ocurrir desde una superficie bien cubierta por vegetación cuando el suministro de humedad es ilimitado, y se calcula de una forma similar a la que se aplica para la evaporación sobre una superficie abierta de agua.

Cuando el suelo tiene una cubierta vegetal, y aunque esta no lo cubra en su totalidad, los intercambios por evapotranspiración son muy superiores a los de evaporación directa que es la que se tendría en ausencia de vegetación. Esto se debe a que por un lado la superficie que proporciona la vegetación es superior a la que proporcionaría un suelo desnudo y por otro lado la vegetación actúa como una especie de bomba de succión, transportando agua desde la zona radicular hacia la atmósfera.

Para el cálculo de la evapotranspiración en el balance hídrico del sistema, se consideran las características de cada uno de los cuerpos de agua que lo componen.

Para esto se consideran los Filtros Verdes como superficies cultivadas y como no cultivadas se consideran el Ullal, las Lagunas de Reserva y Educativa y los Canales.

En el caso de las superficies no cultivadas, la demanda de agua por evapotranspiración se calcula mediante la siguiente expresión:

$$V_{ET_o} = ET_o * Superficie$$

**Ecuación 13**

Donde:

$V_{ET_o}$  = Volumen de agua evapotranspirada en superficie no cultivada, (m<sup>3</sup>)

$ET_o$  = Evapotranspiración de referencia, (l/m<sup>2</sup>)

Superficie = Superficie correspondiente al cuerpo de agua, (m<sup>2</sup>)

Para calcular la demanda por evapotranspiración en las superficies de los filtros verdes se ha analizado la evolución del cultivo en cada una de las celdas. Esto, debido a que el valor del coeficiente de cultivo (Kc), varía principalmente en función de las características particulares del cultivo., por lo tanto, para establecer el valor del Kc, se ha tenido las siguientes consideraciones.

Los Filtros 1 y 2 (grande y pequeño), fueron sembrados en enero de 2009.

El día 9 de Noviembre de 2009, se realizó el corte de la vegetación (siega) del Filtro 1 y desde esta fecha el cultivo ha tenido poco desarrollo, pues ha coincidido con la época invernal, además de la gran población de aves que se encuentran en el Tancat. Sin embargo se espera que en la primavera el desarrollo de los cultivos mejore.

Por lo tanto para el Filtro 1 desde enero hasta el 8 de noviembre de 2009, el valor de Kc es el correspondiente a un cultivo anual y en adelante se supondrá el valor de  $ET_o$ . Ya que en condiciones de poca cobertura e inundación del terreno, la evaporación del suelo es significativa y el valor de Kc será la unidad.

El Filtro 2 no se ha segado, por lo cual ha ganado una densidad considerable de vegetación, presentando un estado de senescencia, asociado a una conductancia menos eficiente de los estomas debidos a los efectos del envejecimiento. Por tal motivo a partir del día 31 de diciembre de 2009 se considera para efectos de cálculo que el Kc tendrá un valor de 0.6, el menor valor en la curva del coeficiente del cultivo.

En los filtros 3 y 4 se sembró inicialmente una menor densidad de vegetación, durante el mes de Junio, sin embargo la evolución de este cultivo no fue la esperada, por lo que se replantaron durante el mes de julio. Por lo anterior, desde el 1 de Enero hasta el 31 de Mayo de 2009 se considera como una superficie cubierta de agua, y luego del 1 de Junio se considera un valor medio de Kc para efectos del cálculo.

En los filtros verdes, se debe calcular la evapotranspiración del cultivo, analizando la evolución del mismo y realizando el procedimiento siguiente:

De la Tabla 3, se consideran los valores de la duración de las etapas de desarrollo del cultivo, para humedales cultivados en climas sin heladas, como es el caso.

**Tabla 23.** Valores de la duración del cultivo de Enea en los Filtros Verdes. Extracto

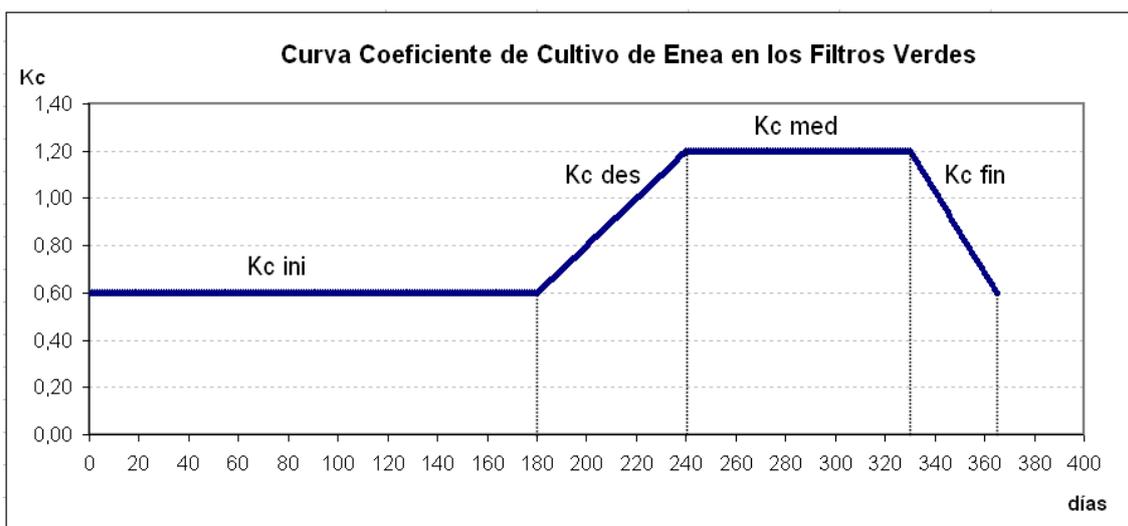
Cultivo	Inic. (L <sub>ini</sub> )	Des. (L <sub>des</sub> )	Med. (L <sub>med</sub> )	Final (L <sub>fin</sub> )	Total	Fecha de Siembra	Región
Humedales (veg. baja)	180	60	90	35	365	Noviembre	Climas sin heladas

- De la Tabla 2, se seleccionan los valores correspondientes de Kc; para el cultivo de Enea, en climas sin heladas A continuación se presentan los valores utilizados:

**Tabla 24.** Valores de Kc para el cultivo de Enea en los Filtros Verdes. Extracto Tabla 2.

Cultivo	Kc ini <sup>1</sup>	Kc med	Kc fin	Altura Máx. Cultivo (h) (m)
Enea, Junco, sin heladas	0.60	1.20	0.60	2

- Con los datos anteriores se construye la curva del coeficiente del cultivo, Gráfica1, cabe destacar que la curva permite determinar el valor de Kc para cualquier día durante el período de desarrollo del cultivo.



**Figura 37.** Curva coeficiente de cultivo Kc, para los Filtros Verdes del Tancat de la Pipa.

- Con los valores de Kc, diarios obtenidos a partir de la curva anterior, se calcula el valor de ET<sub>c</sub> en los Filtros Verdes, siguiendo la ecuación:

$$ET_c = K_c * ET_o$$

**Ecuación 14**

Donde:

- ET<sub>o</sub> = Evapotranspiración de referencia en (mm), registrada en la estación agroclimática de Picassent.
- Kc = Coeficiente único del cultivo.

## 6.1. Balance Hídrico Mensual

La fecha desde la cual se realizó el balance hídrico, fue definida por la disponibilidad de todos los datos que componen el mismo. Debido a la inexistencia de sistemas de aforo en las entradas desde el inicio de la puesta en operación del sistema, obligo a realizar el balance desde el mes de junio, cuando se instaló la Arqueta del Barranco del Poyo y desde el 13 de Julio por la Arqueta del Puerto de Catarroja. Por lo tanto los balances se presentan desde el mes de Junio de 2009 a Mayo de 2010.

### 6.1.1. Entradas Mensuales

Los volúmenes de agua de entrada mensuales registrados para los diez meses comentados anteriormente se presentan en la tabla siguiente.

**Tabla 25.** Volúmenes de entrada de agua mensual al sistema.

	Mes	Barranco del Poyo	Puerto de Catarroja	Ullal	Subtotal Entradas	Precipitación	Total	Acumulado
		m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>
Jun	1	75271	8919	9751	93941	821	94762	94762
Jul	2	136565	58468	11500	206533	18771	225304	320066
Ago	3	82850	89487	9949	182286	5684	187970	508035
Sep	4	89963	93879	10117	193960	72640	266600	774635
Oct	5	125336	101731	14265	241331	53936	295267	1069902
Nov	6	124010	94292	10886	229189	672	229860	1299763
Dic	7	145320	118694	13910	277925	35303	313228	1612991
Ene	8	143577	104544	11128	259249	33512	292761	1905752
Feb	9	115213	99339	11128	225680	17241	242921	2148673
Mar	10	23585	113805	13513	150903	23585	174488	2323162
Abr	11	76363	93077	11128	180568	20898	201467	2524628
Mayo	12	86526	81333	12718	180577	18211	198789	2723417
				<b>Suma</b>	2422142	301274	2723417	17305786

De la tabla anterior, se observa para el mes de Junio el menor valor de entrada, por las acequias con 93992 m<sup>3</sup> del cual el 80% del caudal registrado provenía del Poyo y el 20% restante de Catarroja y el Ullal; al igual que un bajo aporte por precipitaciones.

En la figura a continuación se aprecian claramente las diferencias de volúmenes de entrada, la línea naranja representa el agua entrante por las acequias que representan el 89% y las columnas azules representan las precipitaciones en valor medio el 11% restante.

El caudal de entrada por las acequias se ha incrementado gradualmente hasta alcanzar un valor máximo en el mes de Diciembre con 313140 m<sup>3</sup> del cual el 55% procedente del Poyo, 40% de Catarroja y el 5% restante del Ullal.

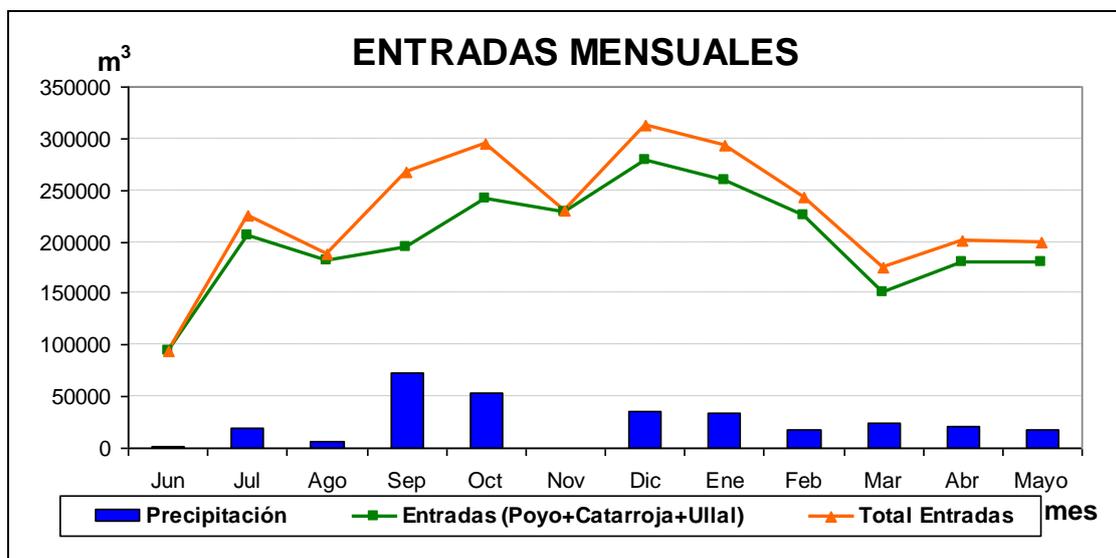


Figura 38. Volúmenes de entrada de agua mensual al sistema.

### 6.1.2. Salidas Mensuales

Como se comentó anteriormente, no se dispone de datos continuos en la salida de los Filtros Verdes, por lo tanto se considera para la salida; la demanda de agua hacia la atmósfera por evapotranspiración y los bombeos realizados desde el Tancat hacia el lago de La Albufera.

Tabla 26. Volúmenes de salida de agua mensual al sistema.

	Mes	ET	Bombeos	Total	Acumulado
		m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>
Jun	1	58605	31650	90255	90255
Jul	2	68290	39685	107975	198230
Ago	3	51102	139235	190337	388568
Sep	4	34676	233845	268521	657089
Oct	5	29711	282528	312239	969328
Nov	6	22898	413995	436893	1406221
Dic	7	18193	433560	451753	1857974
Ene	8	13501	318695	332196	2190171
Feb	9	16930	377820	394750	2584921
Mar	10	24343	232260	256603	2841524
Abr	11	27971	233310	261281	3102805
Mayo	12	43183	178475	221658	3324463
		<b>Suma</b>	2915058	3324461	19611549

De lo anterior cabe destacar que los bombeos corresponden al 88% del valor total de las salidas del sistema y la evapotranspiración al 12% restante. Sin embargo estos valores no son comparables debido a la dinámica de las variables climatológicas que afectan el sistema.

En la gráfica a continuación, se muestra en la línea verde los bombeos realizados, apreciando su aumento gradual, lo que es consecuente con el valor de las entradas antes analizadas. Las columnas representan el volumen de agua perdido por evapotranspiración.

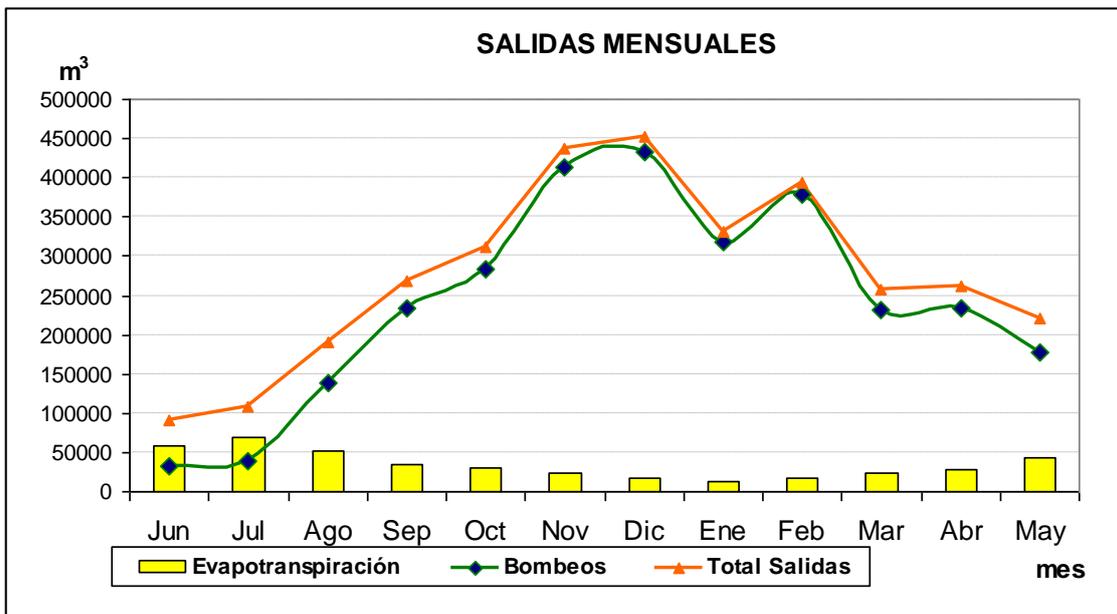


Figura 39. Volúmenes de salida de agua mensual al sistema.

### 6.1.3. Análisis del balance hídrico mensual.

En la gráfica siguiente se presenta en las columnas naranjas el valor total mensual de las entradas y en las columnas azules el valor total mensual de las salidas.

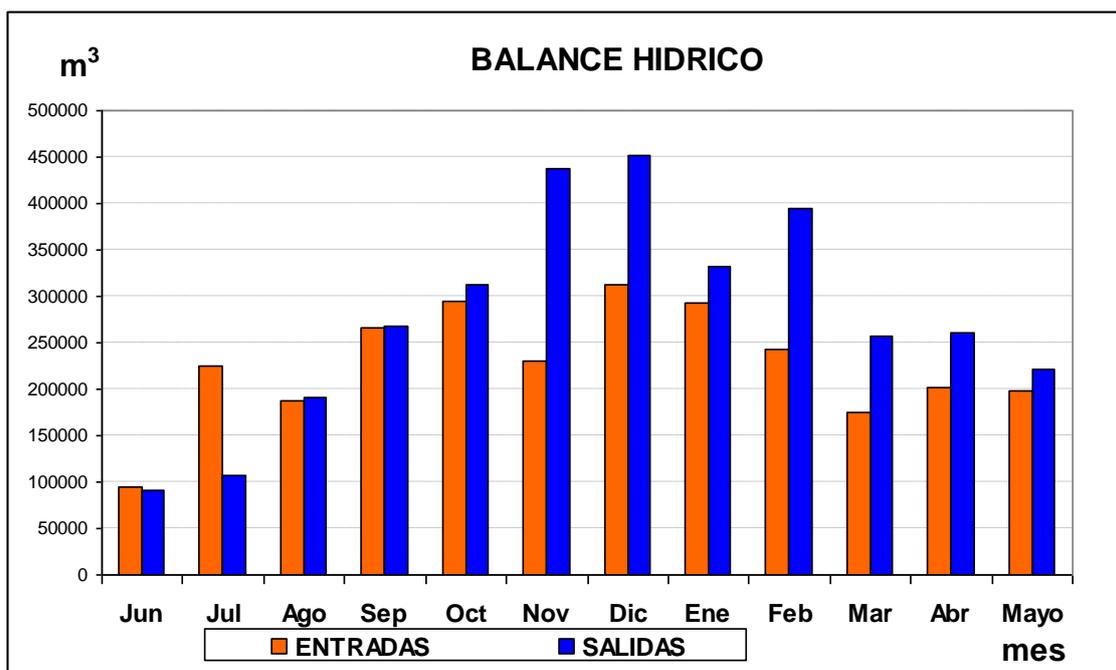


Figura 40. Comparativo entradas y salidas de agua mensual del sistema.

Se observan los valores más bajos tanto de entradas como de salidas, en el mes de junio, pues, a pesar que el sistema entró en operación oficialmente el mes de enero de 2009, aun en el mes de junio se continuaban realizando obras, como por ejemplo la instalación de la sonda de calidad de agua en la arqueta del Poyo, por lo cual la válvula de entrada por esta acequia permaneció cerrada una semana.

En el mes de julio se aumentó considerablemente el caudal de entrada, pues se abrió el paso por Catarroja con un valor de caudal medio de 30 l/s, además se obtiene un caudal medio de entrada por el Poyo de 48 l/s.

Desde mayo el nivel del Lago comenzó a disminuir, presentado un mínimo valor en agosto y aunque las válvulas de entrada del Poyo permanecían abiertas completamente, no se alcanzaba el caudal de entrada deseado al sistema de 80 l/s.

Las precipitaciones alcanzaron su mayor valor en el mes de septiembre, en el cual se aprecia constante el volumen de agua almacenada en el sistema, pues las entradas fueron iguales a las salidas.

En el mes de octubre, continuó el aumento progresivo del caudal de entrada, y el caudal bombeado consecuentemente; por otra parte, tanto las entradas por precipitaciones, como las demandas por evapotranspiración decaen ligeramente.

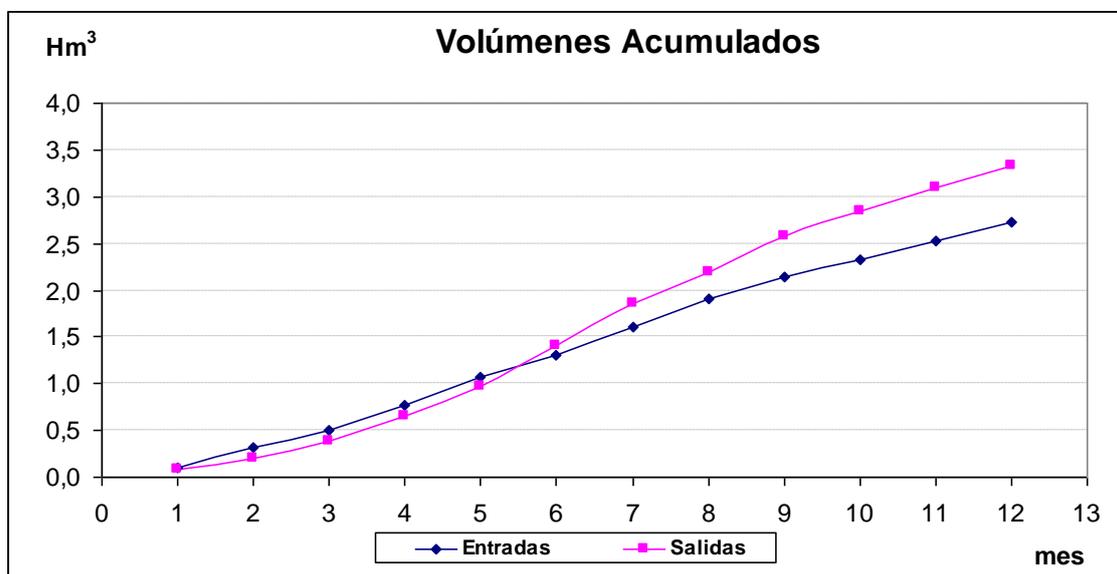
En septiembre se baja el caudal de entrada, debido a que durante la segunda semana disminuye el nivel de agua en la arqueta de Catarroja y la entrada por el Ullal estuvo cerrada un par de semanas. Además se registra en este mes el menor valor por aporte de precipitaciones.

Por otra parte, en el mes de septiembre se incrementa el caudal bombeado al lago, presentando para ese mes la mayor diferencia de entradas y salidas.

Se aumenta el caudal de entrada por el Poyo para el mes de diciembre, alcanzando un valor medio de 68 l/s y por Catarroja se ingresan aproximadamente 43 l/s, obteniendo un caudal de entrada de 111 l/s. En consecuencia se mantiene el aumento en los bombeos de salida.

En enero disminuye el caudal entrante por el Poyo, a un valor medio de 43 l/s; lo anterior se ve reflejando en el descenso de las columnas en ese mes.

Para observar más claramente el balance hídrico, se presenta en la gráfica a continuación, el valor en acumulados mensuales, de los volúmenes de agua ( $\text{Hm}^3$ ). La línea azul representa el volumen acumulado en las entradas y la línea rosa el de las salidas.



**Figura 41.** Comparativo de volúmenes acumulados de entradas y salidas de agua mensual del sistema.

Desde el mes de Junio al mes de Septiembre de 2009, se mantuvo relativamente constante el valor de entradas y salidas, presentando una intersección en el mes de septiembre, punto en el cual se registro un volumen acumulado de aproximadamente  $1.1 \text{ Hm}^3$ .

Sin embargo, en la gráfica anterior se observa como el volumen de salidas de agua del sistema se ha incrementado progresivamente más que las entradas, en promedio mensual desde Octubre a Enero superó en un 1%, y ha aumentado de Febrero a Abril en un 5%, lo cual corresponde a un total de  $284644 \text{ m}^3$ .

En la gráfica anterior se observan valores más altos de salida de agua que de entrada, debe tenerse en cuenta que el Sistema de Filtros verdes del Tancat de la Pipa, se construyó de tal manera que se afectase mínimamente al medio natural, debido a lo anterior no se realizó ningún tipo de impermeabilización del terreno.

Sin embargo en el periodo de construcción del Sistema de Filtros Verdes hubo que turbinar bastante agua debido a filtraciones.

En la campaña de muestreos se detectaron en varias ocasiones filtraciones:

- Entre los canales perimetrales y los filtros.
- Entre la anguilera y los filtros.
- Incluso se detectó una filtración considerable del canal perimetral norte hacia la anguilera
- Desde el lago de La Albufera hacia los Filtros Verdes.

Las situaciones anteriores se apreciaron en días correspondientes a los muestreos, seguramente en los días que no se llevaron a cabo los muestreos también se presentaron dichas eventualidades.

No se tiene ningún registro del caudal que pudo ingresar al sistema debido a las filtraciones, anteriormente comentadas; se supone que la diferencia de entradas y salidas puede deberse a este hecho.

## 6.2. Balance Hídrico Semanal

El balance hídrico semanal, permite analizar los eventos puntuales y su relevancia en la operación del sistema. Los valores registrados en (m<sup>3</sup>/semana), corresponden al periodo comprendido desde el mes de junio de 2009 a mayo de 2010, en un total de 52 semanas.

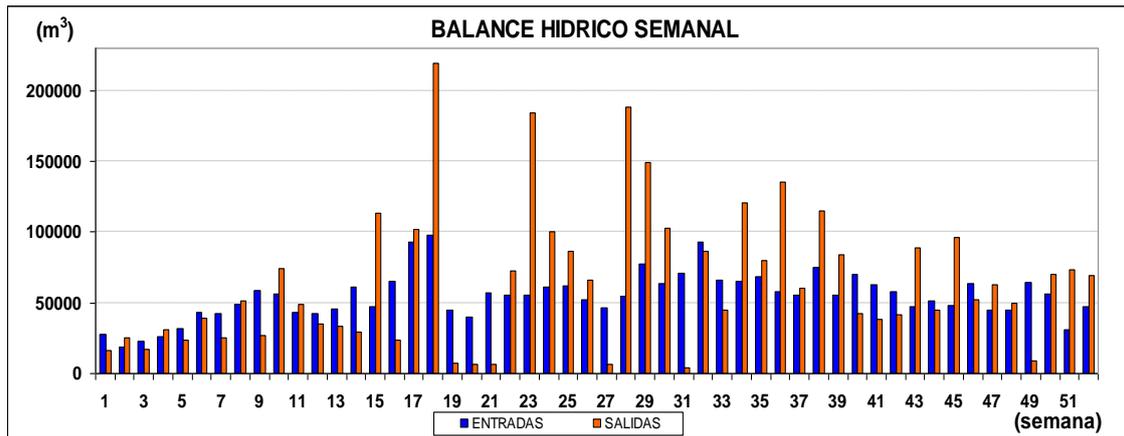


Figura 42. Comparativo entradas y salidas de agua semanal del sistema.

### 6.2.1. Entradas Semanales

En la gráfica siguiente se presentan los valores acumulados semanales de las entradas al sistema.

La línea verde representa el volumen de entrada por el Barranco del Poyo, el Puerto de Catarroja y el Ullal. La línea naranja representa la sumatoria entre los volúmenes anteriormente descritos y el volumen aportado por las precipitaciones.

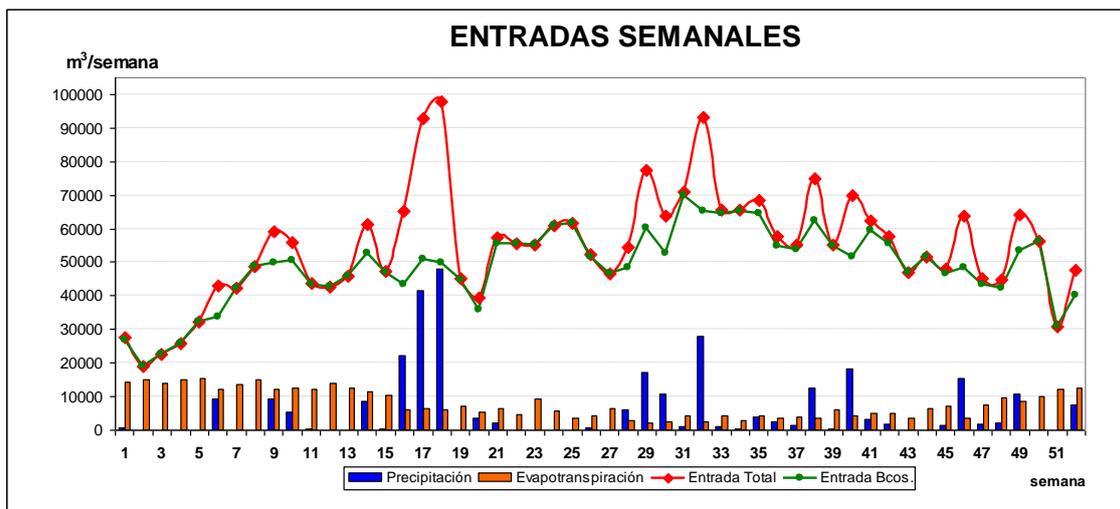


Figura 43. Volúmenes acumulados de entradas de agua semanales al sistema.

Como se observa en la grafica anterior, los aportes debidos a la precipitación registran los valores más altos las semanas 17 y 18, el día lunes 28 de Septiembre (semana 18) se registró la mayor precipitación de 126 mm, que casi duplica el valor del volumen de agua de entrada por los barrancos  $48553 \text{ m}^3$ .

Los volúmenes de agua ingresados por los barrancos se incrementan gradualmente desde los  $18942 \text{ m}^3$  registrado la segunda semana de junio, hasta los  $70191 \text{ m}^3$  en la primera semana de enero. Presentando un incremento mensual promedio de  $18942 \text{ m}^3$ .

### 6.2.2. Salidas Semanales

La gráfica a continuación representa en la línea azul los volúmenes de salida total bombeados con la turbina y las bombas hacia el lago de la Albufera, y las columnas granate representan las perdidas por evapotranspiración.

Las extracciones inicialmente (entre junio y agosto), se realizaron bombeando dos a tres horas por día, tres días a la semana.

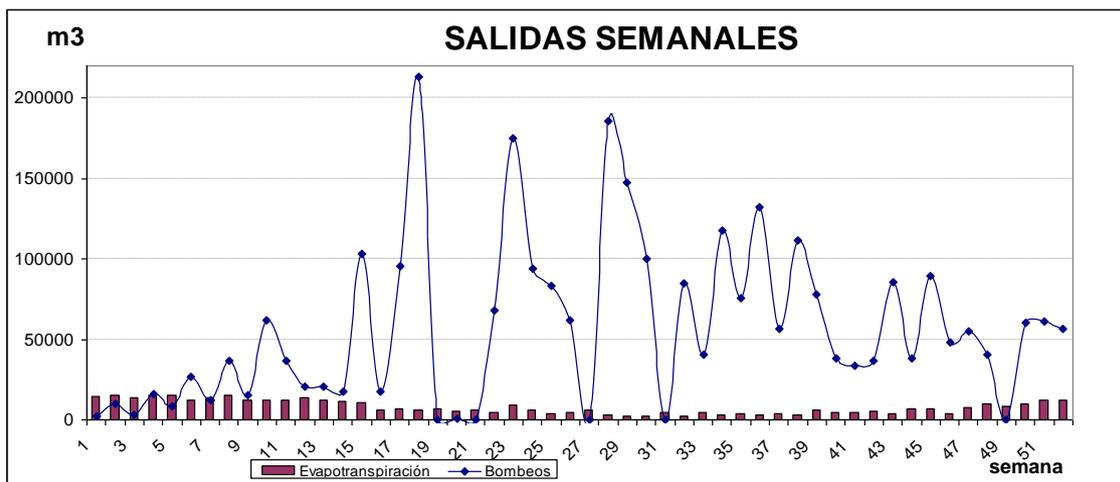


Figura 44. Volúmenes acumulados de salidas de agua semanales del sistema.

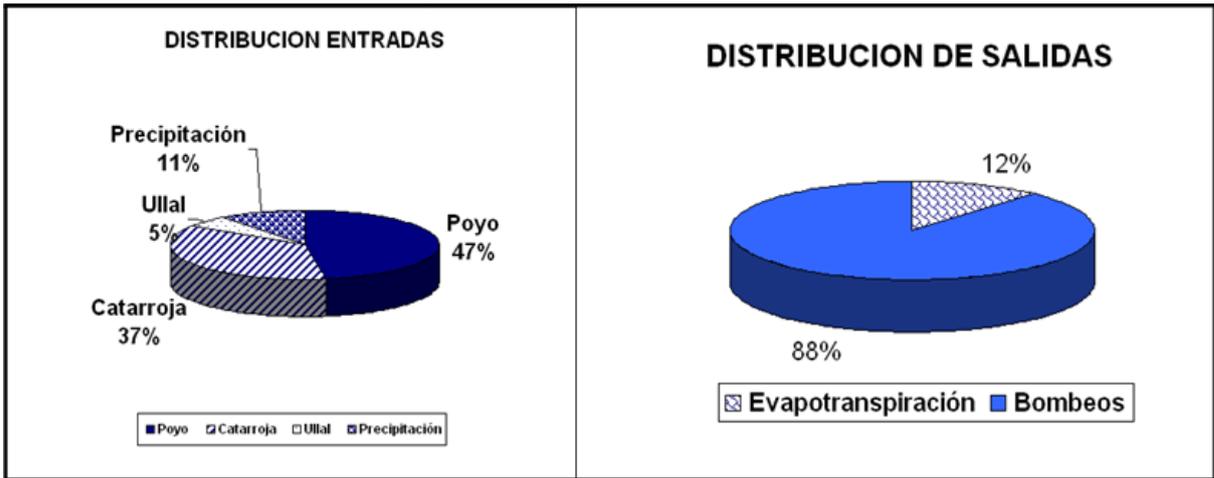
En la gráfica anterior, se destacan la disparidad los caudales de agua bombeada desde el sistema al lago, dichos bombeos se realizan a voluntad, teniendo en cuenta básicamente las precipitaciones, los niveles deseados en los filtros y el nivel de lámina de agua en el lago de L` Albufera.

Por ejemplo, la semana 18 de la abscisa, que corresponde al 28 de Septiembre de 2010, el 50% del agua ingresada al sistema se debe a la precipitación registrada; por otra parte el 97% del agua eliminada del sistema se debe a los bombeos. Sin embargo cabe resaltar que en dicha semana se bombeo más del doble de agua ingresada al sistema.

En vista de la disparidad de los bombeos, a partir de la semana 32, por los primeros días del mes de Enero, como propuesta de mejora se instalaron tabloneros en las lagunas, con el fin de controlar el nivel de agua en las mismas y realizar bombeos más constantes.

### 6.2.3. Análisis del balance hídrico semanal.

En términos generales se aprecia, que el volumen de agua eliminada del sistema es mayor que el registrado en las entradas. Lo que puede deberse a las filtraciones presentes en los Filtros y sobre las cuales no se tiene ningún control y mucho menos datos exactos del caudal que puede estar entrando o saliendo debido a esta situación.



**Figura 45.** Distribución de caudales del Tancat de la Pipa

Como se observa en la figura anterior, el Balance Hídrico nos permite concluir que del volumen total de agua ingresado al sistema, el 89% ingresó por las Acequias de Poyo, Catarroja y Ullal; el 11% ingresó por Precipitación. Las salidas se realizan en un 88% mediante los bombeos, y el 12% restante a salido del sistema debido a la evapotranspiración.

## 7. MODELO MATEMÁTICO

### 7.1. Introducción.

Un modelo matemático es la descripción matemática de una situación real. El principal objetivo de los modelos matemáticos es representar ampliamente el sistema natural y predecir su comportamiento en el futuro.

Para la elaboración del modelo matemático es necesario identificar las variables que afectan al sistema y con base en estas delimitar el sistema a estudiar.

En la elaboración de un modelo se hacen algunos supuestos y se consideran algunas simplificaciones de la realidad para facilitar su comprensión y poder tratarla de forma matemática. Una vez formulado matemáticamente el modelo, se debe realizar una comparación de los valores obtenidos con el modelo con datos reales, este ajuste es conocido como calibración del modelo. Por último se debe validar el modelo, esta etapa consiste en comprobar que el modelo calibrado, se ajusta bien a los datos reales correspondientes a un periodo de tiempo distinto al empleado en la calibración.

Los modelos matemáticos pueden clasificarse de la siguiente manera:

**Determinista.** Se conoce de manera puntual la forma del resultado ya que no hay incertidumbre. Además, los datos utilizados para alimentar el modelo son completamente conocidos y determinados.

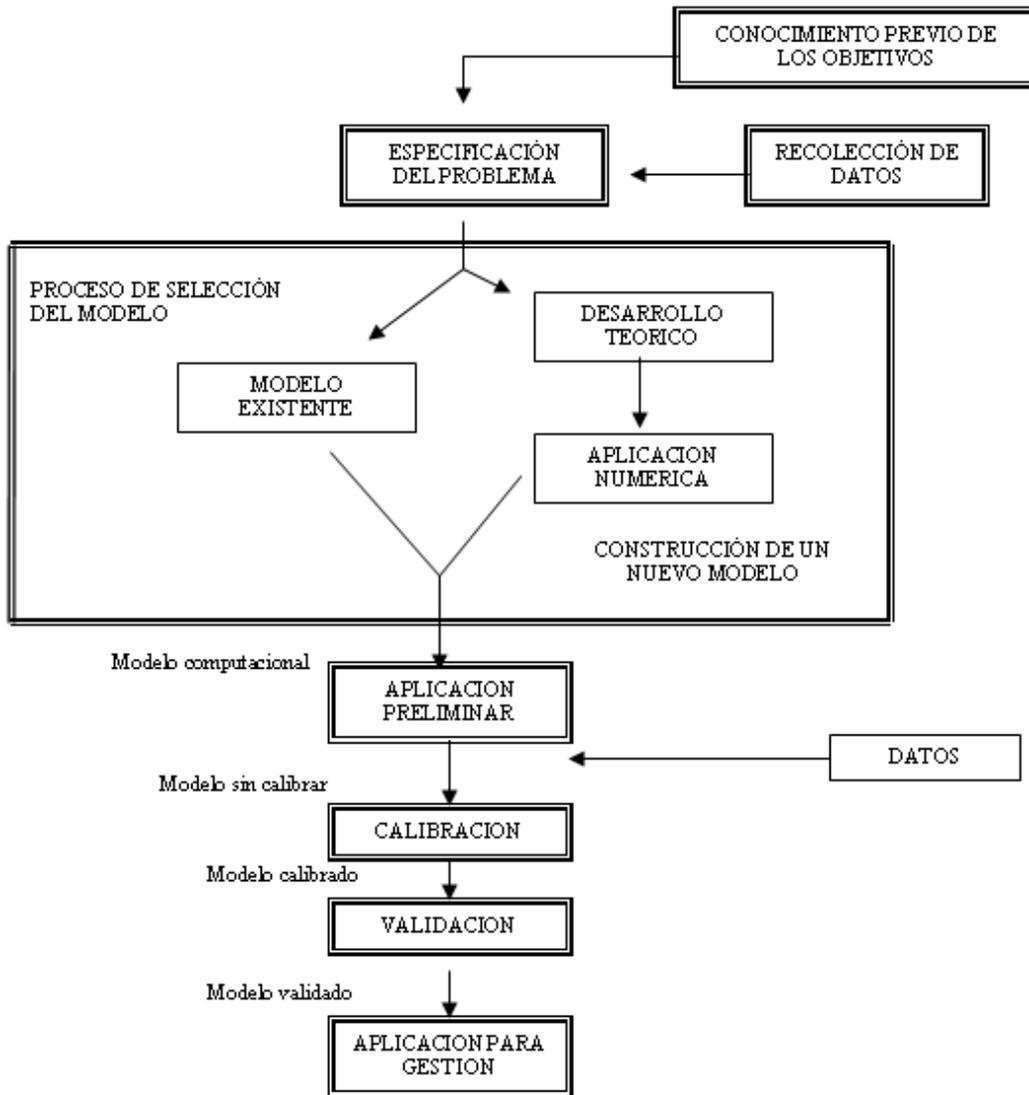
**Estocástico. Probabilístico,** que no se conoce el resultado esperado, sino su probabilidad y existe por tanto incertidumbre.

Además con respecto a la función del origen de la información utilizada para construirlos los modelos pueden clasificarse de otras formas. Podemos distinguir entre modelos heurísticos y modelos empíricos:

**Modelos heurísticos.** Son los que están basados en las explicaciones sobre las causas o mecanismos naturales que dan lugar al fenómeno estudiado.

**Modelos empíricos.** Son los que utilizan las observaciones directas o los resultados de experimentos del fenómeno estudiado.

El desarrollo de un modelo matemático incluye las siguientes fases:



**Figura 46.** Fases del desarrollo del modelo. Fuente: Metodología para la calibración de Modelos Matemáticos de dispersión de contaminantes incluyendo regímenes no permanentes.

I. Especificación del problema. El primer paso antes de establecer el modelo, es determinar, por un lado, los objetivos que se pretenden alcanzar y por otro, conocer el problema al que queremos encontrar solución, definiendo e identificando para ello, los aspectos que influyen en el mismo.

II. Selección del modelo. Es de vital importancia seleccionar el modelo que mejor se ajuste a la representación de nuestro sistema de estudio. La elaboración puede partir de cero, es decir, implementar cada una de las ecuaciones que componen el modelo o bien, servirse de algún modelo ya existente, siempre y cuando este se ajuste al sistema que se desea modelar.

III. Desarrollo teórico del modelo. Por una parte, se trata de conocer y desarrollar las ecuaciones que representen la dinámica que se quiere estudiar, así como, las variables a considerar en el modelo y por otra parte, es en este momento, o donde se debe decidir la complejidad del modelo y hasta dónde se puede simplificar para la consecución de los objetivos propuestos.

IV. Aplicación numérica. Se trata de implementar las ecuaciones en un soporte digital que facilite la resolución del modelo y que además, ayude en la interpretación de los resultados introduciendo soluciones gráficas.

V. Calibración. En esta fase, se obtienen los parámetros que hacen que el modelo represente la realidad lo más exactamente posible. Normalmente suele ser interesante identificar que parámetros son los más influyentes en el modelo, para ello suelen utilizarse técnicas de sensibilidad. A través de ellas podemos observar, cómo varían los resultados y con qué peso relativo dependiendo del parámetro.

VI. Validación. Es la fase final en la elaboración del modelo, aquí se observa si los resultados obtenidos se ajustan a los valores reales. Si es así, el modelo está listo para cumplir el objetivo que se haya definido en la primera fase.

## 7.2. Desarrollo del modelo matemático

Los modelos matemáticos de calidad del agua, una vez contruidos, calibrados y validados, permiten una completa comprensión de los mecanismos que producen las variaciones espaciales y temporales de la calidad de las aguas naturales, seleccionar las variables relevantes y los procesos de mayor importancia en el sistema. Esta comprensión es una herramienta invaluable a la hora de tomar decisiones rápidas para manejar los recursos, por ejemplo ante situaciones de emergencia.

El objetivo fundamental del presente modelo de calidad de aguas, consiste en implementar una herramienta, que permita obtener una estimación más exacta del comportamiento de la hidrodinámica del sistema de Filtros Verdes del Tancat de la Pipa.

Adicionalmente, esta herramienta, servirá como base, para la modelización futura de los contaminantes eliminados en los Filtros Verdes. Permitiendo la predicción de la evolución de la calidad del agua bajo diferentes escenarios de desarrollo y control.

El presente modelo matemático de calidad de aguas, pretende el cálculo de los caudales circulantes en los Filtros Verdes, para lo cual, se basa en la ley de conservación de la materia, relacionando el caudal con el cambio de concentración que experimenta un contaminante natural que se utiliza como trazador.

La concentración de cualquier sustancia en un sistema natural ha de cumplir la ecuación fundamental de conservación de la materia, la cual se presenta a continuación en forma diferencial:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}(u_x C) - \frac{\partial}{\partial y}(u_y C) - \frac{\partial}{\partial z}(u_z C) + \frac{\partial}{\partial x}\left(E_x \frac{\partial C}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(E_y \frac{\partial C}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(E_z \frac{\partial C}{\partial z}\right) + S_K$$

### Ecuación 15.

Donde:

C: concentración del contaminante (mg/l o mol/l).

t: tiempo (s).

$u_x$ ,  $u_y$ ,  $u_z$  : componentes del vector velocidad real del agua; velocidad longitudinal, transversal y vertical (m/s).

$E_x$ ,  $E_y$ ,  $E_z$ : componentes del tensor de la dispersión en el seno del fluido; coeficientes de dispersión longitudinal, transversal y vertical ( $m^2/s$ ).

$S_K$ : fuente o sumidero del contaminante, por unidad de volumen del fluido y de tiempo (mg/L s).

La ecuación anterior, representa la variación de un contaminante al cabo de un tiempo, que se encuentra disuelto en un elemento diferencial de volumen.

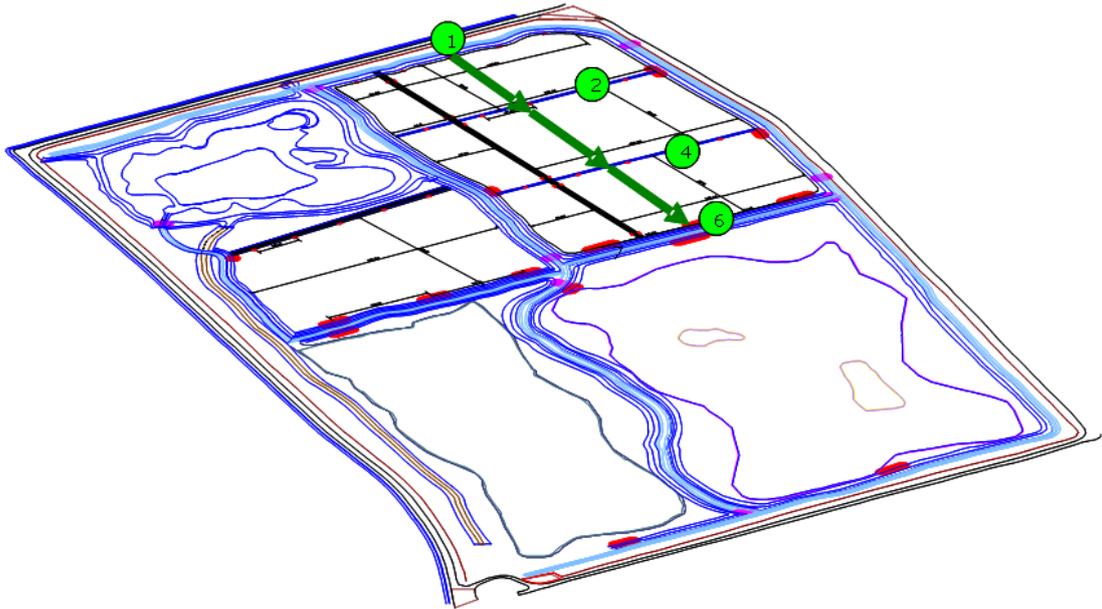
Como se explicó anteriormente, el sistema de Filtros Verdes del Tancat de la Pipa es alimentado básicamente por dos corrientes de agua, por un lado el Barranco del Poyo y por otro la Acequia de Catarroja, que se mezclan en el canal norte y mediante tuberías de derivación, ingresan a través de las compuertas de entrada al Sistema.

Los flujos de caudales del sistema, se presentaron en el capítulo 5 de este estudio. Se considera el caudal de entrada al Filtro 1 grande, para la secuencia correspondiente, es decir, Filtro 1, 2 y 3 grande; de igual manera el caudal de entrada al Filtro 1 pequeño, para la secuencia correspondiente, es decir Filtro 1, 2 y 3 pequeño y el caudal de entrada al Filtro 4 (ver tabla 13).

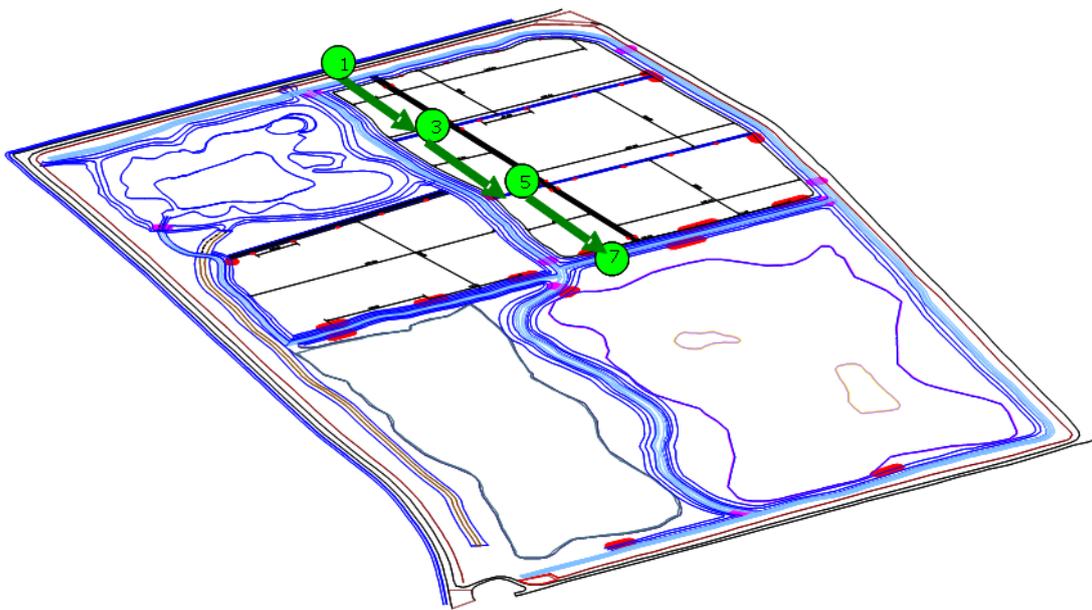
Entonces, para resolución analítica de la ecuación general del balance de materia, aplicada al desarrollo del presente modelo, se realizan las siguientes simplificaciones:

- ✓ Se considera separadamente cada celda del sistema de Filtros Verdes (p.e.: F1 grande, F2 grande, etc.), bajo la hipótesis que cada filtro funciona como un sistema de dimensión cero, tratándolo como un lago poco profundo, completamente mezclado, gracias a la acción del viento.
- ✓ Por tratarse de un sistema de filtros conectados entre sí, se consideran como un sistema de lagos conectados, situados de manera consecutiva, de manera que el efluente producido en un filtro, será el caudal alimentado al siguiente filtro.

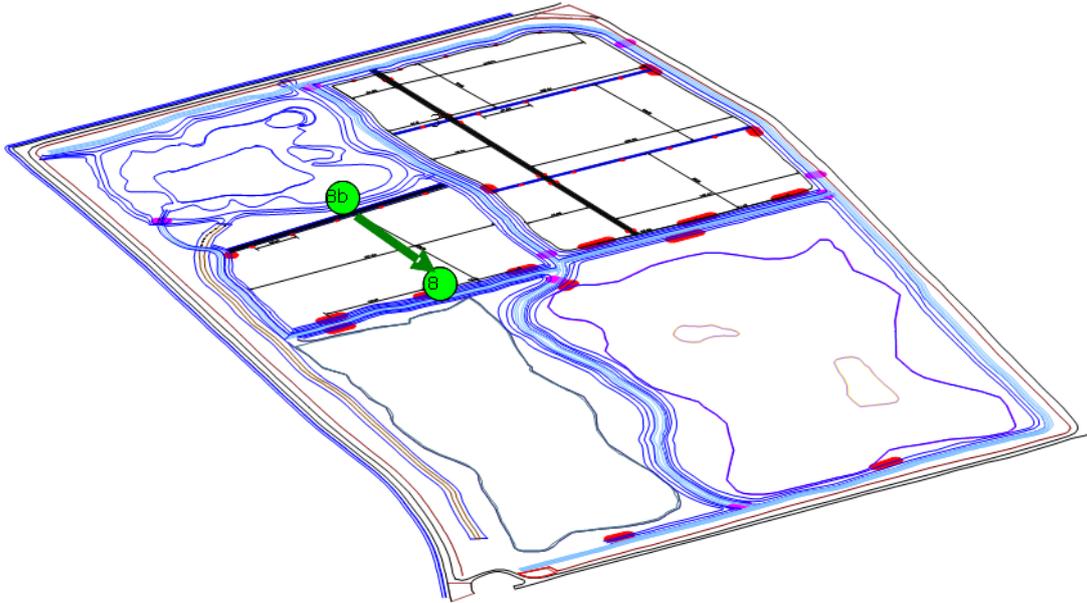
En consecuencia se modelan un total de siete celdas separadamente, manteniendo la continuidad de los flujos, en cada sistema. Cada una de las rutas a considerar se presenta a continuación.



**Figura 47.** Ruta Filtros Grandes



**Figura 48.** Ruta Filtros Pequeños



**Figura 49.** Ruta Filtro 4

El balance de materia a aplicar en cada filtro, seguirá la siguiente expresión:

$$\text{Acumulación} = \text{Entradas} - \text{Salidas} \pm \text{Generación}$$

**Ecuación 16**

En el presente modelo se va a considerar a cada “parcela” como un lago poco profundo de dimensión cero, perfectamente mezclado, y para modelar el sistema de filtros conectados (sistema de filtros grandes y sistema de filtros pequeños), se considerarán como un sistema de lagos situados de manera consecutiva, de manera que los vertidos que se produzcan en el filtro 1, serán la alimentación del filtro 2, y los vertidos del filtro 2 serán la entrada al filtro 3.

Para el desarrollo del modelo matemático de conductividad en los Filtros Verdes del Tancat de la Pipa, en primera instancia se ha dividido transversalmente cada filtro en cuatro celdas iguales, con el objetivo de representar cada filtro como un sistema de cuatro reactores conectados en serie. Lo cual se ilustrará detalladamente más adelante.

De la aplicación de la ecuación 2 del balance hídrico, para cada “parcela” se calcula, el caudal de agua presente en cada punto del sistema, mediante la siguiente expresión:

$$Q_{salida} = Q_{entrada} + (P - ETc) * A_{F.V}$$

**Ecuación 17**

Donde:

- $Q_{salida}$  = Caudal de agua vertido ( $m^3$ ).
- $Q_{entrada}$  = Caudal de agua entrante ( $m^3$ ).
- $P$  = Precipitación total ( $l/m^2$ ).
- $ETc$  = Evapotranspiración del cultivo, calculada para los Filtros Verdes ( $l/m^2$ ).

En segunda instancia, se define el trazador a utilizar para el desarrollo del modelo. Es importante, tener en cuenta que durante toda la fase de construcción y puesta en operación de los Filtros Verdes del Tancat de la Pipa se ha considerado primordialmente, causar la menor afectación posible al medio natural, por lo tanto se establece que el trazador a utilizar, debe ser un trazador natural.

Dentro de los trazadores naturales presentes en el agua, encontramos la conductividad eléctrica, que expresa numéricamente, la capacidad que poseen las sales inorgánicas en solución para transportar una corriente eléctrica. Cuanto mayor sea la cantidad de sales disueltas en el agua, mayor será el valor de la conductividad eléctrica. No obstante, este efecto continúa hasta que la solución está tan llena de iones que se restringe la libertad de movimiento y la conductividad puede disminuir en lugar de aumentar, dándose casos de dos diferentes concentraciones con la misma.

Las unidades de medida de la conductividad son Siemens por centímetro (Sistema Internacional) u ohmios por centímetro. Ambas unidades tienen el mismo valor numérico. Esta unidad es muy elevada para los valores que se encuentran en aguas naturales y, por esta razón, se utilizan los submúltiplos como ( $\mu S/cm$ ).

La conductividad del agua aumenta con la temperatura en una razón aproximada de 2% por  $^{\circ}C$ . Por lo general, los equipos de medida utilizados (termoconductivímetros) corrigen de forma automática el efecto de la temperatura y proporcionan la conductividad referida a una temperatura de  $20^{\circ}C$ .

En la campaña de muestreos se han medido los valores de la conductividad eléctrica, en cada uno de los puntos mostrados en las rutas anteriores.

Con base en las dos consideraciones anteriormente comentadas, para el desarrollo del modelo de salinidad, el primer paso es plantear el balance de materia entre las entradas y salidas de agua y de sales en cada filtro.

Dado que la conductividad es un contaminante conservativo (que no reacciona), entonces el término de generación se desprecia, con lo cual, el balance de materia para el modelo de salinidad de limita a la siguiente expresión:

$$\text{Acumulación} = \text{Entradas} - \text{Salidas}$$

### **Ecuación 18**

Donde:

Acumulación: Representa la acumulación de materia (agua y sales) en cada Filtro, es decir la variación con el tiempo de la cantidad de materia presente.

Entradas: Representa el agua y la salinidad ingresada a cada celda, considerando los aportes del caudal de entrada y la precipitación, ó lluvia caída en cada filtro.

Salidas: Representa el agua y la salinidad evacuada en cada celda, considerando las demandas del caudal de efluente y la evapotranspiración demandada en cada filtro.

Siendo la conductividad un contaminante conservativo, se calcula la concentración de la conductividad en estado estacionario para cada punto mediante la siguiente expresión.

$$V * \frac{dC}{dt} = Q_{entrada} * C_{entrada} - Q_{salida} * C_{salida}$$

En el modelo se calcula considerando la aproximación en diferencias finitas, se obtiene la siguiente expresión:

$$V * \frac{\Delta C}{\Delta t} = Q_{entrada} * C_{entrada} - Q_{salida} * C_{salida}$$

$$\Delta C = \left( \frac{Q_{entrada} * C_{entrada} - Q_{salida} * C_{salida}}{V} \right) * \Delta t$$

$$C_t = C_{t-1} + \left( \frac{Q_{entrada} * C_{entrada} - Q_{salida} * C_{salida}}{V} \right) * \Delta t$$

**Ecuación 19**

Donde:

- $C_t$ = Concentración de la conductividad ( $\mu\text{s}/\text{cm}$ )
- $C_{t-1}$ = Concentración de conductividad inicial ( $\mu\text{s}/\text{cm}$ )
- $Q_{salida}$ = Caudal de agua vertido ( $\text{m}^3$ ).
- $Q_{entrada}$ =Caudal de agua entrante en ( $\text{m}^3$ ).
- $V$  = Volumen de la superficie de control “parcela” ( $\text{m}^3$ ).
- $\Delta t$  = Intervalo de tiempo, fijado en 0.02 días.

## **7.2.1. Datos de partida para la resolución del modelo.**

### *7.2.1.1. Datos obtenidos de la campaña de muestreo.*

Para la implantación del modelo, se cuentan con los datos que han sido obtenidos en la campaña de muestreos en el periodo comprendido desde el 6 de Abril de 2009 hasta el 6 de Abril de 2010.

Los parámetros a considerar para la realización del presente modelo son los siguientes:

- Caudales de entrada, medidos aproximadamente cada 15 días en los puntos de entrada, como lo son las compuertas del filtro 1 grande, filtro 1 pequeño y compuertas de entrada al filtro 4.
- Precipitación, a partir de los datos agroclimáticos diarios, medidos en la estación meteorológica de Picassent.
- Evapotranspiración del cultivo, calculada diariamente, para cada filtro, según el procedimiento descrito en el capítulo balance hídrico.
- Adicionalmente se disponen de medidas de conductividades, realizadas quincenalmente, en cada uno de los puntos señalados en los esquemas de las rutas (Figuras 47,48 y 49).
- Como datos de partida para la resolución del modelo, se consideran los valores de conductividad medidos en el Punto 1, para entrada del filtro 1 y el filtro 1 pequeño y del punto 8B para la entrada al filtro 4. Los demás valores registrados en la tabla a continuación se tendrán en cuenta para la calibración del presente modelo. Los resultados de dichas mediciones se presentan en el Anexo II.

### *7.2.1.2. Volumen de Control.*

Como se comentó anteriormente, en el presente modelo de calidad del agua en el humedal artificial del Tancat de la Pipa, se asumen la hidráulica del flujo pistón, y se describe cada filtro como un sistema de cuatro reactores conectados en serie, de igual superficie. Para lo cual se ha dividido transversalmente cada filtro en cuatro celdas iguales, como se aprecia en la figura a continuación se observan en líneas azules, los volúmenes de control “parcelas” definidos para cada filtro.

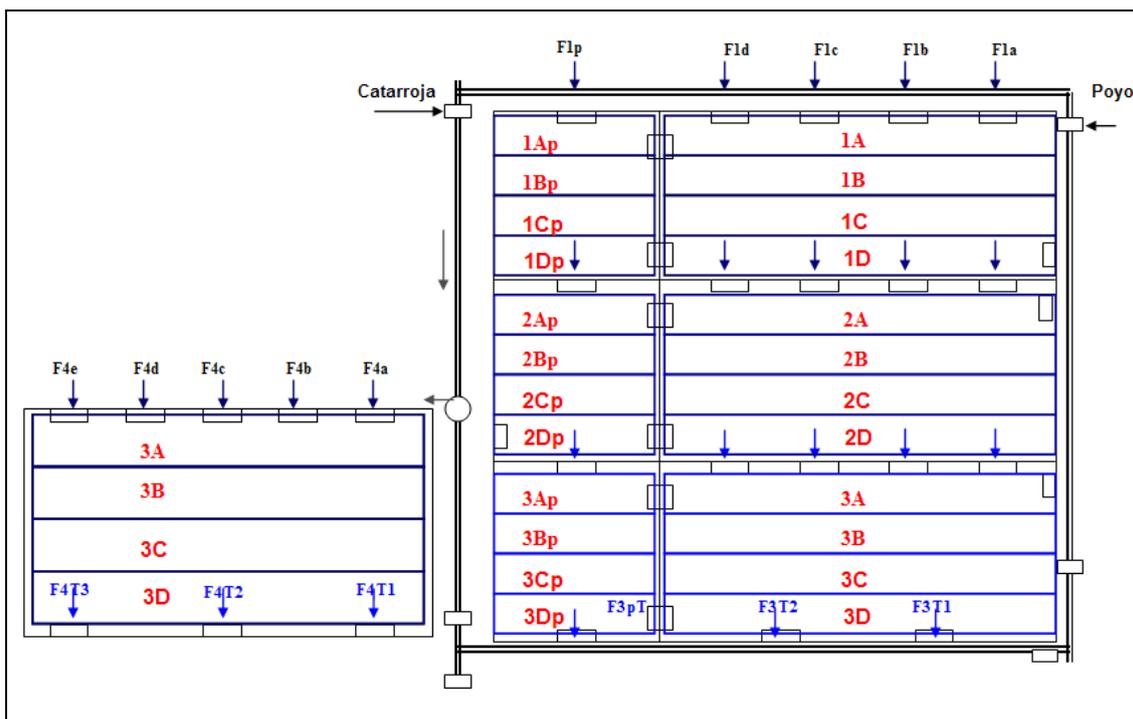


Figura 50. Volúmenes de control establecidos para el balance

Las superficies resultantes de la subdivisión de cada filtro en “parcelas” se presentan a continuación:

Tabla 27. Superficies Parcelas Sistema de Filtros Grandes.

FILTRO	A (m <sup>2</sup> )	B (m <sup>2</sup> )	C (m <sup>2</sup> )	D (m <sup>2</sup> )
1	3377.20	3377.20	3377.20	3377.20
2	4560.06	4560.06	4560.06	4560.06
3	4301.75	4301.75	4301.75	4301.75

Tabla 28. Superficies Parcelas Sistema de Filtros Pequeños.

FILTRO	A (m <sup>2</sup> )	B (m <sup>2</sup> )	C (m <sup>2</sup> )	D (m <sup>2</sup> )
1p	3574.64	3574.64	3574.64	3574.64
2p	5155.20	5155.20	5155.20	5155.20
3p	5902.49	5902.49	5902.49	5902.49

Tabla 29. Superficies Parcelas Filtro 4.

A (m <sup>2</sup> )	B (m <sup>2</sup> )	C (m <sup>2</sup> )	D (m <sup>2</sup> )	E (m <sup>2</sup> )
5119.92	5119.92	5119.92	5119.92	5119.92

En humedales artificiales de flujo superficial, como se comentó en la parte introductoria, la profundidad viene determinada por la tolerancia de la vegetación a la inundación, que como máximo suele ser de unos 0,6 m, utilizándose valores entre 0,25 a 0,5 m de lámina de agua libre. Para efectos del modelo se asume un calado constante de 0,2 m en todos los filtros.

### 7.2.1.3. Intervalo de tiempo.

Uno de los inconvenientes presentados en la modelización de la calidad del agua, es la aparición de inestabilidad numérica, la cual está en función de las entradas y salidas de materia a cada celda.

Inicialmente, las simulaciones del presente modelo, se realizaron con un intervalo de tiempo de 0,1 días, presentando errores de inestabilidad numérica, lo cual se detectó, ya que los valores de conductividad arrojados por el modelo eran muy bajos, respecto a los valores medidos en campo.

Esto es lógico ya que la concentración de la conductividad en un instante es determinado a partir del valor de la misma, en el instante anterior. Entonces cuanto menor sea el valor del incremento de tiempo,  $\Delta t$ , mayor exactitud tendrá la solución dada.

Por lo anterior, se probaron distintos valores de incrementos de tiempo, concluyendo que 0,02 días, era un intervalo de tiempo adecuado, debido a que no era muy bajo, lo cual requeriría mayor tiempo de cálculo, ni muy alto como para minimizar la precisión del modelo.

### 7.3. Calibración del modelo

El éxito de un modelo matemático, depende de su capacidad para reproducir fielmente la realidad, para lo cual es necesario obtener las ecuaciones que representen lo mejor posible la dinámica de las variables a modelar.

En los apartados anteriores, se realizó la construcción del modelo implementando las ecuaciones que describen los procesos a estudiar, tales como el flujo de aguas por el sistema de filtros verdes y la concentración de conductividad en distintos puntos de los mismos.

A continuación se realiza la calibración del modelo matemático, que consiste en aplicar el modelo a un conjunto conocido de datos y analizar los resultados simulados. Luego se deben conciliar los valores medidos en campo con los estimados por el modelo. Esto se realiza ajustando los parámetros del modelo, de modo tal que los valores simulados coincidan con los observados dentro de un margen de error aceptable.

Para calibrar un modelo existen diferentes técnicas, tales como ajuste de curvas y métodos numéricos de identificación de parámetros. Para realizar la calibración del presente modelo, se ha empleado la función de verosimilitud, la cual permite evaluar el error, que es definido como la desviación entre las simulaciones del modelo y los datos medidos, mediante la siguiente expresión, denominada función de verosimilitud. (Lindenschmidt, K.-E., 2005)

$$L_k = \sqrt{\frac{1}{Nk} \sum_{i=1}^{Nk} \frac{(y_{i,k} - y'_{i,k})^2}{y'_{i,k}}}$$

**Ecuación 20**

Donde:

$L_k$  = Función de verosimilitud.

$y_{i,k}$  = Valores simulados.

$y'_{i,k}$  = Valores medidos.

$i$  = Punto de muestreo en el espacio tiempo para que tanto la simulación y los valores medidos correspondan.

$N_k$  = Número total de puntos usados para la variable  $k$ .

$k$  = Conductividad.

Esta función de verosimilitud representa la raíz de error cuadrado dividido por  $y'_{i,k}$ , utilizado como un factor de escala a fin de garantizar la comparabilidad de escala entre las variables.

El valor obtenido de la función de verosimilitud, permitirá comparar las simulaciones realizadas, entonces, el menor valor de verosimilitud obtenido, indicará un mejor ajuste entre los datos medidos y los simulados.

Como se comentó anteriormente uno de los datos iniciales del modelo son los caudales de entrada a los Filtros, considerando que las mediciones de estos caudales realizadas en campo, se realizaron quincenalmente, se decidió realizar simulaciones, manteniendo el valor de conductividad de entrada al sistema constante y manejando los caudales de entrada de dos maneras distintas:

- i. Manteniendo el valor del caudal constante, durante los días posteriores al muestreo, hasta el siguiente muestreo.
- ii. Interpolando diariamente los valores del caudal, entre cada fecha de muestreo.

La calibración del modelo, se realizó comparando los valores de la función de verosimilitud resultantes de las simulaciones, en la tabla a continuación se observan los escenarios simulados y los valores de verosimilitud obtenidos.

**Tabla 30.** Valores de la función de verosimilitud obtenidos de las simulaciones.

Conductividad	Caudal de entrada	F1	F2	F3	F1p	F2p	F3p	F4	Total
Constante	Constante	9,22	6,22	12,60	8,96	8,34	7,86	13,93	67,13
Constante	Interpolado	8,92	6,42	12,79	8,97	8,11	7,07	12,64	64,92
Interpolado	Interpolado	7,12	6,42	12,79	6,25	8,11	7,07	12,64	60,40

De la tabla anterior podemos anotar que inicialmente se compararon los valores obtenidos manteniendo la conductividad constante y variando el caudal de entrada. Manteniendo el caudal constante, el valor de la función de verosimilitud fue de 67,13 e interpolado de 64,92; estos valores indican un mejor ajuste con los valores interpolados de caudal.

Concluido lo anterior, se procedió con los valores de caudales interpolados, a de igual manera interpolar los valores de conductividad medidos en las entradas al sistema en los muestreos quincenales, arrojando un valor de la función de verosimilitud de 60,40; siendo el menor valor obtenido.

Los resultados obtenidos de la calibración del modelo matemático, con el mejor ajuste, comparado mediante la función de verosimilitud, se muestran en las figuras a continuación, representando la evolución de la concentración de la conductividad en cada Filtro durante el periodo comprendido del 6 de Abril de 2009 al 6 de Abril de 2010.

Comparación entre valores experimentales y simulados del Filtro 1 Grande

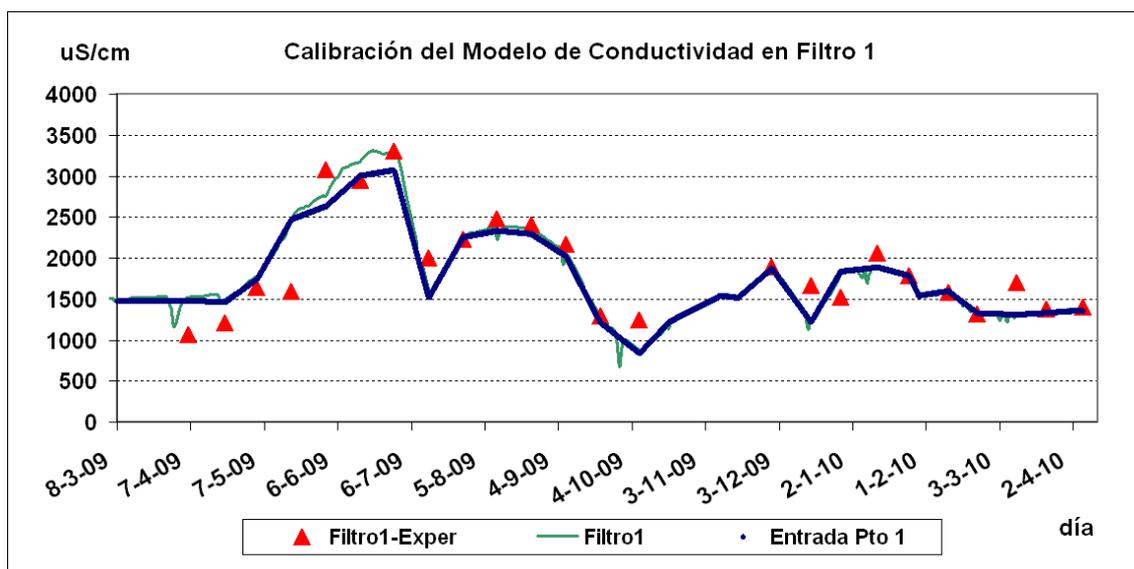


Figura 51. Calibración de la conductividad en el Filtro 1 Grande.

La tendencia general de la curva simulada, se ajusta a los datos experimentales medidos en campo.

En el periodo inicial comprendidos por los dos primeros meses Abril y Mayo, se encuentran ya completamente plantados los Filtros y se estudian las opciones para medir los caudales de agua entrantes.

El día 10 de abril de 2010, el valor simulado es menor que el experimental, cabe anotar, que en esta fecha se redujo aproximadamente en un 45% el caudal de entrada y teniendo en cuenta la conductividad inicial presente en el filtro, se explica el valor mayor de conductividad medido en campo.

Posteriormente, conforme al incremento de la temperatura ambiente, se observa el incremento en los valores de conductividad, alcanzando los máximos valores. Para el día 29 de Junio se registró una conductividad de entrada en el punto 1 de 3070  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . al igual que en el punto anterior se observa el incremento estival en los valores de conductividad, reflejando para el mes de Junio, una concentración de sales a medida que el agua atraviesa el sistema de filtros.

Luego se observa una caída de conductividad en todos los filtros, debida a que el día 13 de Julio se abre el paso de agua la acequia de Catarroja. Luego de la apertura el sistema se reestablece y aumenta nuevamente la conductividad manteniéndose casi constante durante los meses de agosto y septiembre.

El valor simulado el día 1 de junio de 2009, esta ligeramente por debajo que el valor experimental, por esos días se instaló el vertedero, lo cual pudo generar errores en el valor de caudal medido.

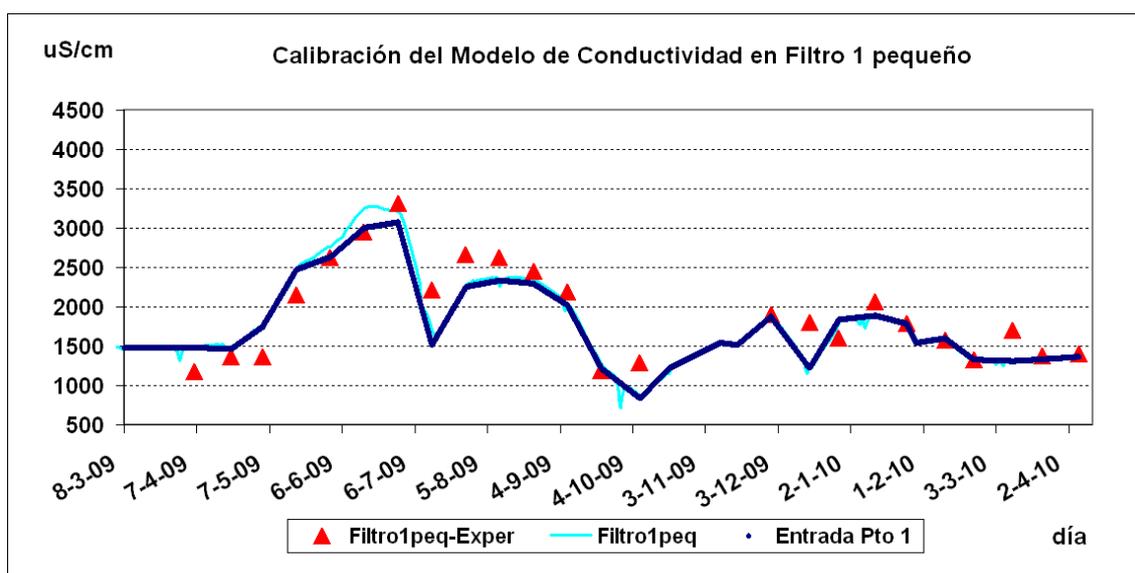
El día 29 de Septiembre de 2009, representa la influencia de la precipitación en el valor de la conductividad, como se observa en el valor simulado hay un mínimo de 850.32  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , debido a la precipitación de 125.8 m.m., presentada ese día.

Recordando, el día 16 de Noviembre se segó el Filtro 1, el cual permaneció fuera de funcionamiento aproximadamente 1 mes, a esto puede deberse el incremento de conductividad, por lo anterior no se tiene datos medidos de esa fecha. Posteriormente el día 12 de diciembre se aprecia un mínimo de conductividad debido a la realimentación de agua al Filtro.

El día 29 de Septiembre se arrojan los valores mínimos de conductividad en todos los Filtros, confirmados por el valor mínimo registrado el día 7 de Octubre (837  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).

Luego de alcanzar este mínimo el sistema presenta un aumento gradual en los valores de conductividad, arrojando una curva simulada, con muy buen ajuste y mucho más estable respecto a los periodos anteriores.

*Comparación entre valores experimentales y simulados del Filtro 1 Pequeño*



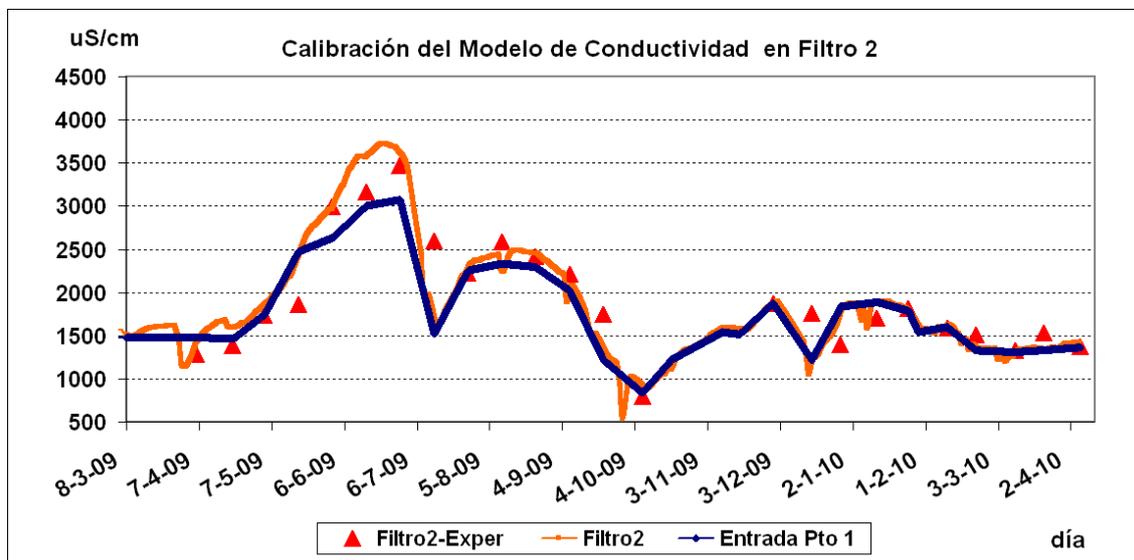
**Figura 52.** Calibración de la conductividad en el Filtro 1 Pequeño.

Analizando la gráfica resultante de la calibración para el Filtro 1 pequeño, se observa un comportamiento muy similar a la del Filtro 1 Grande. Sin embargo se debe tener en cuenta que el Filtro 1 pequeño, está más influenciado por la corriente proveniente de Catarroja que el Filtro 1 Grande, el cual, mayormente recibe aguas del Poyo y en menor proporción de Catarroja.

Respecto al Filtro 1 Grande, se observa para el día 3 de junio de 2009, un mejor ajuste en el Filtro pequeño.

El día 11 de Enero, se cerró la compuerta de entrada al Filtro 4, por lo que el agua fue desviada a los Filtros 1 Grande y Pequeño, esto se aprecia en la disminución del valor simulado respecto al experimental.

#### *Comparación entre valores experimentales y simulados del Filtro 2 Grande*



**Figura 53.** Calibración de la Conductividad en el Filtro 2.

En la curva simulada se observan en general, más oscilaciones que las vistas en el Filtro 1, sin embargo el ajuste de los valores experimentales a los simulados es bueno.

Detallando el comportamiento del modelo, en el periodo de invierno, se aprecia un muy buen ajuste, el cual también puede deberse, a que durante este periodo el caudal de entrada fue más constante, además no se realizó siega del filtro. Recordando que durante la siega del Filtro 1 el caudal se ingresó directamente al Filtro 2.

#### *Comparación entre valores experimentales y simulados del Filtro 2 Pequeño*

En comparación con la simulación realizada para el Filtro 2 grande, se observa una curva más suavizada, aunque en la fase inicial de operación del Filtro 2 pequeño, presenta más discrepancias.

Respecto a los valores de conductividad medidos en el Filtro 1 pequeño, los valores medidos en el Filtro 2 pequeño presentan más diferencias, generalmente los valores simulados son menores que los experimentales.

Además, cabe recordar que la estructura del Filtro 2, siempre presento inconvenientes de fugas y filtraciones, lo cual pudo introducir error en el valor de caudal de tratado.

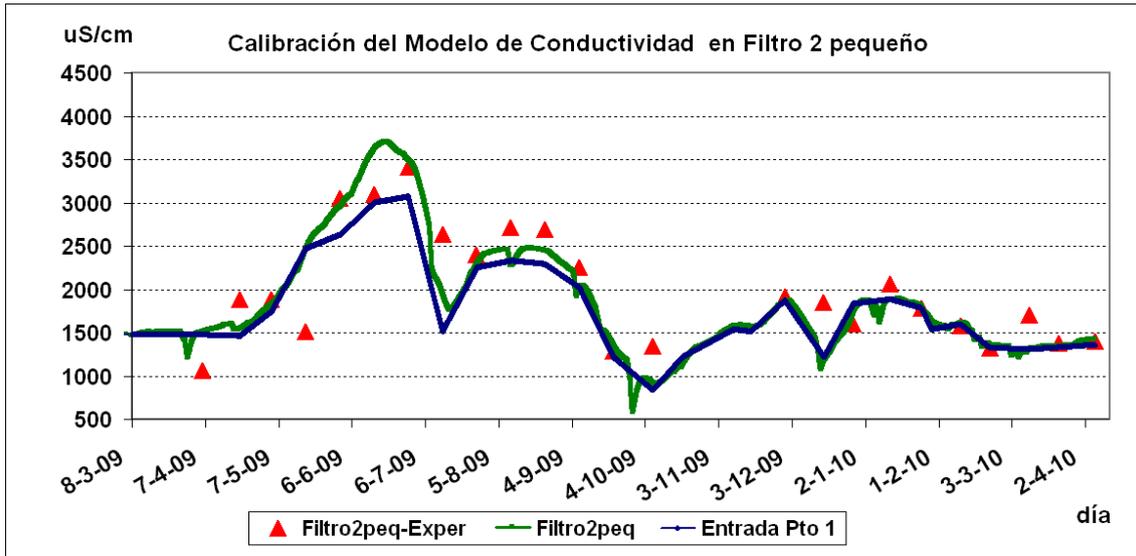


Figura 54. Calibración de la Conductividad en el Filtro 2 pequeño.

*Comparación entre valores experimentales y simulados del Filtro 3 Grande*

La vegetación sembrada en el Filtro 3 no tuvo el desarrollo esperado, hacia el mes de Junio ya se apreciaba el poco crecimiento del cultivo, por tal motivo tuvo que recalcularse el valor de  $K_c$ , requerido para la demanda de agua hacia la atmósfera por evapotranspiración.

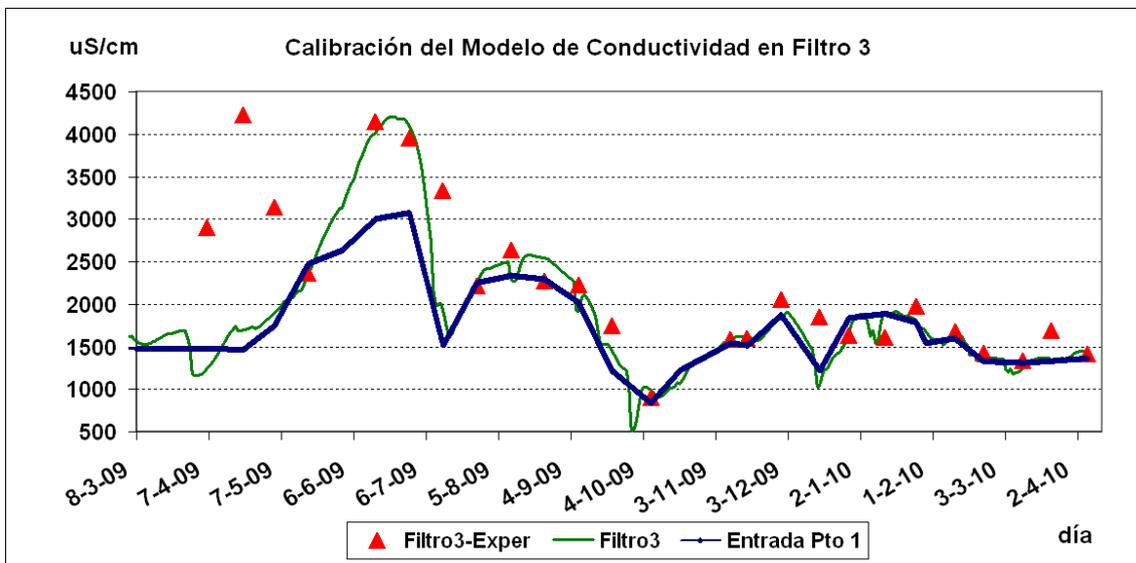


Figura 55. Calibración de la Conductividad en el Filtro 3.

Por el mes de abril cuando ya comenzaban a presentarse altos coeficientes de evapotranspiración, se registro en campo el día 21 de Abril, el valor máximo de

conductividad en el punto 6, (4230  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). Además lo anterior puede deberse al bajo nivel de agua que tenía el Filtro por esa fecha.

*Comparación entre valores experimentales y simulados del Filtro 3 Pequeño*

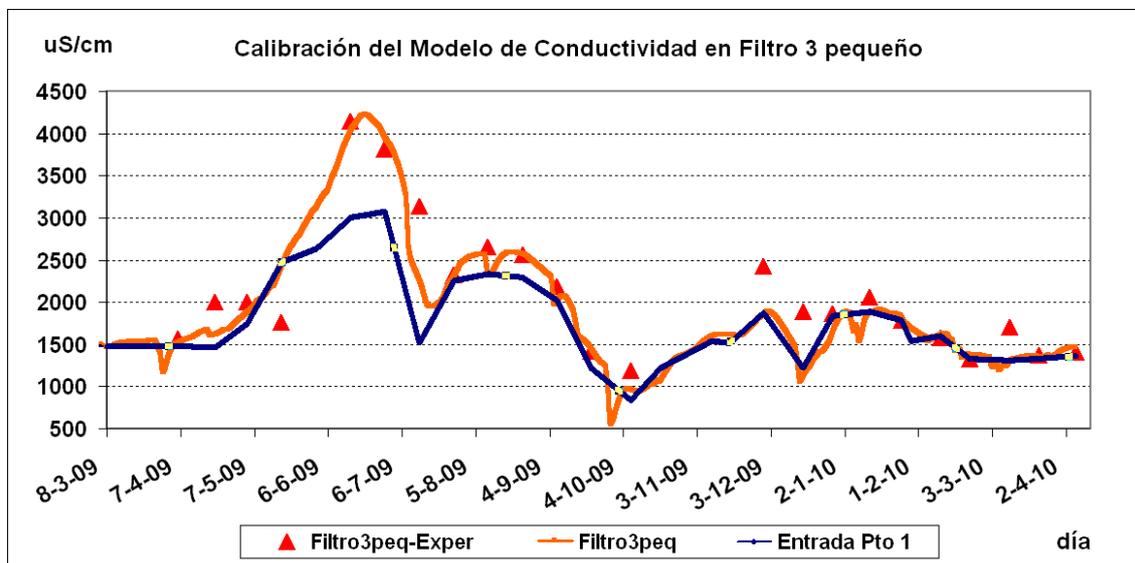


Figura 56. Calibración de la Conductividad en el Filtro 3 pequeño.

Se observa una curva simulada muy parecida a la obtenida en la calibración del Filtro 2 pequeño. Sin embargo se presentan algunas discrepancias, como por ejemplo el día 16 de junio, en donde se registra el mayor valor de conductividad medido en campo (4140  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), lo cual puede deberse a que en esta fecha comienzan a presentarse valores de evapotranspiración considerables. Misma fecha en la cual se aconseja instalar el contador del Ullal.

Otra diferencia se presenta el día 30 de Noviembre, donde el valor simulado es menor que el experimental, debido a que esta fecha el caudal de entrada al sistema de filtros pequeños disminuyó considerablemente.

*Comparación entre valores experimentales y simulados del Filtro 4*

La operación del Filtro 4, presentó varios inconvenientes durante el periodo de estudio, en los cuales fue necesario sacar el Filtro de operación.

El primer incidente se debió a la vegetación la cual en el periodo de puesta en marcha no alcanzo la densidad de vegetación requerida, lo cual obligó a replantar el Filtro 4 en el mes de Junio.

Más adelante durante el mes de Enero, debido a un error del operario, ya que se había solicitado disminuir el caudal de entrada al filtro, para bajar su nivel, pero el operario cerró el paso de agua al Filtro 4.

Por último, durante el mes de Febrero, se llevaron a cabo pruebas de rebombeo, para lo cual fue necesario la instalación de una compuerta lateral de entrada al Filtro, y debido a esto fue necesario cerrar la circulación de agua por el mismo.

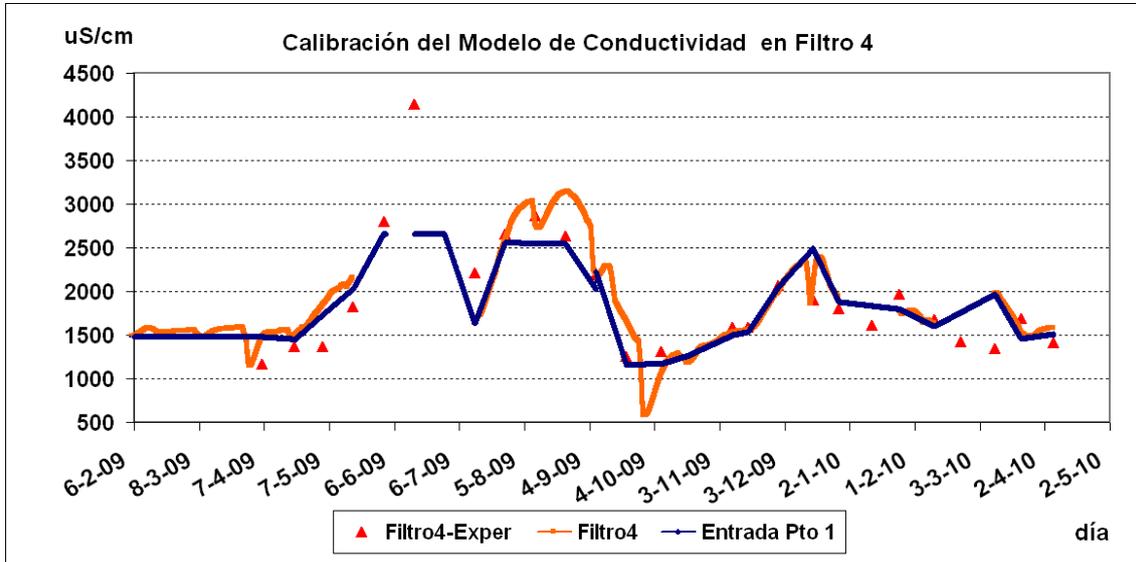


Figura 57. Calibración de la conductividad en el Filtro 4.

A pesar de los inconvenientes anteriormente comentados, los valores simulados reproducen bien la tendencia general de los valores experimentales registrados.

## 7.4. Aplicaciones del modelo desarrollado.

El modelo desarrollado reproduce debidamente la evolución de un trazador conservativo (conductividad). Una vez calibrado, el modelo puede ser empleado para obtener información del Sistema de Filtros Verdes del Tancat de la Pipa, como por ejemplo el tiempo de residencia, por ser este un parámetro necesario para caracterizar el comportamiento hidráulico del humedal en estudio.

Es importante distinguir el tiempo de residencia teórico del real. El tiempo de residencia teórico es la relación existente entre el volumen de agua del humedal estimado y el caudal circulado a través de este.

El tiempo medio de residencia real, es la media de los tiempos que tarda las partículas en atravesar el humedal. Este tiempo, es el medio real considerando la existencia de zonas muertas y caminos preferenciales. Por lo anterior el volumen efectivo del humedal siempre será menor al volumen total, por lo tanto el tiempo medio de residencia real será generalmente más pequeño que el tiempo de residencia teórico.

Para el presente estudio, solo se realiza el cálculo del tiempo de residencia teórico, ya que el cálculo del tiempo real implicaría el uso de trazadores, para el cálculo de la función de distribución de los tiempos de residencia dentro de los Filtros Verdes.

En capítulos anteriores se ha desarrollado el cálculo del tiempo de residencia teórico en el Sistema de Filtros Verdes, a continuación, mediante el modelo desarrollado, basado en la ley de la conservación de la materia, se estima el tiempo de residencia simulando un contaminante conservativo, que no sufre transformaciones.

Para el cálculo del tiempo de residencia teórico, se mantiene constante el área de los filtros y para el caudal se realizó el análisis como en el caso del cálculo de tiempo de residencia teórico, por una parte con el caudal medido a la entrada del Sistema, y por otra el caudal de salida simulado por el modelo para cada Filtro.

Mediante el modelo se calculó los tiempos de residencia, variando la profundidad de lámina de agua libre, como ya se comentó en sistemas de Flujo Superficial, son comunes valores entre 0.1 a 0.5 m. En la tabla a continuación, se presentan los valores promedios de los tiempos de residencia obtenidos de las simulación desde el 13 de Julio de 2009 al 6 de Abril de 2010, se han elegido estas fechas pues se considera un poco más estabilizado el sistema.

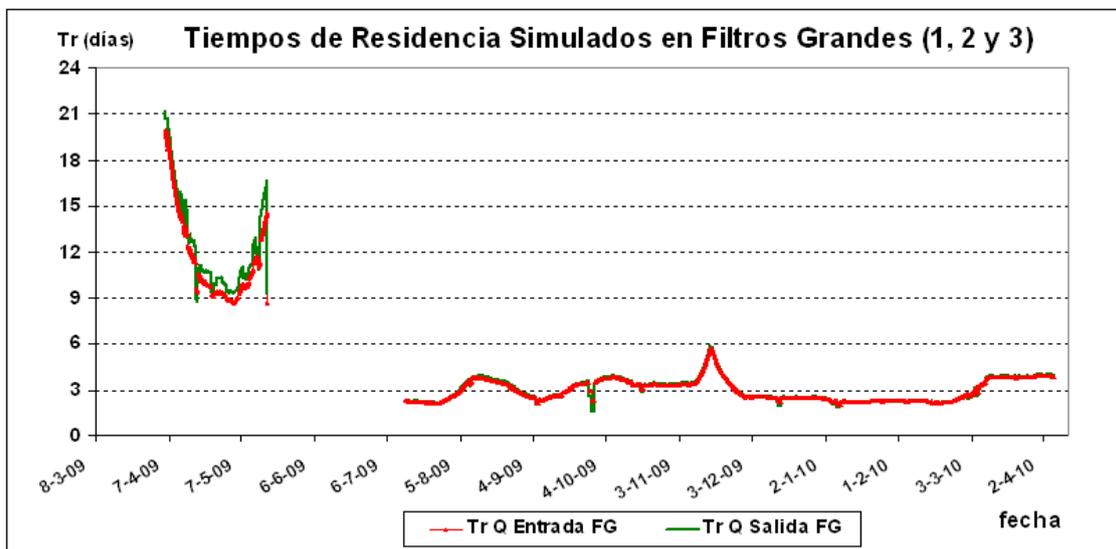
**Tabla 31.** *Tiempos de residencia promedios, variando calados.*

CALADO (m)	Tiempo de residencia simulado (días)					
	Qe FG (1,2 y 3)	Qs FG (1,2 y 3)	Qe FP (1p, 2p y 3p)	Qs FP (1p, 2p y 3p)	Qe F4	Qs F4
0.1	1,48	1,49	1,69	1,70	2,05	2,22
0.2	2,96	2,98	3,37	3,39	4,10	4,44
0.3	4,44	4,48	5,06	5,09	6,15	6,66
0.4	5,92	5,97	6,74	6,79	8,20	8,89
0.5	7,40	7,46	8,43	8,49	10,25	11,11
<b>Desviación Estándar</b>	2,34	2,36	2,66	2,68	3,24	3,51

Al aumentar el calado, se observa el incremento en los tiempos de residencia simulados. En el sistema de Filtros Verdes del Tancat de la Pipa se mantuvo un calado promedio de 0,2 m.; por tal motivo se analizó el sistema con un calado de 0,2m.

A continuación se representan gráficamente los resultados obtenidos con el modelo, suponiendo un calado constante de 0.2 m., y considerando de igual manera la sumatoria de los tiempos de residencia para el Sistema de Filtros Grandes.

Para observar más claramente las escalas de las gráficas siguientes, se han eliminado los valores resultantes durante los periodos de bajos caudales, ó, en los cuales los Filtros se encontraban fuera de operación.



**Figura 58.** *Tiempos de residencia simulados para Filtros Grandes.*

En la gráfica anterior, se observan marcadamente dos periodos, inicialmente el de puesta en marcha del Sistema comprendido entre el 6 de Abril de 2009 al 18 de Mayo de 2009, durante el cual se observa una oscilación considerable debido a las grandes variaciones de caudal presentadas en estas fechas.

El segundo periodo comprendido entre el muestreo del 13 de Julio de 2009 al ultimo muestreo realizado el 6 de Abril de 2010, durante el cual se observan tiempos de residencia mucho más estables, con un valor promedio de 2,97 días, nótese que este es el mismo valor obtenido tanto con el caudal de entrada y el de salida.

A continuación se representan gráficamente los resultados obtenidos con el modelo, suponiendo un calado constante de 0.2 m., y considerando de igual manera la sumatoria de los tiempos de residencia para el Sistema de Filtros Pequeños.

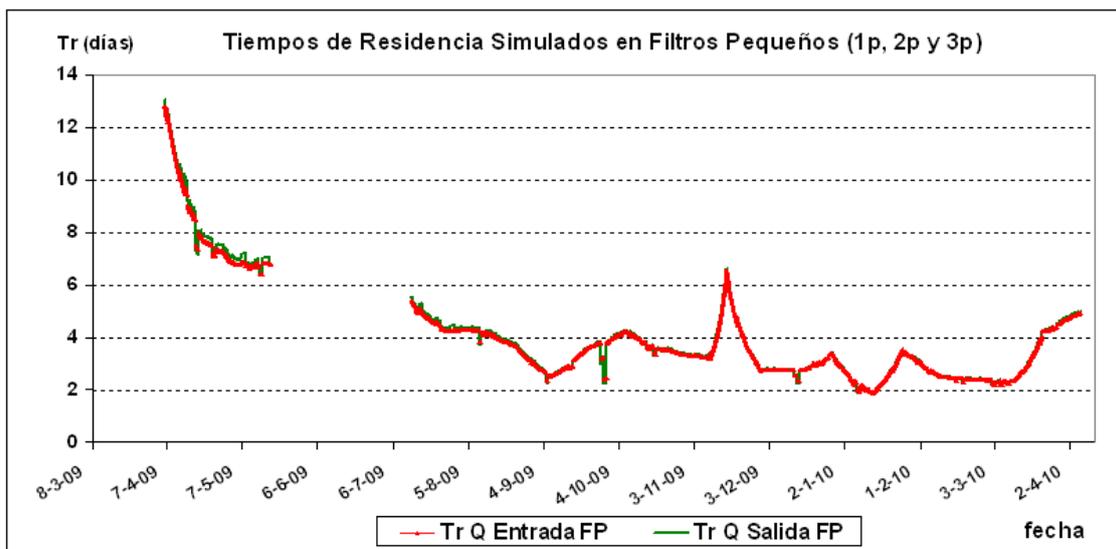


Figura 59. Tiempos de residencia simulados para Filtros Pequeños

Para la gráfica anterior, se ha realizado el corte de la serie en el mismo periodo que para los Filtros Grandes anteriormente comentados. Observando en el segundo periodo, tiempos más homogéneos, que los del primero; sin embargo en el segundo periodo los tiempos de residencia simulados en los Filtros Pequeños presentan más oscilaciones que los obtenidos en los Grandes.

En el periodo comprendido 13 de Julio de 2009 a 6 de Abril de 2010, comparando los promedios calculados tanto con caudal de entrada como de salida, se tiene un tiempo de residencia total promedio de 3,38 días.

A continuación se representan gráficamente los resultados obtenidos con el modelo, suponiendo un calado constante de 0.2 m., y considerando de igual manera la sumatoria de los tiempos de residencia para el Filtro Cuatro.

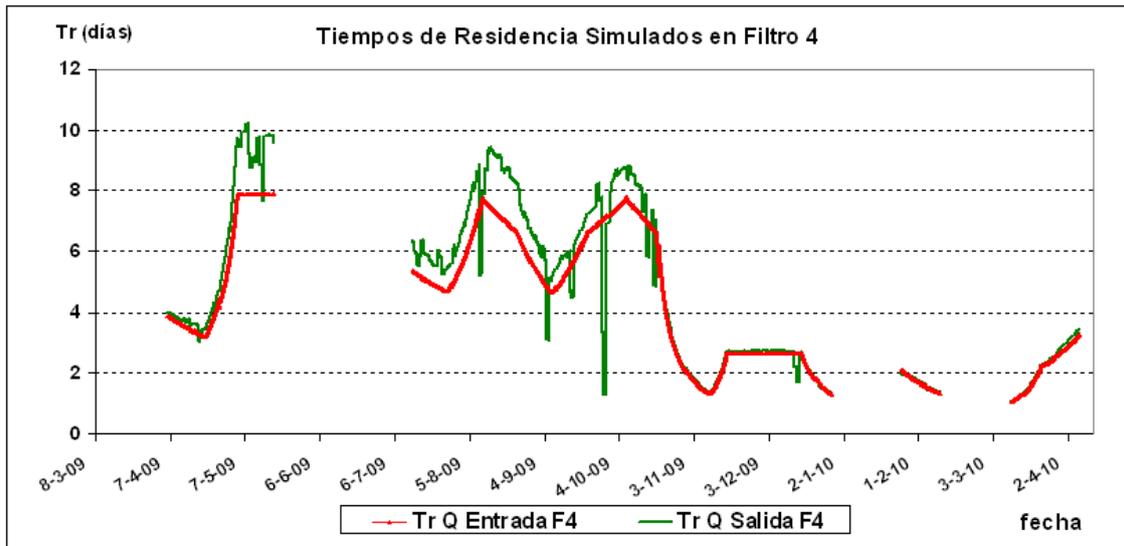


Figura 60. Tiempos de residencia simulados en el Filtro 4

En la figura anterior se observan cuatro periodos, así:

- Del 6 de Abril a 18 de Mayo de 2009, presentando tiempos de residencia en aumento, posteriormente, se sacó de operación el Filtro debido a la resiembra de vegetación.
- Del 13 de Julio a 28 de Diciembre de 2009, presentando dos grandes oscilaciones con el caudal de entrada, con el caudal de salida simulado en cambio se observan múltiples oscilaciones y valores bajos y constantes durante el mes de Diciembre. Posteriormente se cortó la serie ya que los Filtros salieron de operación debido a que por error el operario cerró la entrada de agua al sistema, pero solo se pretendía bajar el nivel.
- Del 25 de Enero al 10 de Febrero de 2010, se observan tiempos en descenso desde 2,11 a 1,34 días. Luego el Filtro sale de operación debido a las pruebas de rebombeo.
- Finalmente del 10 de Marzo a 6 de Abril de 2010, presentando tiempo en aumento desde 1,06 a 3,29 días.

Cabe destacar que los cálculos anteriormente realizados, consideran útil el área total del humedal. En la campaña de muestreos se han detectado irregularidades en el funcionamiento hidráulico de los Filtros Verdes, como fugas, filtraciones, formación de caminos preferenciales y zonas muertas. Por lo anterior es importante tener en cuenta esta irregularidad, aunque para el presente estudio no sean realizado mediciones del porcentaje de zonas muertas presentes en el sistema, se realizó este análisis considerando datos bibliográficos de los valores típicos para este tipo de sistemas.

Para el presente estudio, se consideran zonas muertas, tanto las zonas inundadas como las zonas sin o con bajo nivel de riego. Considerando lo anterior, se realizó la

simulación reduciendo en un 30% el área útil de los Filtros Verdes y a continuación se presentan los resultados del tiempo de residencia promedios, del periodo comprendido entre el muestreo del 10 de Marzo y el del 6 de Abril de 2010. Suponiendo la estabilización del sistema durante estas fechas.

**Tabla 32.** *Tiempos de residencia promedios, con presencia de zonas muertas.*

Área Útil	Q entrada	Q salida	Q entrada	Q salida	Q entrada	Q salida
	Tr F4	Tr F4	Tr FG	Tr FG	Tr FP	Tr FP
	1,2 y 3	1,2 y 3	1,2 y 3	1,2 y 3	1,2 y 3	1,2 y 3
	d	d	d	d	d	d
<b>100%</b>	2,17	2,23	3,84	3,89	3,89	3,92
<b>70%</b>	1,52	1,55	2,67	2,70	2,71	2,73
<b>Reducción</b>	30%	31%	30%	31%	30%	30%

Como era de esperarse, la disminución en el tiempo de residencia, es proporcional al área utilizada para realizar el cálculo, se disminuyo en un 30% el área y los tiempos de residencia igualmente disminuyeron en un 30% aproximadamente.

El control del tiempo de residencia es de suma importancia, ya que se debe garantizar la no existencia de este tipo de zonas, ni la presencia de canales preferenciales, pues esto disminuye el tiempo de residencia, afectando directamente al tratamiento de las aguas, por no garantizar el tiempo mínimo requerido para la eliminación de los contaminantes presentes en el agua.

En el capítulo 5 del presente estudio, se realizó el cálculo del tiempo de residencia teórico, a partir de los caudales de entrada medidos en la campaña de muestreos y en el caudal de salida contemplando la influencia de la evapotranspiración sobre el sistema, para lo cual se ha restado al valor del caudal de entrada el valor de la evapotranspiración.

En la tabla a continuación se presentan los tiempos de residencia, tanto teóricos como los obtenidos del modelo, se muestran los tiempos promedios de los tres últimos muestreos, por considerar que en estas fechas el sistema tiene una operación estable.

**Tabla 33.** *Comparación tiempos de residencia teóricos vs. modelo.*

	Q entrada			Q salida		
	FG	FP	F4	FG	FP	F4
Tiempo de residencia teóricos (d)	3,78	3,75	2,20	3,95	3,95	2,27
Tiempo de residencia modelo (d)	2,67	2,71	1,52	2,70	2,73	2,17
Desviación Estándar	0,78	0,74	0,48	0,88	0,86	0,07

Para los dos cálculos, se utilizó una altura de lámina de agua de 0,2 m, se observa que los tiempos teóricos son mayores que los tiempos de residencia obtenidos con el modelo, cabe resaltar que en este último se considera la influencia de las

variables hidrológicas la evapotranspiración y la precipitación, con lo cual al aumentar el caudal de entrada al sistema, el valor de los tiempos de residencia disminuye.

En conclusión, el modelo desarrollado nos permite tener una idea bastante aproximada de los tiempos de residencia en los Filtros Verdes del Tancat de la Pipa, considerando el 100% del área útil. Esto es trascendental para garantizar el tiempo requerido para llevara cabo la depuración del agua dentro del sistema de Filtros Verdes del Tancat de la Pipa.

## 8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Como resumen y conclusión a los resultados de la campaña de muestreos se recapitulan los siguientes aspectos:

- Debido a *la estructura de los Filtros Verdes* del Tancat de la Pipa, es muy difícil controlar todas las corrientes de agua que por allí circulan, sin embargo, gracias a la campaña de muestreos realizada, se obtuvo una idea bastante aproximada del régimen de distribución de los caudales circulantes, además, de comprobar la influencia de otras corrientes de agua desconocidas inicialmente, como es el caso de la influencia del Ullal principalmente en el agua de alimentación al filtro cuatro.
- Para una correcta medición de caudal con vertederos, la parte aguas abajo del vertedero debe permitir, que en cualquier condición, el flujo se efectúa en lámina libre. Debido a que los tanques construidos aguas arriba y aguas abajo de los vertederos del Tancat de la Pipa, son muy pequeños, se genera un efecto de turbulencia, que afecta la medición de los caudales de entrada al sistema de Filtros Verdes, sin embargo, este error introducido se ha considerado constante en todas las mediciones, realizadas en la campaña de muestreos.
- Las fugas y filtraciones observadas a lo largo de la campaña de muestreos, son debidas a que no se impermeabilizaron los terrenos por tratarse de un proyecto de restauración de un hábitat natural; estas irregularidades, imposibilitan la realización de un balance hídrico los Filtros Verdes.
- La población de aves (mayormente anátidas), influyó en el desarrollo de la vegetación en los Filtros Verdes, componente importante del humedal ya que ralentiza y distribuye el flujo del agua en los Filtros Verdes.
- Los niveles del lago afectan muchísimo al caudal de entrada y salida y en algunas épocas del año estos fluctúan de manera notable en pocas horas al día. Por ejemplo en el mes de Junio el nivel del lago comenzó a disminuir constantemente impidiendo introducir el caudal estipulado en los Filtros.

### *Acciones de Mejora:*

- Inicialmente el Tancat de la Pipa, no contaba con ningún equipo para el control y gestión hídrica del sistema. Por tanto, la primera actuación fue seleccionar los

equipos más adecuados para llevar a cabo el control requerido. Realizando las siguientes **acciones de mejora** en el Sistema del Tancat de la Pipa.

- Instalación de los sistemas de aforo en las entradas del Barranco del Poyo y la Acequia de Catarroja, compuestos por su respectiva estructura en hormigón, vertedero triangular con ángulo de 90° y regleta para medición de nivel.
- Instalación de los tabloncillos de 10 cm. en las compuertas de los Filtros Verdes y en las compuertas de las lagunas educativa y de reserva, lo cual facilitó el control de la altura de la lámina de agua en los sistemas.
- Instalación del contador del Ullal, información necesaria para la realización del balance hídrico y con el cual se podrá en futuros estudios, definir su influencia en los Filtros Verdes.

#### ***Distribución de caudales en los Filtros Verdes.***

- Sobre el ***régimen de distribución de caudales***, se concluye que la distribución del agua por las entradas de los Filtros Verdes, en términos generales se presenta así, por el Filtro 1 grande ingresa el 60%, por el Filtro 1 pequeño ingresa el 10% y por el Filtro 4 ingresa el 30% restante del agua total ingresada al sistema de Filtros Verdes.
- Adicionalmente a los valores de caudal medidos, se compararon los valores de conductividad en las distintas compuertas de entrada, apreciándose por medio de estas las mezclas de agua ya comentadas, y observando un importante incremento de conductividad en la entrada al Filtro 4, lo cual indica una posible filtración de agua salobre proveniente del Ullal.

#### ***Balance Hídrico.***

- Para el desarrollo del ***balance hídrico*** se despreció de la ecuación el término de infiltración en los Filtros Verdes. Considerando que los suelos del Tancat de las Pipa son ricos en arcillas y limos, materiales que tienden a compactarse restringiendo de esta manera la circulación de aire y agua.
- No fue posible realizar el balance hídrico del Sistema de Filtros Verdes del Tancat de la Pipa, ya que no se contaba con datos exactos de salidas de agua del sistema de Filtros. Lo cual obligó a trabajar con los datos de bombeo de agua del

Tancat hacia el Lago de la Albufera, por lo tanto el balance presentado, es para el Tancat de la Pipa como un global

- Del balance hídrico del Tancat de la Pipa, se concluyó que aproximadamente del volumen total de agua ingresado al sistema, el 47% ingresó por la Acequias del Barranco del Poyo, el 37% por la Acequia del Puerto de Catarroja y el 6% proveniente del Ullal; y el 11% restante ingresó por Precipitación. Las salidas se realizan en un 88% mediante los bombeos, y el 12% restante a salida del sistema debido a la evapotranspiración.
- Debido a la velocidad del flujo en el canal perimetral norte, se aprecia poca entrada de agua por las compuertas iniciales (F1a y F4a) y al no ingresar agua por estas compuertas se han observado zonas muertas en los sectores más próximos a estas compuertas, la existencia de estas zonas, además potencian la formación de caminos preferenciales lo cual disminuye considerablemente el buen aprovechamiento de toda la extensión de los Filtros.
- En el balance hídrico semanal pueden apreciarse eventos puntuales y su influencia sobre todo el sistema de Filtros Verdes, por ejemplo el día 28 de septiembre, en el cual se registro el mayor valor de precipitación, siendo el doble del agua ingresada por las acequias.
- Otra particularidad que se observó en el balance semanal, fue la disparidad de los bombeos realizados inicialmente a voluntad, teniendo en cuenta básicamente las precipitaciones, los niveles deseados en los Filtros y el nivel de la lámina de agua en el Lago de la Albufera. Luego de la instalación de los tablonces en las compuertas de salida de los filtros, como de las lagunas de salida de reserva y educativa se lograron bombeos más constantes.

### ***Tiempos de Residencia.***

- En las mediciones realizadas en los muestreos tanto de caudales, como de conductividades en las compuertas y de caudales de entrada en los vertederos, se pudo observar que el tiempo de respuesta hidráulico del sistema, hace que, lo que se este midiendo en un instante a la salida, pueda tener poco que ver con lo que está ingresando en este mismo momento, si no se está en estado estacionario.
- Se realizó el cálculo de los tiempos de residencia teóricos, el primero con el caudal de entrada y el segundo con el caudal de salida, calculado como la resta de la evapotranspiración al valor del caudal de entrada. Concluyendo que la evapotranspiración influye en el tiempo de residencia hidráulico, ya que al hacer

la resta de la evapotranspiración del caudal de entrada, y realizar el cálculo con un valor de caudal más pequeño, el valor del tiempo de residencia es mayor.

- Se observó una primera etapa comprendida desde el 6 de Abril de 2009 hasta el 29 de Junio de 2009, durante la cual se obtuvieron tiempos muy heterogéneos, esto debido a que en el sistema todavía se estaban haciendo obras, y aún no se controlaba el ajuste del nivel de la lámina de agua.
- Se observó igualmente una segunda etapa comprendida desde el 13 de Julio de 2009 al 6 de Abril de 2010, fecha en la que se finaliza el presente estudio, para este periodo ya se observa un comportamiento más estable y por lo tanto datos más homogéneos, registrando un tiempo de residencia teórico promedio de 3,6 d. en los Filtros Grandes, 4.1 d. en los Filtros Pequeños y 2.5 d. en el Filtro cuatro.

#### ***Modelo matemático de calidad de aguas.***

- Se ha desarrollado el ***modelo matemático***, asumiendo una hidráulica de flujo pistón y describiendo cada filtro como un sistema de cuatro reactores conectados en serie. Modelando la evolución de la conductividad eléctrica del agua, por tratarse de un trazador conservativo; obteniendo un buen ajuste entre los datos de conductividad simulados y los datos obtenidos en la campaña anual de muestreos en el sistema de Filtros Verdes.
- El modelo matemático simula valores con intervalo de tiempo de 0.02 días, de la evolución de un contaminante conservativo (conductividad) a la salida del Sistema de Filtros Verdes. Esto lo hace una valiosa herramienta, ya que permite predecir el caudal en todo el sistema de Filtros Verdes, conocido el nivel de la lámina de agua y el caudal de entrada, además considerando la influencia de las variables meteorológicas, tales como la precipitación y la evapotranspiración. Permitiendo tomar decisiones para la operación y control del sistema.
- Mediante el modelo matemático de calidad de aguas desarrollado para el sistema de Filtros Verdes del Tancat de la Pipa, será posible modelar en próximos estudios otros parámetros de interés como por ejemplo Nutrientes, DBO, DQO, etc.
- Para el cálculo del ***tiempo de residencia*** se supone que toda la superficie de los filtros es útil, en la realidad se han observado zonas muertas y caminos preferentes, y aunque la aplicación del modelo matemático nos da una aproximación bastante aproximada del tiempo de permanencia, en futuros estudios, se recomienda estudiar la función de distribución de los tiempos de

residencia, mediante un estudio de trazadores, y de esta manera calcular el tiempo de permanencia real en los Filtros Verdes.

- Los tiempos de residencia obtenidos con el modelo, en los Filtros Verdes del Tancat de la Pipa, durante el periodo comprendido entre el 10/03/2009 y el 06/04/2010, son los siguientes: en los Filtros Grandes y pequeños, aproximadamente 4 días, en los filtros pequeños 2 días.

Algunas recomendaciones para estudios futuros sobre el sistema de Filtros Verdes del Tancat de la Pipa, se realizan a continuación.

- Los principales inconvenientes, observados en el sistema de Filtros Verdes, pueden clasificarse en tres categorías: problemas de explotación, problemas estructurales y agentes externos, así:

- Problemas de explotación: Por tratarse de una experiencia piloto, no se tienen antecedentes en la gestión de este tipo de sistemas, por lo tanto, se debe tratar de establecer rangos de operación, en los aspectos más relevantes.

Deberá analizarse los rendimientos de remoción de contaminantes y establecer el tiempo hidráulico requerido, para garantizar la depuración de las aguas.

Por otra parte, debe analizarse la influencia del nivel del lago de la Albufera sobre el sistema y estimar cuales son los niveles recomendados a manejar en los Filtros Verdes, para cada temporada.

- Problemas estructurales: Un aspecto sumamente importante es la impermeabilización de los terrenos, para este caso, el diseñador supuso que la composición del terreno, garantizaba una completa impermeabilización. Sin embargo se comprobó, que una mínima composición arenosa y una deficiente compactación del terreno, dan lugar a filtraciones considerables.
- Agentes externos: Se debe controlar la influencia de las diferentes especies sobre el sistema, por ejemplo: los cangrejos ocasionan filtraciones en el sistema y los patos impiden el desarrollo de la vegetación, este aspecto debe estudiarse y tomar las medidas

correspondientes para permitir el hábitat de las especies sin que ello cause inconvenientes en el normal desarrollo del sistema.

## REFERENCIAS

- Bachelator A. y Loots P. (1996). A critical evaluation of a pilot scale subsurface flow wetland: 10 years after commissionist. In 5<sup>th</sup> International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control. Vienna, Chapter. XI/4.
- Benet; J.M. (1983). La Albufera de Valencia. Datos para una política de soluciones. Revista de Obras Públicas. Febrero-Marzo; 167-180.
- Brix H. (1994a) Use of constructed wetlands in water pollution control: Historical development, Present status and future perspectives. Wat. Sci. Tech.;30(8):209-223.
- Crites R.; Tchobanoglous G. (2000). Sistemas de Manejo de Aguas Residuales para Núcleos Pequeños y Descentralizados. Colombia, Mc Graw Hill Interamericana.
- FAO; Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M.(2006). Evapotranspiración Del Cultivo: Guías Para Determinación Los Requerimientos De Agua De Los Cultivos Riego Y Drenaje. Vol. 56 de Estudio FAO: riego y drenaje
- García J.; Aguirre P.; Barragán J.; Mujeriego R.; Matamoros V. and Bayona J. M. (2004b). Effect of key design parameters on the efficiency of horizontal subsurface flow wetlands: long term performance. Wat. Res.; submitted.
- García J.; Morato J.; y Bayona J M.; (2004). Nuevos criterios para el diseño y operación de humedales construidos. Ediciones CPET, Spain.
- García J.; y Mujeriego R. (1997). Humedales construidos de flujo superficial para tratamiento Terciario de aguas residuales urbanas en base a la creación de nuevos ecosistemas. Tecnoambiente, 75,37-42.
- García J.; Mujeriego R.; Obis J.M. y Bou, J. (2001). Wastewater treatment for small communities in Catalonia ( Mediterranean Region). Wat. Pol.; 3, 341-350.
- García J. Mujeriego R.; Bourrouet A., Freixes A. y Peñuelas G. (2001b) Wastewater Treatment by pond systems: experiences in Catalonia,Spain. Wat. Sci. Tech.; 42 (10-11),35-42
- García J.; Ojeda E.; Sales E.; Chico F.; Píriz T.; Aguirre P. y Mujeriego R. (2003). Spatial variations of temperature, redox potencial, and contaminants in horizontal flow reed beds . Ecol. Eng.; 21, 129-142.
- Hernández C. (2006). Estudio de la calidad de las aguas en el embalse de Beniarrés (Beniarrés, Alicante) mediante el desarrollo de un modelo de calidad de aguas superficiales. Ejercicio Final de Carrera. Licenciatura en Ciencias Ambientales. Universidad Politécnica de Valencia, Spain.

- Herschey R W (1999), *Hydrometry: Principles and Practices - Second Edition*. John Wiley and Sons Feb 1998, 380pp, Hardbound. ISBN 0-97350-5
- Kadlec R.H.; Knight R.L. (1996). *Treatment Wetlands*, CRC Press, Boca Ratón,FL.
- Kadlec R.H.; Knight R.L. Vymazal J.; Brix H.; Cooper P. y Haberl R.(2000). *Constructed Wetlands for Pollution Control: Processes, Performance, Design and Operation*. IWA Specialist Group on use of Macrophytes in Water Pollution Control, IWA. Publishing.156 pp.
- Kadlec R. H.; Wallace S.; *Treatment Wetlands (2009)*. CRC Press, Boca Ratón,FL.
- Lindenschmidt, K.-E., (2005). The effect of complexity on parameter sensitivity and model uncertainty in river water quality modelling. *Ecological Modelling*. 190. 72 – 86.
- Mander U.; Kuusemets V.; Lohmus K.; Muring T.; Teiter S. Y Augustin, J. (2003). Nitrous oxide , dinitrogen and methane emission in a subsurface flow constructed wetland. *Wat. Sci. Tech.*, 48(5),135-143.
- Martín M. (1998). *Modelación de la calidad en aguas superficiales. Aplicación al caso de La Albufera de Valencia*. Tesis doctoral, Universidad de Valencia, Spain.
- Merz S.K. (2000). *Using Free Water Surface Constructed Wetlands to Treat Municipal Sewage*. Queensland Department of Natural Resources, Brisbane.
- Ministerio de Medio Ambiente, Dirección de Obras Hidráulicas y Calidad de Aguas, Confederación del Júcar y Tyspa (2003). *Estudio para el desarrollo sostenible de La Albufera de Valencia*.
- Oliver N (2010). *Desarrollo y calibración de un modelo matemático de la evolución del aporte de nutrientes por descomposición de la biomasa fitoplanctónica de la Albufera de Valencia. Influencia de la radiación solar*. Ejercicio Final de Carrera. Licenciatura en Ciencias Ambientales. Universidad Politécnica de Valencia, Spain.
- Pettecrew E.L. y Kalff J. (1992). *Water flow and clay retention in submerged macrophyte bed*.
- Persson J. Somes N.L.G. y Wong T.H.F (1999). *Hydraulic efficiency of constructed wetlands and ponds*. *Wat. Sci. Tech.*, 40 (3), 291-300.
- Reed S.C.; Crites R.W. y Middlebrooks E.J.(1995). *Natural Systems for Waste Management and Treatment*. 2<sup>nd</sup> Edition. MCGraw-Hill, New York,431 pp.
- Robusté, J. (2004). *Humedales en explotación, experiencia en Catalunya*. In: *Nuevos Criterios para el Diseño y Operación de Humedales Construidos. Una alternativa*

de Bajo Coste para el Tratamiento de Aguas Residuales. García J.; Morató J. y Bayona J.M. (eds) Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, pp. 91-94.

Simi A. y Michell C. (1999) Desing and hydraulic performace of a constructed wetland treating oil refinery wastewater. *Wat. Sci. Tech.*, 40 (3), 301-307.

Simon, Andrew L. *Hidráulica Practica*, Limusa. Noriega

Soria JM, Miracle MR, Vicente E (1987): Aporte de nutrientes y eutrofización de la Albufera de Valencia. *Limnetica* 3, 227-242

Soria JM, Vicente E (2002): Estudio de los aportes hídricos al parque natural de la Albufera de Valencia. *Limnetica* 21, 105-115

Soto F.; García M.; de Luis E. y Becares. E. (1999). Role of *Scirpus lacustres* in bacterial and nutrient removal from wastewater. *Wat. Sci. Tech.*; 40(3), 241-247.

Tanner C. y Sukias J. (1995). Accumulation of organic solids in gravel. Bed constructed wetlands. *Wat. Sci. Tech.*, 32 (3), 229-239.

USEPA, (1988). *Design Manual: Constructed Wetlands and Aquatic Plant Systems for Municipal Wastewater Treatment*. EPA 625/1-88/022,83 pp.

U.S.E.P.A (2005). *Procedures for the derivation of Equilibrium Partitioning Sediment Benchmarks (ESBs) for the protection of benthic organisms: metal mixtures (Cadmium, Copper, Lead, Nickel, Silver and Zinc)*. EPA-600-R-02-011. Office of Research and Development. Washington DC 20460.

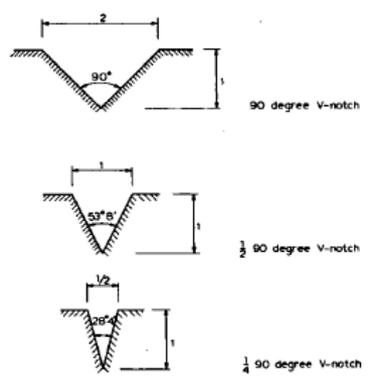
Vymazal J. y Maza, M. (2003). Horizontal sub-surface flow constructed wetland with pulsing water level. *Wat. Sci. Tech.*; 48(5), 143-148

## ANEJO I. Tablas de medición de caudal en vertederos.

Table 5.4 Discharges for V-notch sharp-crested weirs for heads in metres (adapted from ISO/TC 113/GT 2 (France-10) 1971)

Head Discharge l/sec				Head Discharge l/sec				Head Discharge l/sec				Head Discharge l/sec			
metre	90°	1/2 90°	1/4 90°	metre	90°	1/2 90°	1/4 90°	metre	90°	1/2 90°	1/4 90°	metre	90°	1/2 90°	1/4 90°
0.050	0.803	0.406	0.215	0.100	4.420	2.249	1.161	0.150	12.066	6.130	3.140	0.200	24.719	12.506	6.379
0.051	0.843	0.427	0.225	0.101	4.530	2.305	1.190	0.151	12.267	6.231	3.192	0.201	25.208	12.662	6.458
0.052	0.884	0.448	0.236	0.102	4.641	2.362	1.219	0.152	12.471	6.334	3.245	0.202	25.339	12.819	6.537
0.053	0.926	0.469	0.247	0.103	4.754	2.420	1.249	0.153	12.676	6.437	3.297	0.203	25.652	12.977	6.617
0.054	0.970	0.491	0.259	0.104	4.869	2.478	1.278	0.154	12.883	6.542	3.350	0.204	25.969	13.136	6.698
0.055	1.015	0.514	0.271	0.105	4.985	2.537	1.309	0.155	13.093	6.648	3.404	0.205	26.288	13.296	6.780
0.056	1.061	0.537	0.283	0.106	5.103	2.598	1.339	0.156	13.304	6.755	3.458	0.206	26.610	13.457	6.862
0.057	1.108	0.561	0.295	0.107	5.222	2.659	1.371	0.157	13.517	6.863	3.513	0.207	26.934	13.620	6.944
0.058	1.156	0.586	0.308	0.108	5.344	2.720	1.402	0.158	13.732	6.971	3.568	0.208	27.261	13.784	7.028
0.059	1.206	0.611	0.321	0.109	5.467	2.783	1.434	0.159	13.950	7.081	3.624	0.209	27.590	13.949	7.111
0.060	1.257	0.637	0.334	0.110	5.592	2.847	1.466	0.160	14.169	7.192	3.680	0.210	27.921	14.115	7.196
0.061	1.309	0.663	0.348	0.111	5.719	2.911	1.499	0.161	14.391	7.304	3.737	0.211	28.254	14.282	7.281
0.062	1.362	0.691	0.362	0.112	5.847	2.976	1.533	0.162	14.614	7.417	3.794	0.212	28.588	14.450	7.366
0.063	1.417	0.718	0.376	0.113	5.977	3.042	1.566	0.163	14.840	7.531	3.852	0.213	28.924	14.620	7.453
0.064	1.473	0.747	0.391	0.114	6.108	3.109	1.601	0.164	15.067	7.646	3.911	0.214	29.264	14.794	7.539
0.065	1.530	0.776	0.406	0.115	6.242	3.177	1.635	0.165	15.297	7.762	3.969	0.215	29.607	14.964	7.627
0.066	1.588	0.806	0.421	0.116	6.377	3.246	1.670	0.166	15.529	7.879	4.029	0.216	29.953	15.138	7.715
0.067	1.648	0.836	0.437	0.117	6.514	3.315	1.706	0.167	15.763	7.998	4.089	0.217	30.301	15.313	7.803
0.068	1.710	0.867	0.453	0.118	6.653	3.386	1.742	0.168	15.999	8.117	4.149	0.218	30.651	15.489	7.893
0.069	1.772	0.899	0.470	0.119	6.793	3.457	1.778	0.169	16.237	8.237	4.210	0.219	31.004	15.666	7.982
0.070	1.836	0.932	0.486	0.120	6.935	3.529	1.815	0.170	16.477	8.358	4.272	0.220	31.359	15.844	8.073
0.071	1.901	0.965	0.503	0.121	7.079	3.602	1.853	0.171	16.719	8.481	4.334	0.221	31.717	16.024	8.164
0.072	1.967	0.999	0.521	0.122	7.224	3.667	1.891	0.172	16.964	8.604	4.397	0.222	32.077	16.204	8.255
0.073	2.035	1.033	0.539	0.123	7.372	3.751	1.929	0.173	17.210	8.728	4.460	0.223	32.439	16.386	8.347
0.074	2.105	1.069	0.557	0.124	7.522	3.827	1.968	0.174	17.459	8.854	4.524	0.224	32.803	16.570	8.441
0.075	2.176	1.105	0.575	0.125	7.673	3.904	2.007	0.175	17.709	8.980	4.588	0.225	33.168	16.754	8.535
0.076	2.248	1.141	0.594	0.126	7.827	3.982	2.046	0.176	17.963	9.108	4.653	0.226	33.535	16.940	8.629
0.077	2.322	1.179	0.613	0.127	7.982	4.060	2.086	0.177	18.219	9.237	4.718	0.227	33.907	17.127	8.724
0.078	2.397	1.217	0.633	0.128	8.139	4.140	2.127	0.178	18.478	9.367	4.784	0.228	34.282	17.315	8.819
0.079	2.473	1.256	0.653	0.129	8.298	4.220	2.168	0.179	18.738	9.497	4.851	0.229	34.659	17.504	8.915
0.080	2.551	1.296	0.673	0.130	8.458	4.302	2.209	0.180	19.001	9.629	4.918	0.230	35.039	17.695	9.011
0.081	2.630	1.336	0.694	0.131	8.621	4.384	2.251	0.181	19.265	9.762	4.986	0.231	35.421	17.886	9.108
0.082	2.710	1.377	0.715	0.132	8.785	4.467	2.294	0.182	19.531	9.896	5.054	0.232	35.806	18.079	9.207
0.083	2.792	1.419	0.737	0.133	8.951	4.551	2.337	0.183	19.800	10.032	5.122	0.233	36.193	18.274	9.306
0.084	2.876	1.462	0.759	0.134	9.119	4.636	2.380	0.184	20.071	10.168	5.192	0.234	36.582	18.469	9.405
0.085	2.961	1.505	0.781	0.135	9.289	4.722	2.424	0.185	20.345	10.305	5.261	0.235	36.974	18.666	9.504
0.086	3.048	1.549	0.803	0.136	9.461	4.809	2.468	0.186	20.621	10.444	5.332	0.236	37.369	18.864	9.605
0.087	3.136	1.594	0.826	0.137	9.634	4.897	2.513	0.187	20.899	10.584	5.403	0.237	37.766	19.063	9.706
0.088	3.225	1.640	0.850	0.138	9.810	4.986	2.559	0.188	21.180	10.726	5.475	0.238	38.166	19.263	9.808
0.089	3.316	1.686	0.874	0.139	9.987	5.075	2.604	0.189	21.463	10.867	5.547	0.239	38.568	19.465	9.910
0.090	3.409	1.734	0.898	0.140	10.167	5.166	2.651	0.190	21.748	11.010	5.620	0.240	38.973	19.668	10.013
0.091	3.503	1.782	0.922	0.141	10.348	5.258	2.697	0.191	22.034	11.155	5.693	0.241	39.380	19.872	10.116
0.092	3.598	1.830	0.947	0.142	10.532	5.351	2.744	0.192	22.322	11.300	5.766	0.242	39.790	20.079	10.220
0.093	3.696	1.880	0.973	0.143	10.717	5.444	2.792	0.193	22.612	11.447	5.841	0.243	40.202	20.287	10.325
0.094	3.795	1.930	0.998	0.144	10.904	5.539	2.840	0.194	22.906	11.595	5.916	0.244	40.617	20.496	10.430
0.095	3.895	1.981	1.025	0.145	11.093	5.635	2.889	0.195	23.203	11.743	5.992	0.245	41.034	20.705	10.536
0.096	3.997	2.033	1.051	0.146	11.284	5.732	2.938	0.196	23.501	11.893	6.068	0.246	41.454	20.916	10.642
0.097	4.101	2.086	1.078	0.147	11.476	5.830	2.988	0.197	23.802	12.044	6.145	0.247	41.877	21.127	10.750
0.098	4.206	2.139	1.106	0.148	11.671	5.929	3.038	0.198	24.106	12.197	6.222	0.248	42.302	21.340	10.858
0.099	4.312	2.194	1.133	0.149	11.867	6.029	3.089	0.199	24.411	12.351	6.300	0.249	42.730	21.555	10.967

Head Discharge l/sec				Head Discharge l/sec				Head Discharge l/sec			
metre	90°	1/2 90°	1/4 90°	metre	90°	1/2 90°	1/4 90°	metre	90°	1/2 90°	1/4 90°
0.250	43.160	21.772	11.077	0.300	68.106	34.268	17.410	0.350	100.19	50.313	25.512
0.251	43.593	21.990	11.187	0.301	68.675	34.552	17.555	0.351	100.91	50.672	25.693
0.252	44.028	22.209	11.299	0.302	69.246	34.837	17.700	0.352	101.63	51.033	25.875
0.253	44.466	22.429	11.410	0.303	69.821	35.124	17.845	0.353	102.36	51.397	26.057
0.254	44.907	22.649	11.523	0.304	70.398	35.412	17.992	0.354	103.08	51.758	26.240
0.255	45.350	22.873	11.635	0.305	70.980	35.702	18.139	0.355	103.81	52.121	26.424
0.256	45.796	23.098	11.749	0.306	71.568	35.995	18.287	0.356	104.54	52.487	26.609
0.257	46.245	23.323	11.863	0.307	72.159	36.290	18.435	0.357	105.28	52.856	26.794
0.258	46.696	23.549	11.978	0.308	72.750	36.585	18.585	0.358	106.02	53.227	26.981
0.259	47.150	23.777	12.094	0.309	73.341	36.880	18.735	0.359	106.77	53.596	27.168
0.260	47.606	24.005	12.210	0.310	73.936	37.177	18.885	0.360	107.52	53.967	27.355
0.261	48.065	24.235	12.326	0.311	74.534	37.477	19.037	0.361	108.27	54.340	27.544
0.262	48.527	24.466	12.443	0.312	75.135	37.779	19.189	0.362	109.02	54.717	27.733
0.263	48.991	24.699	12.561	0.313	75.738	38.081	19.342	0.363	109.78	55.096	27.923
0.264	49.458	24.933	12.680	0.314	76.344	38.384	19.495	0.364	110.54	55.473	28.114
0.265	49.928	25.168	12.799	0.315	76.954	38.687	19.650	0.365	111.30	55.852	28.306
0.266	50.400	25.404	12.920	0.316	77.566	38.995	19.805	0.366	112.06	56.231	28.498
0.267	50.876	25.642	13.041	0.317	78.181	39.304	19.960	0.367	112.84	56.616	28.691
0.268	51.353	25.881	13.162	0.318	78.802	39.615	20.117	0.368	113.62	57.003	28.885
0.269	51.834	26.121	13.284	0.319	79.428	39.927	20.274	0.369	114.39	57.391	29.080
0.270	52.317	26.363	13.407	0.320	80.057	40.241	20.432	0.370	115.17	57.780	29.275
0.271	52.802	26.606	13.529	0.321	80.685	40.553	20.590	0.371	115.95	58.171	29.472
0.272	53.291	26.851	13.653	0.322	81.314	40.867	20.750	0.372	116.73	58.560	29.669
0.273	53.782	27.098	13.778	0.323	81.947	41.184	20.910	0.373	117.52	58.950	29.867
0.274	54.276	27.347	13.903	0.324	82.583	41.503	21.071	0.374	118.31	59.345	30.065
0.275	54.772	27.596	14.030	0.325	83.222	41.824	21.232	0.375	119.11	59.742	30.264
0.276	55.272	27.845	14.157	0.326	83.863	42.147	21.395	0.376	119.91	60.141	30.465
0.277	55.774	28.097	14.284	0.327	84.508	42.471	21.558	0.377	120.71	60.542	30.666
0.278	56.282	28.351	14.413	0.328	85.155	42.796	21.721	0.378	121.52	60.944	30.867
0.279	56.794	28.607	14.542	0.329	85.806	43.123	21.886	0.379	122.32	61.346	31.070
0.280	57.306	28.863	14.671	0.330	86.459	43.451	22.051	0.380	123.13	61.747	31.273
0.281	57.819	29.119	14.802	0.331	87.116	43.779	22.217	0.381	123.94	62.150	31.477
0.282	58.335	29.377	14.933	0.332	87.775	44.107	22.384				
0.283	58.853	29.638	15.065	0.333	88.438	44.438	22.551				
0.284	59.375	29.901	15.197	0.334	89.103	44.773	22.719				
0.285	59.899	30.163	15.330	0.335	89.772	45.108	22.888				
0.286	60.425	30.427	15.464	0.336	90.448	45.446	23.058				
0.287	60.955	30.691	15.598	0.337	91.128	45.785	23.228				
0.288	61.487	30.959	15.734	0.338	91.811	46.125	23.400				
0.289	62.023	31.229	15.870	0.339	92.491	46.467	23.572				
0.290	62.560	31.499	16.006	0.340	93.175	46.810	23.744				
0.291	63.101	31.769	16.143	0.341	93.862	47.153	23.910				
0.292	63.645	32.040	16.281	0.342	94.551	47.497	24.092				
0.293	64.195	32.315	16.420	0.343	95.244	47.842	24.267				
0.294	64.748	32.591	16.559	0.344	95.940	48.191	24.442				
0.295	65.303	32.869	16.699	0.345	96.638	48.542	24.619				
0.296	65.858	33.146	16.840	0.346	97.340	48.895	24.796				
0.297	66.416	33.424	16.982	0.347	98.045	49.249	24.974				
0.298	66.976	33.704	17.124	0.348	98.753	49.604	25.152				
0.299	67.539	33.985	17.267	0.349	99.471	49.958	25.332				



Note: The number of significant figures given for the discharge does not imply a corresponding accuracy in the knowledge of the value given.

## ANEJO II. Catálogo del Minimolnete.

### Minimolnete M1

El **minimolnete M1 de SEBA** sirve para medir la velocidad de la corriente del agua en laboratorios, modelos, arroyos, ríos y canales con reducido nivel de agua, así como en tuberías de pequeño diámetro.

**Ventajas especiales:**

- empleo universal
- baja velocidad de arranque
- transmisión de muy baja fricción
- realizado en materiales totalmente anticorrosivos
- sistema modular

**Descripción:**

El equipo completo está constituido por el molinete propiamente dicho, la barra-soporte con pie, cable y la caja-contador de impulsos (fig.7).



**Dimensión y rango de medida de las hélices**

diámetro	paso de la hélice	velocidad máx. con caja-contador Z1	velocidad de arranque
50 mm	250 mm	2,5 m/s	0,03 m/s
50 mm	500 mm	5,0 m/s	0,05 m/s
50 mm	100 mm	2,5 m/s	0,025 m/s
50 mm	50 mm	1,0 m/s	0,025 m/s
30 mm	100 mm	2,5 m/s	0,03 m/s
30 mm	50 mm	1,0 m/s	0,03 m/s

**Determinación de la velocidad de la corriente**

Se recomienda el tarado del minimolnete con la hélice correspondiente, a fin de poder determinar la velocidad de la corriente de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$V = k \cdot n + \Delta$$

donde:

V = velocidad de la corriente (m/s)

k = paso hidráulico de la hélice (m) \*

n = revoluciones de la hélice por segundo

Δ = constante del molinete (m/s) \*

\*) determinados mediante ensayos en canal de tarado

**Maleta de instrumentos**

El minimolnete, con piezas de re- cambio y accesorios pero sin contador, se conserva en una maleta realizada en aluminio y resistente a la intemperie, con compartimentos individuales de plástico para cada una de las piezas. (fig. 8)

Dimensiones: 553 x 225 x 90 mm

Peso: 3,2 kg

**Piezas de recambio**

Dos rodamientos de bolas especiales, aceite para el molinete, herramientas tales como destornillador y llave especial.

**Accesorios**

Hélices, barra-soporte con pie, 4m de cable de unión, pinza especial para sujeción a barra-soporte de 20mm de diámetro y pieza para desplazamiento.



fig. 7: Mini molinete M1 sobre barra 9 mm dia.

fig.8: caja de transporte

El minimolnete M1 de SEBA es de empleo universal, pero a pesar de ello no puede sustituir completamente a un molinete de tamaño mayor.

### ANEJO III. COMPARACION DATOS HIDROCLIMÁTICOS ESTACION PICASSENT vs. TANCAT DE LA PIPA.

En las tablas a continuación, se presentan los datos registrados en las estaciones agroclimáticas durante el periodo en estudio, se resaltan el amarillo las fechas para las cuales se disponía tanto de valores de Picassent como del Tancat, en las cuales se compararon los valores y a partir de las que se calculó la desviación estándar.

**Tabla 34.** Comparación datos hidrológicos, de la estación agroclimática de Picassent y del Tancat de la Pipa.

Fecha	P (mm) PICASSENT	P (mm) TANCAT	ETo (mm) PICASSENT	ETo (mm) TANCAT		T °C PICASSENT	T °C TANCAT	
09/06/2009			6,20	5,05	21%	22,4		
10/06/2009			6,50	6,35	0%	23,9	23,29	2%
11/06/2009			6,40	6,26	0%	23,8	22,71	5%
12/06/2009			5,60	5,54	0%	22,5	22,51	0%
13/06/2009			5,30	5,48	1%	23,1	23,09	0%
14/06/2009			5,30	5,68	3%	24	24,64	2%
15/06/2009			5,20	4,87	2%	24	23,75	0%
16/06/2009			4,50	4,87	3%	23,9	24,08	0%
17/06/2009			5,40	5,51	0%	23,3	23,42	0%
18/06/2009			5,60	5,62	0%	23,9	23,86	0%
19/06/2009			5,60	5,79	1%		24,98	
20/06/2009			5,40	5,56	0%		24,43	
21/06/2009			5,30	5,72	3%		23,14	
22/06/2009			5,40	5,75	2%		24,09	
23/06/2009			5,00	5,63	8%		23,47	
24/06/2009			5,90	5,88	0%		23,67	
25/06/2009			5,90	5,83	0%		24,20	
26/06/2009			6,70	6,9	1%		25,94	
27/06/2009			5,40	5,67	1%		24,03	
28/06/2009			5,40	5,58	1%		24,28	
29/06/2009			5,70	5,24	4%		24,34	
30/06/2009			5,80	5,7	0%		24,88	
01/07/2009			6,20	6,09	0%		25,14	
02/07/2009			5,50	5,17	2%		25,47	
03/07/2009			5,40	5,28	0%		25,83	
04/07/2009			6,00	5,83	0%		25,48	
05/07/2009			5,90	5,41	4%		25,56	
06/07/2009			5,40	4,93	4%		26,16	
07/07/2009			5,00	5,2	1%		25,92	
08/07/2009	24,90	24,90	1,70	3,13	120%		24,21	
09/07/2009	0,25	0,25	3,50	4,27	17%		24,42	0%
10/07/2009			5,40	5,38	0%		25,55	
11/07/2009			5,40	5,48	0%		25,91	
12/07/2009			5,90	5,74	0%		25,79	
13/07/2009			5,70	5,6	0%		25,88	
14/07/2009			4,30	4	2%		25,64	
15/07/2009			2,20	5,21	412%		25,51	

16/07/2009				4,80	5,32	6%	26,13
17/07/2009				7,60	6,54	15%	26,95
18/07/2009				5,80	7,53	52%	23,13
19/07/2009				5,60	6	3%	22,98
20/07/2009				5,00	5,13	0%	24,31
21/07/2009				4,50	3,97	6%	24,38
22/07/2009				4,90	4,45	4%	26,09
23/07/2009				8,20	7,98	1%	29,65
24/07/2009				7,40	6,42	13%	27,68
25/07/2009				4,00	5,4	49%	25,70
26/07/2009				5,40	5,73	2%	25,64
27/07/2009				5,60	5,36	1%	25,65
28/07/2009				4,90	5,84	18%	25,94
29/07/2009				7,00	6,04	13%	26,53
30/07/2009				4,90	5,64	11%	26,42
31/07/2009				5,10	5,21	0%	25,34
01/08/2009				5,80	5,53	1%	26,23
02/08/2009				5,50	5,52	0%	26,18
03/08/2009				5,00	5,15	0%	26,13
04/08/2009				5,40	4,99	3%	26,52
05/08/2009				5,30	5,37	0%	25,90
06/08/2009				5,40	5,32	0%	26,33
07/08/2009				4,30	4,64	3%	25,83
08/08/2009				4,50	4,81	2%	26,37
09/08/2009				3,00	2,85	1%	24,64
10/08/2009	0,25	0,25	0%	2,20	2,67	10%	23,42
11/08/2009	0,25	0,25	0%	3,30	3,64	4%	24,55
12/08/2009				4,80	4,78	0%	24,89
13/08/2009				5,30	5,30	0%	25,25
14/08/2009				5,30	5,54	1%	26,25
15/08/2009				5,30	5,53	1%	25,69
16/08/2009				5,40	5,53	0%	25,33
17/08/2009				5,70	5,75	0%	26,22
18/08/2009				4,80	4,98	1%	25,56
19/08/2009				5,10	5,32	1%	25,57
20/08/2009				5,40	5,63	1%	25,94
21/08/2009				5,00	4,90	0%	26,10
22/08/2009				5,00	5,12	0%	26,11
23/08/2009				5,00	5,41	3%	26,17
24/08/2009				5,20	5,15	0%	26,06
25/08/2009				4,20	3,74	5%	26,33
26/08/2009				4,00	4,61	9%	25,33
27/08/2009				4,70	4,62	0%	26,03
28/08/2009				4,80	4,55	1%	26,11
29/08/2009				4,30	3,94	3%	26,30
30/08/2009				4,40	4,78	3%	26,51
31/08/2009				5,10	5,00	0%	26,67
01/09/2009				4,70	4,67	0%	26,47
02/09/2009				4,10	4,54	5%	26,21
03/09/2009				5,90	5,83	0%	27,03
04/09/2009				4,70	4,77	0%	25,15
05/09/2009	14,70	14,70	0%	2,00	1,94	0%	23,24
06/09/2009	8,64	8,64	0%	2,80	3,87	41%	23,94
07/09/2009				3,30	4,04	17%	24,71

08/09/2009				3,70	4,98	44%		24,22	
09/09/2009				3,90	4,57	12%		23,15	
10/09/2009				4,50	4,84	3%		23,39	
11/09/2009				3,80	4,36	8%		23,48	
12/09/2009				3,80	4,25	5%		23,27	
13/09/2009	0,51	0,51	0%	3,10	3,54	6%		22,38	
14/09/2009	2,53	2,53	0%	3,40	0,03	334%		22,30	
15/09/2009	24,64	24,64	0%	2,10	2,68	16%	18,7	20,41	16%
16/09/2009	7,36	7,36	0%	2,00	3,02	52%	17,1	18,47	11%
17/09/2009	23,12	23,12	0%	2,00	3,76	155%	17,2	18,66	12%
18/09/2009				2,00	3,57	123%	17,8	19,42	15%
19/09/2009	1,52	1,52	0%	2,00	5,08	474%	21	21,54	1%
20/09/2009				2,00	3,07	57%	19,3	20,66	10%
21/09/2009				2,00	4,06	212%	18,9	19,69	3%
22/09/2009	27,93	27,93	0%	2,00	3,17	68%	20,7	21,10	1%
23/09/2009	49,50	49,50	0%	2,00	8,16	1897%	18,3	20,93	38%
24/09/2009				2,00	3,88	177%	20,9	21,95	5%
25/09/2009				3,80	4,53	14%	21,5	22,03	1%
26/09/2009				2,30	3,14	31%	20,1	21,35	8%
27/09/2009				2,30	3,59	72%	19,9	21,56	14%
28/09/2009				1,00	1,09	1%	17,5	19,65	26%
29/09/2009				1,00	0,87	2%	17,7	18,84	7%
30/09/2009	0,25	0,25	0%	2,00	2,04	0%	19,1	20,24	7%
01/10/2009				2,80	3,13	4%	19,9	21,39	11%
02/10/2009				3,20	3,85	13%	21	21,89	4%
03/10/2009				2,80	3,42	14%	19,7	21,43	15%
04/10/2009	0,25	0,25	0%	2,90	3,41	9%	20,3	21,86	12%
05/10/2009				2,70	3,19	9%	20,2	21,84	13%
06/10/2009	0,20			2,70	3,11	6%	20,9	22,19	8%
07/10/2009				1,80	2,35	17%	20,9	22,23	8%
08/10/2009				2,90	3,08	1%	22,6	24,22	12%
09/10/2009				2,70	3,40	18%	20,7	22,53	16%
10/10/2009				2,20	2,54	5%	20,1	21,78	14%
11/10/2009	0,20			2,60	3,67	44%	19,7	21,73	21%
12/10/2009				2,60	3,53	33%	19,8	21,12	9%
13/10/2009				2,40	3,32	35%	18,8	21,62	42%
14/10/2009				2,40	3,27	32%	18,7	20,46	17%
15/10/2009	4,06	4,06	0%	1,40	1,95	22%	17,4	19,72	31%
16/10/2009	4,55	4,55	0%	1,30	7,94	3392%	14,1	16,51	41%
17/10/2009	0,25	0,25	0%	2,10	2,80	23%	15,3	16,65	12%
18/10/2009	0,76	0,76	0%	1,50	1,78	5%	14,2	16,15	27%
19/10/2009	0,25	0,25	0%	1,70	2,43	31%	14,9	16,75	23%
20/10/2009				1,30	1,87	25%	16,1	18,28	30%
21/10/2009	0,25	0,25	0%	2,00	4,05	210%		18,48	
22/10/2009	5,06	5,06	0%	2,00	2,99	49%		18,48	
23/10/2009				3,60	4,46	21%	18,6	19,63	6%
24/10/2009				3,30	4,03	16%	21,1	22,09	5%
25/10/2009				2,20	2,95	26%	20,3	20,79	1%
26/10/2009				1,90	2,71	35%	19	20,83	18%
27/10/2009				1,70	2,60	48%	18,1	19,76	15%
28/10/2009				1,40	1,74	8%	18,5	20,78	28%
29/10/2009				1,70	2,47	35%	17,5	19,19	16%
30/10/2009				1,90	2,43	15%	18,7	20,14	11%
31/10/2009	0,25	0,25	0%	1,50	1,75	4%	17,9	19,50	14%

01/11/2009			1,60	2,00	10%	18,3	19,94	15%
02/11/2009			2,10	3,53	97%		21,60	
<b>Fecha</b>	<b>P (mm) PICASSENT</b>	<b>P (mm) TANCAT</b>	<b>ETo (mm) PICASSENT</b>	<b>ETo (mm) TANCAT</b>		<b>T °C PICASSENT</b>	<b>T °C TANCAT</b>	
SUMA	161,45	161,45	0,00	595,30	658,12	90,03	681,00	736,85
DESVEST			0,00			3,24		0,11
MIN	0,20	0,25	0,00	1,00	0,03	0,00	14,10	16,15
MAX	49,50	49,50	0,00	8,20	8,16	33,92	24,00	29,65

En las gráficas a continuación se presentan los valores de Precipitación (m.m.), Evapotranspiración (m.m.) y Temperatura media registrados tanto para la estación agroclimática de Picassent como los obtenidos de las mediciones en el Tancat de la Pipa, en el periodo comprendido entre el 9 de Junio y el 2 de Noviembre de 2009.

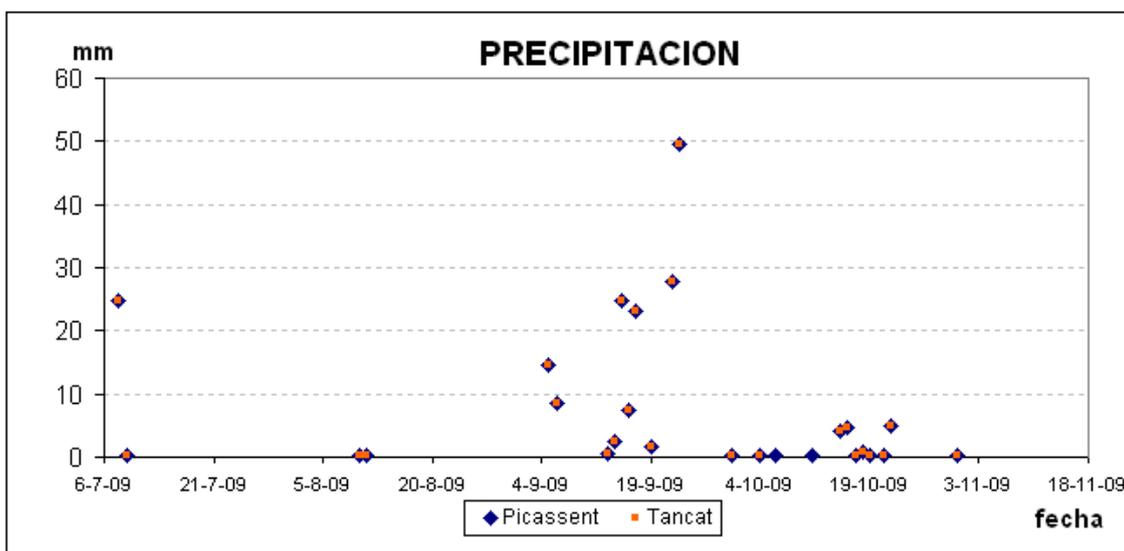


Figura 61. Precipitación Picassent vs. Tancat de la Pipa

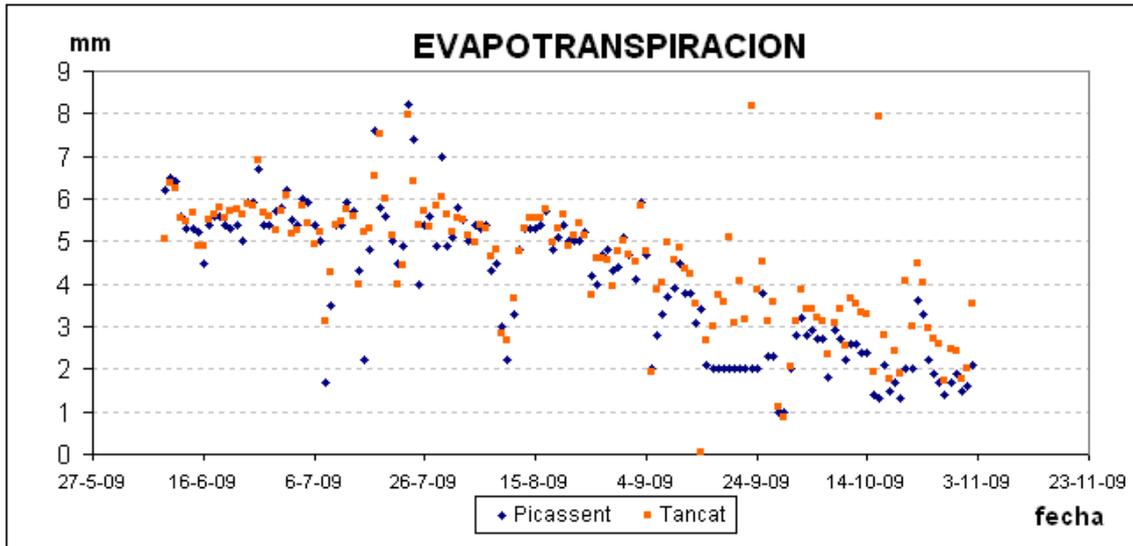


Figura 62. Evapotranspiración Picassent vs. Tancat de la Pipa

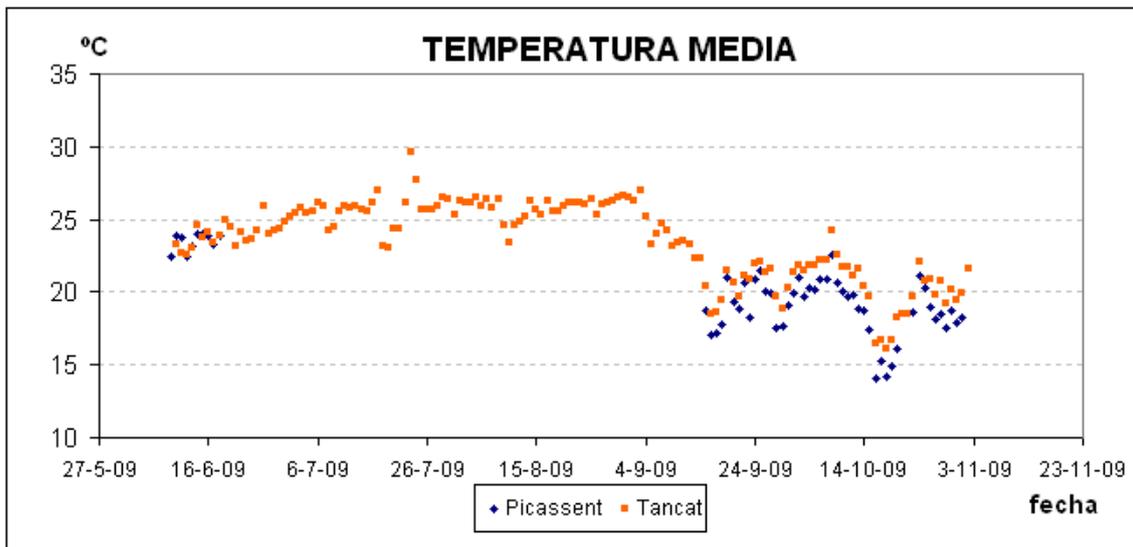


Figura 63. Temperatura media Picassent vs. Tancat de la Pipa

Como se observa en las gráficas anteriores, las series de datos registradas en la estación agroclimática de Picassent y los datos registrados con los equipos instalados en el Tancat, son muy similares.

Considerando que se dispone de mayor número de datos de la estación de Picassent, se define que los valores de las variables hidrológicas a utilizar en el presente estudio, serán los provenientes de Picassent.

## ANEJO IV. CONDUCTIVIDADES MEDIDAS, EN LA CAMPAÑA DE MUESTREOS EN LOS FILTROS VERDES DEL TANCAT DE LA PIPA.

En la Tabla a continuación se presentan los valores de conductividad medidas en las rutas trazadas para seguimiento del sistema de Filtros Verdes, ver Figuras 47, 48 y 49.

**Tabla 35.** Conductividades medidas en la campaña de muestreos.

Fecha	Entrada F1 y F1p (mS/cm) Pto 1	Entrada F4 (mS/cm) Pto 8B	Salida F1 (mS/cm) Pto 2	Salida F1p (mS/cm) Pto 3	Salida F2 (mS/cm) Pto 4	Salida F2p (mS/cm) Pto 5	Salida F3 (mS/cm) Pto 6	Salida F3p (mS/cm) Pto 7	Salida F4 (mS/cm) Pto 8
06/04/2009	1474	1474	1060	1170	1287	1062	2900	1562	1170
21/04/2009	1460	1447	1210	1362	1380	1880	4230	1999	1366
04/05/2009	1744	1733	1637	1673	1740	1870	3140	1963	1766
18/05/2009	2470	2030	1590	2150	1860	1516	2360	1762	1820
01/06/2009	3000	2660	3080	2620	2990	3050			2800
15/06/2009	3000	2660	2950	2950	3160	3100	4150	4140	
29/06/2009	3070	2660	3310	3310	3470	3410	3950	3810	
13/07/2009	1516	1629	2000	1891	2600	2630	3330	3140	2210
27/07/2009	2250	2560	2230	2340	2220	2400	2210	2320	2660
10/08/2009	2330	2540	2480	2630	2590	2710	2640	2660	2870
24/08/2009	2290	2540	2410	2450	2410	2690	2270	2560	2630
07/09/2009	2020	2220	2170	2190	2210	2250	2230	2190	2190
21/09/2009	1215	1157	1289	1191	1744	1435	1749	1421	1260
07/10/2009	837	1165	1250	1289	790	1340	903	1191	1309
19/10/2009	1218	1257							1556
09/11/2009	1537	1496			1535		1590		1516
16/11/2009	1511	1531			1570		1593		1560

Fecha	Entrada F1 y F1p (mS/cm) Pto 1	Entrada F4 (mS/cm) Pto 8B	Salida F1 (mS/cm) Pto 2	Salida F1p (mS/cm) Pto 3	Salida F2 (mS/cm) Pto 4	Salida F2p (mS/cm) Pto 5	Salida F3 (mS/cm) Pto 6	Salida F3p (mS/cm) Pto 7	Salida F4 (mS/cm) Pto 8
30/11/2009	1874	2050	1890	1905	1874	1912	2050	2430	2070
16/12/2009	1219	2490	1663	1802	1753	1850	1848	1883	1900
28/12/2009	1833	1874	1515	1600	1395	1600	1633	1866	1798
12/01/2010	1886	1874	2060	1910	1705	1863	1608	1995	
25/01/2010	1782	1791	1786	1789	1810	1791	1970	1875	1800
10/02/2010	1595	1597	1578	1569	1583	1586	1682		1640
22/02/2010	1323	1597	1508	1670	1422	1910	1608	2050	
10/03/2010	1305	1965	1700	1600	1329	1375	1340	1970	1723
22/03/2010	1327	1453	1375	1433	1528	1588	1689	1724	1514
06/04/2010	1359	1506	1401	1482	1369	1421	1416	1546	1488