

**INFLUENCIA DEL ESTADO FISICO DE LA MATERIA ORGANICA EN LA  
EFICIENCIA DE HUMEDALES CONSTRUIDOS DE FLUJO SUBSUPERFICIAL**

**ANGELICA CORZO HERNANDEZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL  
BUCARAMANGA  
2004**

**INFLUENCIA DEL ESTADO FÍSICO DE LA MATERIA ORGÁNICA EN LA  
EFICIENCIA DE HUMEDALES CONSTRUIDOS DE FLUJO SUBSUPERFICIAL**

**ANGÉLICA CORZO HERNÁNDEZ**

**Trabajo de grado para optar al título de:  
INGENIERA CIVIL**

**Director  
JOAN GARCIA SERRANO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA  
2004**

## AGRADECIMIENTOS

La realización de este trabajo ha sido posible gracias a la ayuda, colaboración y confianza de muchas personas. A ellas doy de todo corazón mi más sincero e inagotable agradecimiento.

Al doctor Joan García, tutor de esta tesis, por darme la oportunidad de desarrollar este trabajo sin conocerme, por su orientación y consejos a lo largo de todo el trabajo.

A Paula Aguirre, por su constante y desinteresada ayuda durante toda la fase experimental.

A mis compañeros de la sección de Ingeniería Ambiental, Eduardo por la ayuda en la construcción de los modelos, a Aracelly por su colaboración y compañía en la realización de los análisis, a Xavi e Inma.

A la Universidad Politécnica de Cataluña por acogerme como alumna de intercambio.

A la Universidad Industrial de Santander, especialmente a la Escuela de Ingeniería Civil, por la formación técnica, profesional y ética, sin la cual no hubiera llegado hasta aquí y la oportunidad de representarlos en este país.

A mis padres Rosalba y Jaime, a mis hermanos, Jaime Enrique y Laura Cristina, por su amor, su apoyo incondicional y su confianza en mí.

A mi príncipe, Alvaro, por querer estar a mi lado llenando mi vida de amor y felicidad en todo momento.

A Dios por permitirme ser.

## CONTENIDO

	<b>pág.</b>
INTRODUCCIÓN	1
1. OBJETIVOS	2
1.1 OBJETIVO GENERAL	2
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 HUMEDALES	4
2.2 COMPONENTES DE UN HUMEDAL DE FLUJO SUPERFICIAL	5
2.2.1 Estructuras de distribución y recogida del agua residual	6
2.2.2 Medio Granular	7
2.2.3 Plantas	7
2.3 MECANISMOS DE DEPURACIÓN BIOLÓGICA	9
2.3.1 Materia Orgánica	10
2.3.2 Materia en suspensión	10
2.3.3 Nitrógeno	11
2.3.4 Fósforo	12
2.4 LA MATERIA ORGÁNICA EN LOS HUMEDALES	13
2.4.1 Composición	13
2.4.2 Estado Físico	13

2.4.3 Degradación	14
2.4.4 Compuestos orgánicos biodegradables	16
2.4.5 Métodos de Análisis de la Materia orgánica	16
2.4.6 Rendimientos de eliminación en humedales construidos de flujo subsuperficial	18
2.5 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE DATOS	18
2.5.1 Estadística Básica	18
2.5.2 La Distribución normal	20
2.5.3 La prueba Chi-cuadrado de bondad de ajuste	22
2.5.4 Prueba de hipótesis con respecto a las medias mediante la distribución t de Student	23
3. MATERIALES Y MÉTODOS	25
3.1 DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS	25
3.1.1 Dimensiones	27
3.1.2 Material granular y plantas	27
3.1.3 Tipo de reactor. Alimentación del humedal y sistema de recogida del efluente	28
3.1.4 Caudal diario de agua residual afluente	29
3.2 COMPOSICIÓN DEL AGUA RESIDUAL SINTÉTICA	30
3.2.1 Humedal 1	30
3.2.2 Humedal 2	32
3.3 ESTUDIO EXPERIMENTAL	34
3.3.1 Rutina diaria	34
3.3.2 Parámetros analizados	34
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	45
4.1 PARÁMETROS DE CONTROL	45
4.1.1 Temperatura	45

4.1.2 Turbiedad	47
4.1.3 Transmitancia	50
4.1.4 Conductividad Eléctrica	53
4.1.5 Amonio	55
4.2 ELIMINACIÓN DE MATERIA ORGÁNICA	59
4.2.1 Humedal 1 (Glucosa)	59
4.2.2 Humedal 2 (Almidón)	59
4.2.3 Comparación de los rendimientos de eliminación de la materia orgánica	60
4.3 DISCUSIÓN DE RESULTADOS	62
5. CONCLUSIONES	67
6. RECOMENDACIONES	69
BIBLIOGRAFIA	70
ANEXOS	72

## LISTA DE FIGURAS

	<b>pág.</b>
Figura 1. Tipologías de Humedales construídos	5
Figura 2. Componentes de un humedal construído de flujo subsuperficial	6
Figura 3. Planta emergente usada en humedales	8
Figura 4. Especies vegetales utilizadas en humedales construidos de flujo subsuperficial	9
Figura 5. Procesos de depuración de aguas residuales urbanas	10
Figura 6. Modelos de humedales de flujo subsuperficial	26
Figura 7. Dimensiones de los modelos	27
Figura 8. Alimentación del humedal y recogida del efluente	29
Figura 9. Evaluación de DQO con diferentes concentraciones de Almidón	33
Figura 10. Equipo para ensayo de DQO	35
Figura 11. Equipo para medición de Amonio	38
Figura 12. Turbidímetro	40
Figura 13. Transmisión de un haz de luz	41
Figura 14. Espectrofotómetro	42

Figura 15.	Termómetro	43
Figura 16.	Conductivímetro	44
Figura 17.	Evolución de la Temperatura en humedales 1 y 2	46
Figura 18.	Evolución de la Turbiedad en humedal 1 (Glucosa)	48
Figura 19.	Evolución de la Turbiedad en humedal 2 (Almidón)	49
Figura 20.	Evolución de la Transmitancia en humedal 1 (Glucosa)	51
Figura 21.	Evolución de la Transmitancia en humedal 2 (Almidón)	52
Figura 22.	Evolución de la Conductividad en humedal 1 (Glucosa)	54
Figura 23.	Evolución de la Conductividad en humedal 2 (Almidón)	55
Figura 24.	Evolución del Amonio en humedal 1 (Glucosa)	57
Figura 25.	Evolución del Amonio en humedal 2 (Almidón)	58
Figura 26.	Evolución de la DQO en humedal 1 (Glucoa9	60
Figura 27.	Evolución de la DQO en humedal 2 (Almidón)	61
Figura 28.	Rendimientos medios de los parámetros de control y de la eliminación de contaminantes en cada humedal	65

## LISTA DE TABLAS

	<b>pág.</b>
Tabla 1. Características de los medios granulares usados en los humedales construidos de flujo subsuperficial	7
Tabla 2. Evaluación de la DQO para diferentes concentraciones de Almidón	32
Tabla 3. Datos del muestreo realizado al afluente del humedal 1 (Glucosa)	72
Tabla 4. Datos del muestreo realizado al efluente del humedal 1 (Glucosa)	73
Tabla 5. Datos del muestreo realizado al afluente del humedal 2 (Almidón)	74
Tabla 6. Datos del muestreo realizado al efluente del humedal 2 (Almidón)	75
Tabla 7. Valores Medios y Desviación Típica en cada humedal para Afluente y Efluente	76
Tabla 8. Rendimientos de eliminación de Amonio %	77
Tabla 9. Rendimientos de eliminación de materia orgánica en %	78
Tabla 10. Rendimientos de eliminación de materia orgánica en mg O <sub>2</sub> /l	79
Tabla 11. Análisis estadístico de la Eliminación de Amonio en los humedales 1 y 2	80
Tabla 12. Análisis estadístico de la Eliminación de Materia Orgánica en los humedales.	81

## LISTA DE ANEXOS

		<b>pág.</b>
Anexo A.	Datos de los Muestreos	72
Anexo B.	Análisis estadístico de datos	80
Anexo C.	Tablas de las Distribuciones Estadísticas	84

## RESUMEN

TITULO: "INFLUENCIA DEL ESTADO FÍSICO DE LA MATERIA ORGÁNICA EN LA EFICIENCIA DE HUMEDALES CONSTRUÍDOS DE FLUJO SUPERFICIAL"\*

AUTOR: CORZO HERNÁNDEZ, Angélica\*\*

PALABRAS CLAVES: Humedales construidos de flujo superficial. Aguas Residuales. Materia Orgánica. Compuesto orgánicos biodegradables. Depuración Biológica.

### DESCRIPCIÓN:

Los humedales construidos de flujo subsuperficial son sistemas naturales para el tratamiento de aguas residuales. Sus componentes son un lecho de gravas, plantas emergentes y agua residual. En este sistema mediante la formación de una biopelícula adherida a la grava se degradan bioquímicamente los contaminantes del agua residual.

En este estudio se evalúa la influencia del estado físico de la materia orgánica en la eficiencia de estos humedales. Para tal fin, se construyeron dos modelos de humedales en laboratorio. Sus elementos principales, es decir la grava y las plantas se trajeron de los humedales construidos de flujo subsuperficial que se encuentran en la urbanización Can Suquet, ubicada en Les Franqueses del Vallés (Barcelona). Respecto a las condiciones ambientales de iluminación se construyó una estructura de luz artificial que se reguló para simular el día y la noche. Los humedales se alimentaron con aguas residuales sintéticas diferentes, una de ellas con materia orgánica en estado particulado, utilizando almidón, y la otra con materia orgánica disuelta, usando glucosa.

El trabajo experimental se centró en el análisis diario de los afluentes y efluentes, mediante la medición de la turbiedad, transmitancia, conductividad, amonio y demanda química de oxígeno. Mediante los resultados se determinó la eficiencia de cada modelo, se efectuó una comparación según el estado físico de la materia orgánica y se evaluó la influencia de dicho estado en el rendimiento de los humedales. Los resultados obtenidos, permiten concluir que el tratamiento de agua residual con materia orgánica particulada tiene menores rendimientos de depuración porque debe sufrir mayores cambios en su estado físico y químico para lograr ser degradada por la biopelícula.

Por lo tanto, para aumentar la eficiencia, se sugiere realizar un proceso anterior a los humedales que retire las partículas del agua residual como puede ser un sistema de coagulación-floculación.

---

\* Trabajo de Grado.

\*\* Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas, Escuela de Ingeniería Civil, GARCÍA SERRANO, Joan.

## ABSTRACT

TITLE: "INFLUENCE OF THE ORGANIC MATTER PHYSICAL STATE IN THE EFFICIENCY OF SURFACE-FLOW CONSTRUCTED WETLANDS" \*

AUTHOR: CORZO HERNÁNDEZ, Angélica \*\*

KEYWORDS: Surface-flow constructed wetlands. Residual waters. Organic matter. Biodegradable organic compounds. Biological depuration.

### DESCRIPTION:

The constructed wetland of subsurface flow are natural systems for the residual water treatment. Their components are a gravel bed, emergents plants and residual water. In this system by means of formation of biofilm adhered to the gravel the polluting agents of the residual water are degraded biochemically.

In this study the influence of the physic state of the organic matter in the efficiency of these humedales is evaluated. For such aim, two models of humedales in laboratory were constructed. Their main elements, are to say the gravel and the plants were engaged of the constructed wetlands of flow subsurface that are in the Can Suquet housing, located in Les Franqueses de Valles (Barcelona, north-east Spain). Respect to the environmental conditions of illumination a structure of artificial light was constructed and regulated to simulate the day and the night. The wetlands were fed with different synthetic residual waters, one of them with organic matter in particulate state, using starch, and the other with dissolved organic matter, using glucose.

The experimental work was centered in the daily analysis of the influents and effluents, by means of the measurement of the turbidity, transmittance conductivity, ammonium and chemical oxygen demand. By means of the results the efficiency of each model was determined, a comparison took place according to the physic state of the organic matter and the influence of this state in the yield of the wetlands was evaluated. The obtained results, allow to conclude that the residual water treatment with particulate organic matter has minors purification yields because must undergo greater changes in its physic and chemical state to manage to be degraded by biofilm.

Therefore, to increase the efficiency, it is suggested to make a process previous to the wetlands that remove particles of the residual water as it can be a coagulation-flocculation system.

---

\* Graduation Work.

\*\* Faculty of Physico-mechanical Engineering Sciences. School of Civil Engineering. GARCÍA SERRANO, Joan.

## INTRODUCCIÓN

Los humedales construidos son sistemas naturales de depuración que permiten tratar las aguas residuales provenientes de focos de pequeñas poblaciones. Estos sistemas debido a la sencillez de su diseño, su alta eficiencia y sus bajos costes, se han convertido en una buena opción para el tratamiento del agua residual.

Son ecosistemas con una gran productividad derivada de la combinación de sus constituyentes: el agua, la grava y las plantas, junto con la radiación solar y una alta concentración de nutrientes. Esta elevada productividad acelera la actividad microbiana y como consecuencia tienen una gran capacidad para descomponer la materia orgánica y reciclar elementos.

Este tipo de tratamiento de depuración se ha difundido en Europa, Australia y América del Norte en los últimos 25 años, por lo cual hoy día existen más de 10.000 instalaciones en todo el mundo, con superficies entre 200 m<sup>2</sup> y 4000 ha (Arias, 1998). Estas cifras revelan que son una buena alternativa y que una mejora en sus características y condiciones de funcionamiento permitirán un progreso en el área ambiental.

Por tal razón esta tesina pretende contribuir al mejoramiento de la tecnología de los humedales con el estudio de la influencia del estado físico de la materia orgánica en la eficiencia de la depuración de aguas residuales urbanas.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1 OBJETIVO GENERAL.**

Realizar una evaluación de la influencia del tamaño (estado físico) de la materia orgánica en la eficiencia de la depuración de aguas residuales domésticas en humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal. Para tal fin se construyeron en laboratorio dos modelos idénticos de humedales que depuraron un agua residual sintética diferente cada uno. Uno de ellos depuró agua residual sintética con materia orgánica disuelta (glucosa) y el otro con la materia orgánica particulada (almidón).

### **1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.**

Los objetivos específicos de este estudio son:

- Evaluar la eficiencia de eliminación de contaminantes en cada humedal. Para ello se medirá la turbiedad, la transmitancia, la conductividad, la concentración de amonio y la demanda química de oxígeno en los afluentes y efluentes de los dos modelos.
- Comparar la eficiencia de eliminación de contaminantes en función de la fuente de materia orgánica.
- Determinar la influencia del estado físico en el rendimiento de eliminación de la materia orgánica.
- Proponer mejoras en el diseño de humedales a tenor de los resultados obtenidos.

## 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Garantizar la salud pública es fundamental para el desarrollo y mantenimiento de nuestra sociedad. Es por ello que realizar una buena gestión de las aguas residuales contribuirá a tal fin.

La gestión de las aguas residuales básicamente se materializa con su depuración; dicho proceso consiste en la separación del agua y las sustancias que han sido agregadas durante su uso para obtener elementos inertes para el medio ambiente y la salud pública.

Los sistemas de depuración pueden ser biológicos o físico-químicos. Los primeros se basan en el cultivo de bacterias que utilizan la materia orgánica del agua residual como sustrato para obtener gas carbónico y agua, así como una reducción de la MES y la DBO<sub>5</sub> en un 90%. Los segundos consisten en la adición de sustancias químicas y procesos físicos, que conjuntamente alteran la composición del agua residual reduciendo la MES en un 80-90% y la DBO<sub>5</sub> en un 40-50%.

Los sistemas de depuración buscan la reducción de contaminantes, consiguiendo un nivel de depuración que depende de la siguiente relación:

$$\text{Nivel de depuración} = f(\text{Energía, Superficie})$$

Según esta expresión los tratamientos de depuración se pueden clasificar en convencionales o naturales.

Los sistemas convencionales depuran el agua con un gasto de energía externa que acelera las reacciones químicas, físicas y biológicas, para lograr el objetivo en pocas horas.

Los sistemas naturales en contraposición no requieren energía externa porque funcionan siguiendo el ciclo ambiental, por lo tanto las reacciones químicas, biológicas y físicas siguen la velocidad definida por el medio ambiente, que en general dura días, semanas o meses.

Ya que la superficie utilizada para depurar está en función del tiempo que requiere el tratamiento de depuración, los tratamientos naturales requieren mayor área que los convencionales, pero por otro lado los convencionales requieren una mayor inversión para su construcción y funcionamiento.

Dentro de los sistemas naturales se encuentran los humedales construidos. Estos sistemas son una buena opción para el tratamiento de aguas residuales en asentamientos de población pequeños debido a su fácil diseño y construcción, así como por su eficiencia y bajo coste.

## **2.1 HUMEDALES**

Los humedales son áreas que se encuentran saturadas por aguas superficiales o subterráneas con una frecuencia y duración tales, suficientes para mantener condiciones saturadas. Generalmente tienen una profundidad del agua inferior a 60 cm. y plantas emergentes, las cuales facilitan la filtración y la absorción de los constituyentes del agua residual, la transferencia de oxígeno a la columna de agua y controla el crecimiento de algas debido a que limitan la entrada de la luz solar. Este tipo de estructura natural tiene una alta productividad microbiana que favorece la descomposición de la materia orgánica.

El conocimiento de los humedales naturales ha hecho posible el desarrollo de los humedales construidos para depuración de las aguas residuales domésticas.

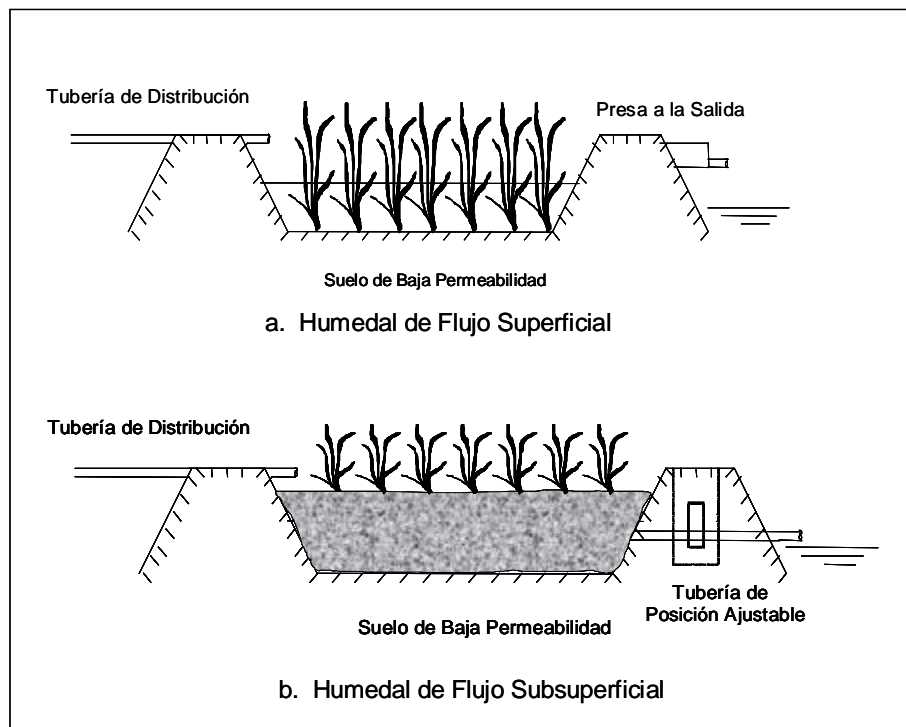
Según el flujo del agua los humedales construidos se pueden clasificar en humedales de flujo superficial o en humedales de flujo subsuperficial (Figura 1).

Los humedales de flujo superficial están formados por lagunas excavadas, con un fondo impermeable, en las cuales el agua circula expuesta a la atmósfera y a través de las partes aéreas de la vegetación emergente. Su profundidad oscila entre 0.3 y 0.5 metros

Los humedales de flujo subsuperficial tienen una estructura similar al anterior aunque su interior está relleno de material granular (generalmente grava), a través del cual circula el agua, se da soporte a las plantas y se forma una película biológica que degrada la materia orgánica. Su profundidad puede llegar hasta 60 centímetros.

Este sistema de flujo subsuperficial está desarrollado para tratar el agua residual y mejorar su calidad mediante la interacción del agua con la atmósfera, el medio granular, los microorganismos y las plantas. Sus ventajas respecto a los humedales de flujo superficial son su capacidad de disipar olores, su aislamiento térmico y una mayor cantidad de biopelícula debido a que la grava proporciona mayor área específica para su formación.

**Figura 1. Tipologías de Humedales Construidos.**



*Fuente: Adaptado de Kadlec y Knight, 1996*

## **2.2 COMPONENTES DE UN HUMEDAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL.**

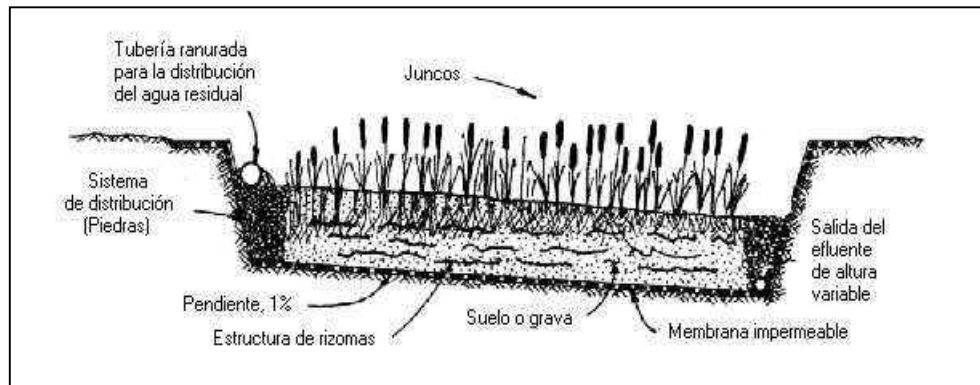
Los humedales construidos son estructuras para tratamiento secundario o terciario de aguas residuales. Por lo tanto, antes del humedal se debe prever un tratamiento que elimine partículas gruesas para evitar la colmatación de la entrada del humedal. Este tratamiento inicial puede estar formado por una reja de desbaste y una fosa séptica, por decantadores o por algún sistema de lagunaje.

Los elementos que constituyen el humedal de flujo subsuperficial son:

- Las estructuras de recogida y distribución del agua residual.
- El medio granular.
- Las plantas.

Los cuales se pueden observar en la Figura 2.

**Figura 2. Componentes de un Humedal Construidos de Flujo Subsuperficial.**



*Fuente: LARA. 1999.*

**2.2.1 Estructuras de distribución y recogida del agua residual.** Los humedales son sistemas que requieren condiciones de flujo uniforme para alcanzar los rendimientos estimados, es por ello que las estructuras de distribución y vertido permiten controlar de forma adecuada el flujo afluente.

Las estructuras de distribución y vertido son elementos que permiten captar, separar y repartir el agua afluente al humedal. La captación del agua residual se realiza mediante arquetas que junto a algunos vertederos distribuyen el caudal. Desde allí, dicho caudal es conducido a la cabecera del humedal, para ser distribuido al lecho mediante tuberías perforadas o canales que lo reparten uniformemente.

Generalmente la entrada del agua en el medio granular se produce de forma indirecta para evitar la acumulación de agua en la superficie, es por ello que existe una pequeña zona llena de grava de mayor tamaño. Seguidamente, el agua fluye en el medio granular hasta llegar al final del lecho donde se tiene otra zona con grava de gran tamaño que facilita la evacuación del agua depurada.

La recogida del agua efluente, normalmente es una tubería perforada similar a la utilizada en la entrada del humedal, desde allí el agua es llevada a un tubo de altura graduable que permite controlar el nivel del agua dentro del lecho.

**2.2.2 Medio Granular.** Los humedales de flujo subsuperficial son estructuras que funcionan como filtros horizontales de grava, por lo tanto el medio granular es prácticamente su principal constituyente.

Las propiedades físicas y químicas del medio granular actúan directamente sobre el agua. En él, se retienen la materia en suspensión y los microorganismos patógenos, se produce la sedimentación de sólidos en suspensión en sus espacios intergranulares, se absorbe la materia orgánica disuelta, los patógenos, los nutrientes y hasta algunos metales en la superficie de los granos y en la biopelícula.

Por otro lado, el medio granular debe permitir el crecimiento de las plantas y del medio bacteriano.

Sin embargo, la principal característica del lecho granular es su permeabilidad, ya que esta propiedad es la responsable del paso del agua. Por lo anterior, los suelos de tipo granular son los recomendados para tal fin. En la Tabla 1 se encuentran algunas características de los medios granulares comúnmente usados para la construcción de humedales de flujo subsuperficial.

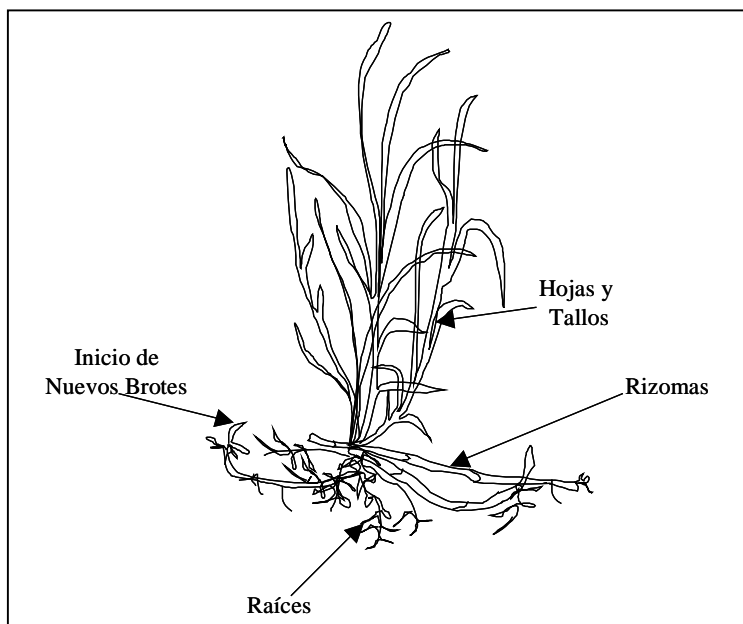
**Tabla 1. Características de los medios granulares usados en los humedales construidos de flujo subsuperficial.**

Material	Tamaño efectivo, D <sub>10</sub> en mm	Porosidad, en %	Conductividad Hidráulica, en m/d
Arenas gradadas	2	28-32	100-1.000
Arenas gravosas	8	30-35	500-5.000
Gravas finas	16	35-38	1.000-10.000
Gravas medianas	32	36-40	10.000-50.000
Rocas pequeñas	128	38-45	50.000-250.000

*Fuente: ARIAS, 1998*

**2.2.3 Plantas.** Generalmente las especies utilizadas para el tratamiento de aguas residuales en humedales construidos son plantas emergentes (Figura 3).

**Figura 3. Planta Emergente Usada en Humedales V**



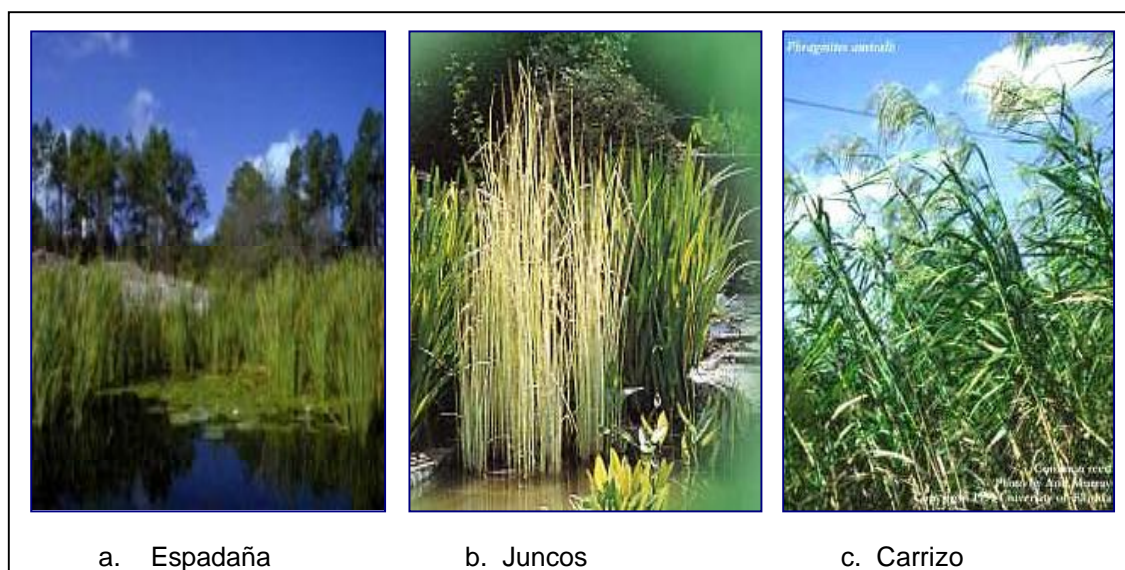
Las especies que frecuentemente se utilizan en los humedales de flujo subsuperficial son los carrizos (*Phragmites australis*), espadañas (*Typha latifolia*) y juncos (*Scirpus lacustris*), los cuales se pueden observar en la Figura 4. En Europa predomina la plantación de carrizos, mientras que en Estados Unidos se usan las espadañas.

El desempeño de estas plantas está determinado principalmente por sus rizomas enterrados los cuales tienen una gran capacidad colonizadora y sus raíces, ya que a su alrededor se pueden crear microambientes aerobios para la degradación aerobia de la materia orgánica y la nitrificación.

Algunos efectos de la vegetación sobre el humedal son:

- Reservan agua y asimilan nutrientes:  
Las macrofitas o plantas emergentes asimilan el nitrógeno, el fósforo y algunas sales minerales del agua residual, sin embargo, al realizar una comparación de la cantidad asimilada respecto a la carga de nutrientes disuelta en el afluente se observa que esta es muy insignificante.

**Figura 4. Especies Vegetales Utilizadas en Humedales Construidos de Flujo Subsuperficial**



- Las raíces proporcionan una superficie específica grande que sirve para el crecimiento de las bacterias:

Al tener mayor área habrá mayor establecimiento de los microorganismos en esta zona y por lo tanto un aumento de la degradación de la materia orgánica y la eliminación de nutrientes.

- Estabilización del medio granular y amortiguamiento de las variaciones ambientales:

Cuando las plantas están desarrolladas permiten aislar el sistema de los agentes atmosféricos, como son el viento, la intensidad de la luz incidente y la temperatura, evitando así que las variaciones climáticas afecten el proceso de depuración.

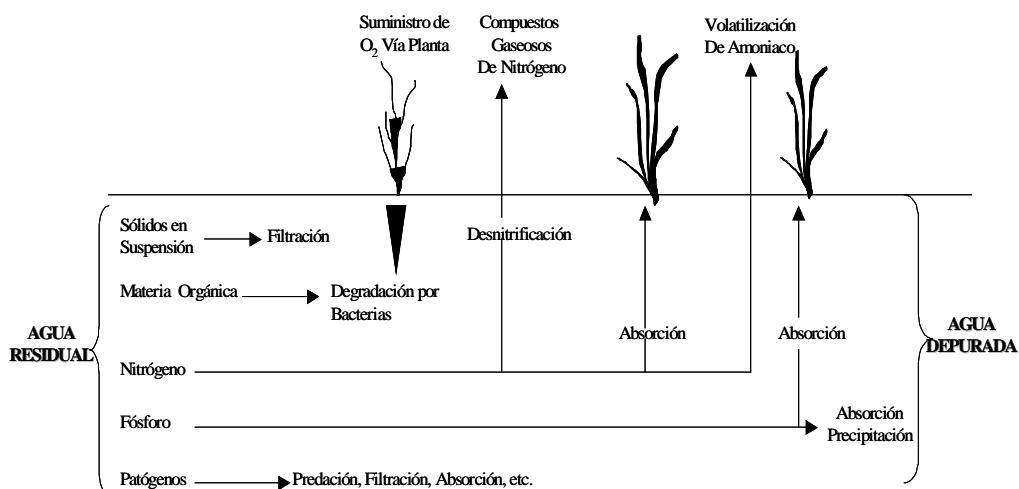
### **2.3 MECANISMOS DE DEPURACIÓN BIOLÓGICA**

El objetivo de la depuración biológica es la eliminación de la materia orgánica y los contaminantes presentes en el agua residual doméstica. Para alcanzar dicho objetivo existen procesos químicos, físicos y biológicos como son: filtración,

degradación aerobia y anaerobia, nitrificación y desnitrificación, asimilación por las plantas y adsorción por la matriz.

A continuación se mencionan algunos constituyentes de un agua residual y sus procesos de depuración (Figura 5).

**Figura 5. Procesos de Depuración de Aguas Residuales Urbanas**



**2.3.1 Materia orgánica.** El objetivo principal de los humedales construidos es la eliminación de materia orgánica.

El estado físico, químico y biológico de la materia orgánica, así como su proceso de degradación en los humedales se analizarán en el apartado 3.4.

**2.3.2 Materia en Suspensión.** La materia en suspensión (MES) de un agua residual se puede definir como la fracción de la materia sólida que queda retenida en un filtro de características establecidas (tamaño efectivo de poro de 0,2  $\mu\text{m}$  o inferior)<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> CHICO, 2002

Su eliminación en un humedal de flujo subsuperficial se puede producir por la baja velocidad del flujo en algunos puntos, las fuerzas de adhesión entre partículas y la resistencia que opone el medio granular, fenómenos que en conjunto se denominan filtración del medio granular.

Según estudios realizados, la mayor parte de eliminación de la materia en suspensión se lleva a cabo en los primeros metros del humedal y la concentración de sólidos va disminuyendo de forma exponencial a medida que se recorre el humedal. Por lo anterior se puede concluir que en las zonas cercanas a la entrada del lecho se encuentra una mayor concentración de MES.

Su rendimiento de eliminación por los humedales de flujo subsuperficial oscila entre 85-95%, y depende de la composición del agua residual y las condiciones de funcionamiento del humedal<sup>2</sup>.

**2.3.3 Nitrógeno.** En un agua residual el nitrógeno se puede encontrar en diferentes especies como es el nitrógeno orgánico, el amoníaco, los nitritos y los nitratos.

Su principal mecanismo de eliminación en los humedales construidos de flujo subsuperficial es la nitrificación y la desnitrificación, sin embargo hay otros procesos como son la volatilización, la absorción y la asimilación realizada por las plantas.

La nitrificación se lleva a cabo en dos etapas, iniciando con la transformación del amonio en nitrito por las bacterias nitrosomonas y finalizando con la conversión del nitrito a nitrato por las bacterias nitrobacter. Toda la nitrificación se realiza en condiciones aerobias y requiere por lo tanto de una cantidad de oxígeno que generalmente es de 4,6 mg por cada miligramo de amonio. Según investigaciones se ha establecido que para humedales de profundidad menor a 30 cm. se obtenga una disminución del amonio del orden de 35% al 66% y en humedales de profundidad mayor a 60 cm. una eliminación de entre el 11 y 40%<sup>3</sup>.

La desnitrificación es el proceso contrario a la nitrificación, en el cual se produce la eliminación del nitrato mediante su conversión en nitrógeno gas. Este proceso igual que el anterior se lleva a cabo en dos etapas, en la primera se convierte el nitrato en nitrito y en la segunda el nitrito es transformado en amoníaco, óxido nitroso y nitrógeno. La desnitrificación se realiza en la zona anaerobia por acción de las bacterias reductoras.

---

<sup>2</sup> PIRIZ, 2000.

<sup>3</sup> AGUIRRE, 2004.

La volatilización del nitrógeno amoniacal se produce únicamente en humedales que depuren aguas residuales con pH superior a 9,3, el cual es el valor del  $pK_a$  del amonio. Ya que en los humedales el pH oscila entre 6 y 7,5, este proceso irregularmente se produce.

La absorción del nitrógeno amoniacal se puede llevar a cabo cuando éste se encuentre en condiciones estables, de esta forma el lecho granular lo puede absorber. Sin embargo, este es un proceso reversible, puesto que cuando cambian las condiciones que lo estabilizan, el nitrógeno amoniacal puede regresar al agua.

La asimilación es un proceso realizado por las plantas. En éste, el nitrógeno es incorporado a la biomasa, por acción de las raíces, sin embargo, al morir la planta el nitrógeno retorna al humedal, razón por la cual se recomienda podar la vegetación, no obstante en la práctica esta actividad no se realiza.

El rendimiento de eliminación del nitrógeno en un humedal de flujo subsuperficial es difícil de establecer debido a que depende de las concentraciones de nitrógeno en el afluente, las condiciones ambientales y el tipo de planta presente en el humedal. Además, según lo enunciado en los procesos de eliminación del nitrógeno, la volatilización y la asimilación por las plantas no son significativas, por lo cual los mecanismos que mayor rendimiento tendrían serían la nitrificación y la desnitrificación. Sin embargo, al analizar que la nitrificación se presenta en condiciones aerobias y que en los humedales de flujo subsuperficial la concentración de oxígeno es baja, este proceso estaría muy reducido. Por otra parte, para realizar la desnitrificación, las bacterias requieren un aporte de carbono orgánico biodegradable para la síntesis celular, compuesto que no está fácilmente disponible en el humedal.

**2.3.4 Fósforo.** En el agua, el fósforo se encuentra como materia orgánica o productos totalmente oxidados como los ortofosfatos ( $PO_4^{-3}$ ,  $HPO_4^{-2}$ ,  $H_2PO_4^{-}$ ,  $H_3PO_4$ ).

En los humedales la transformación del fósforo se puede producir por procesos bióticos y abióticos.

Los procesos bióticos comprenden la asimilación por las plantas y los microorganismos y la mineralización de los restos de plantas y del fósforo orgánico. Los procesos abióticos abarcan la absorción por el suelo y los intercambios entre el suelo y el agua residual que circula.

Los anteriores procesos se realizan a corto y largo plazo. A corto plazo se llevan a cabo los procesos bióticos, los cuales terminan cuando la vegetación y los

microorganismos mueren, aportando fósforo al medio. A largo plazo se realizan los procesos abióticos, los cuales dependen de principalmente del estado físico del suelo, principalmente su capacidad de absorción.

El rendimiento de eliminación del fósforo en los humedales construidos de flujo subsuperficial según Píriz (2000) oscila entre el 30% y 40%.

## **2.4 LA MATERIA ORGÁNICA EN LOS HUMEDALES**

**2.4.1 Composición.** En los humedales construidos de flujo subsuperficial el proceso de depuración se lleva a cabo mediante bacterias heterótrofas que se alimentan de la materia orgánica soluble o finamente dividida.

La materia orgánica, base de dicha alimentación está formada entre otros compuestos por:

- § Glúcidos (glucosa, celulosa) y Polisacáridos.
- § Lípidos (grasas y lipoides), que son hidratos de carbono pobres en oxígeno, entre los que se encuentran las vitaminas, algunas hormonas, las resinas, el caucho y látex.
- § Prótidos, que son compuestos cuaternarios de O, H, C, N.
- § Agentes tenso-activos

**2.4.2 Estado Físico.** La materia orgánica presente en los humedales se puede clasificar en función del tamaño de las partículas así:

- § Disuelta: aquella que tiene un tamaño de partícula menor a 0,001  $\mu\text{m}$
- § Coloidal: su tamaño se encuentra en el rango de 0,001 a 1  $\mu\text{m}$
- § Supracoloidales: de tamaño comprendido entre 1 y 100  $\mu\text{m}$
- § Sedimentables: con tamaño mayor a 100  $\mu\text{m}$

Generalmente las partículas entrantes en un humedal tienen un tamaño comprendido entre 0,7 y 2  $\mu\text{m}$ . Son partículas coloidales y supracoloidales, las cuales representan en media un 96% del total de partículas del agua residual

afluente. Por otro lado, el porcentaje de MO disuelta del total de MO en un agua residual urbana suele ser de alrededor del 55%.<sup>4</sup>

**2.4.3 Degradación.** La principal vía para la eliminación de materia orgánica acumulada en un humedal de flujo subsuperficial es la descomposición, es decir, la conversión de moléculas orgánicas complejas a constituyentes orgánicos e inorgánicos simples. Este proceso se produce en tres pasos:

- Fragmentación abiótica
- Hidrólisis mediante enzimas extracelulares
- Procesos aerobios y anaerobios de los microorganismos

El primero es un proceso físico y los otros dos son reacciones que producen los microorganismos por lo que están afectados por la calidad del sustrato, los factores medioambientales y la disponibilidad de nutrientes<sup>5</sup>.

La degradación aerobia de la materia orgánica disuelta se produce por acción de las bacterias aerobias heterótrofas. La reacción que tiene lugar es la siguiente:



Esta ecuación está regida por la presencia de oxígeno disuelto, por lo tanto en un medio donde exista suficiente oxígeno se producirá la degradación aerobia, mientras que si el aporte de oxígeno es bajo, este grupo de bacterias disminuye su desarrollo, predominando la degradación anaerobia.

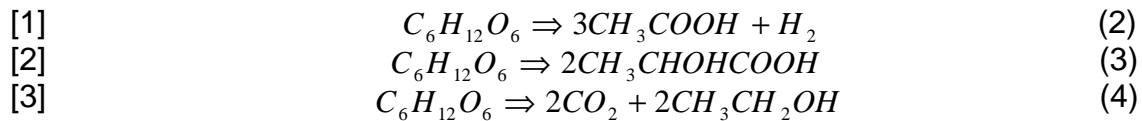
La degradación anaerobia es realizada en varias etapas por acción de las bacterias heterótrofas de tipo anaerobio estricto o facultativo.

En la primera etapa se produce la fermentación, la cual da origen a ácidos grasos como el acético [1] y el láctico [2], alcoholes como el etanol [3] y gases como el CO<sub>2</sub> y el H<sub>2</sub>.

---

<sup>4</sup> CAMPOS, 2004.

<sup>5</sup> REDDY y D'ANGELO, 1997

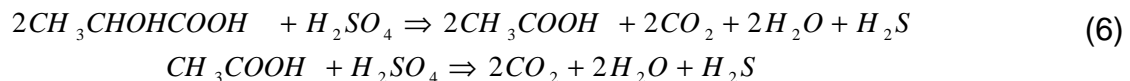


En la segunda etapa, y por acción de diferentes grupos de bacterias que utilizan los productos finales de la fermentación, se continúa el proceso de degradación. Según el tipo de sustrato existente se pueden presentar los siguientes procesos:

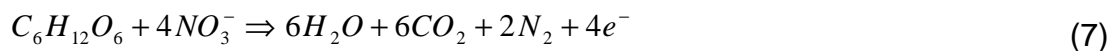
- Metanogénesis:



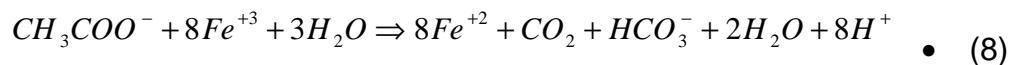
- Sulfato-reducción:



- Nitrato-reducción:



- Reducción del hierro:



Las bacterias que producen la metanogénesis son muy sensibles y únicamente actúan cuando el pH se encuentra entre 6,5 y 7,5. Esto hace que, por ejemplo, una sobreproducción de ácido generado por las bacterias sulfato-reductoras puede bajar rápidamente el pH deteniendo a las bacterias metanogeneradoras.

La degradación anaerobia es mucho más lenta que la aerobia y predomina en profundidad donde el oxígeno disuelto es limitado y cuando existen cargas orgánicas altas.

#### 2.4.4 Compuestos orgánicos biodegradables

- La Glucosa

La glucosa ocupa una posición prominente en las reacciones bioquímicas y por su abundancia en la naturaleza. Su elaboración en las plantas por fotosíntesis proporciona un depósito de energía para todos los miembros de los reinos vegetal y animal.

La glucosa es un monosacárido de bajo peso molecular, que obedece a la fórmula química  $C_6H_{12}O_6$ . Sus principales características físicas y químicas son su solubilidad en agua y su degradación que se pueden decir son del 100%.

- El Almidón

Es una de las principales fuentes de reserva energética en las plantas, se puede almacenar en diversos órganos tales como raíces, tallos y semillas.

El almidón es un homopolisacárido constituido por unidades de glucosa que se unen mediante enlaces de carbono. Su fórmula química es  $(C_6H_{10}O_5)_n$ .

Físicamente es blanco, sin olor ni sabor, y se encuentra en forma de gránulos que son insolubles en agua fría o en solventes orgánicos. La forma y tamaño de los gránulos depende de su origen, sin embargo su tamaño varía entre 2 y 150  $\mu m$ .<sup>6</sup>

Su estructura molecular es de elevado peso molecular por lo que es considerado una macromolécula. Químicamente es una mezcla de dos polisacáridos muy similares: la amilosa (25%) y la amilopectina (75%). La proporción de los dos componentes influencia las propiedades físicas del tipo de almidón como son la viscosidad, la solubilidad, la formación de gel, la temperatura de gelatinización y la fragilidad de las películas que forma.

**2.4.5 Métodos de Análisis de la Materia Orgánica.** Para determinar el contenido de materia orgánica de un agua residual existen diferentes técnicas como son: la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y el Carbono Orgánico Total (COT).

Los humedales obtienen muy buenas reducciones de la  $DBO_5$  y la DQO. Sin embargo no alcanzan la eliminación completa de la materia orgánica, siempre tienen una concentración de fondo de materia orgánica debido a que los mismos humedales producen materia orgánica.

---

<sup>6</sup> DEFRA, 2002

El parámetro de control mas utilizado en aguas residuales es la DBO<sub>5</sub>, sin embargo todas las conclusiones que se obtienen con esta medición se pueden aplicar a la DQO.

- Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)

Este ensayo mide la cantidad de oxígeno consumido durante un periodo de tiempo específico para degradar bioquímicamente la materia orgánica (demanda carbonosa) de una muestra de agua, y el oxígeno usado para oxidar la materia inorgánica presente en la muestra (por ejemplo sulfuros).

El ensayo además, cuantifica el oxígeno consumido en la oxidación del amoníaco y los nitritos presentes en la muestra (demanda nitrogenada), a menos que se evite este proceso con un inhibidor.

Generalmente el tiempo utilizado es de 5 días y los resultados se designan por lo tanto como DBO<sub>5</sub>.

- Demanda Química de Oxígeno (DQO)

El ensayo de la DQO determina la cantidad de oxígeno requerida para oxidar químicamente la materia orgánica presente en una muestra de agua mediante un oxidante químico fuerte (normalmente dicromato de potasio) y a una temperatura de 150°C.

Los resultados de la DQO normalmente son mayores que los de la DBO debido a que el número de compuestos que se pueden oxidar químicamente es mayor que el de oxidables biológicamente.

La duración del ensayo generalmente es de 3 horas, lo cual ofrece una ventaja respecto a la DBO.

- Carbono Orgánico Total (COT)

El ensayo del COT se efectúa inyectando una cierta cantidad de muestra en un horno a alta temperatura, así en presencia de un catalizador, el carbono orgánico se oxida a dióxido de carbono. El dióxido de carbono producido se cuantifica en un analizador de infrarrojos.

El COT es un ensayo aplicable exclusivamente a pequeñas concentraciones de materia orgánica y se realiza en un periodo de tiempo muy corto.

**2.4.6 Rendimientos de Eliminación en Humedales Construidos de Flujo Subsuperficial.** Según Píriz (2000), en los humedales construidos de flujo subsuperficial se pueden obtener rendimientos de eliminación de la materia orgánica del orden del 85%.

La mayor parte de la reducción de la materia orgánica se produce en los primeros metros del humedal, allí la materia particulada queda retenida entre los huecos del medio granular.

Por otra parte, según Campos (2004), el principal mecanismo de eliminación de partículas en los humedales parece ser la retención física como consecuencia de la absorción, el choque entre partículas, la coagulación, el efecto tamiz y la intercepción directa,.

El tramo donde se produce la principal retención de partículas por filtración se convierte en una fuente de materia orgánica. Las partículas acumuladas se hidrolizan paulatinamente y se liberan compuestos orgánicos de menor complejidad. Por lo tanto la materia orgánica en el interior del humedal no es sólo la resultante de un balance entre la entrante y la eliminada por filtración y mecanismos bioquímicos, sino que debe añadirse la materia orgánica hidrolizada, por tal razón el humedal no puede alcanzar un rendimiento del 100%.

## **2.5 ANALISIS ESTADISTICO DE DATOS<sup>7</sup>**

La estadística está ligada a los métodos científicos en la toma, organización, recopilación, presentación y análisis de datos, tanto para la deducción de conclusiones como para tomar decisiones de acuerdo con tales análisis.

**2.5.1 Estadística Básica.** Una colección de datos que corresponden a las características de un grupo de individuos u objetos se denomina muestra. Dicha muestra es una pequeña parte de un grupo entero llamado población. Si la muestra es representativa de la población, se pueden deducir importantes conclusiones acerca de esta, a partir del análisis de la misma.

La parte de la estadística que trata de las condiciones bajo las cuales tales inferencias son válidas se llama estadística inductiva o estadística inferencial.

Un estudio estadístico inicia con la toma de datos, que es la obtención de una colección de los mismos y que no han sido ordenados numéricamente.

---

<sup>7</sup> SPIEGEL, 1970

Seguidamente, se realiza la ordenación de dichos datos en orden creciente o decreciente de magnitud.

Mediante la ordenación se puede determinar el recorrido o rango de los datos, que corresponde a la diferencia entre el mayor y el menor de los números en la muestra.

A continuación se distribuyen los datos en clases o categorías y se determina el número de individuos pertenecientes a cada clase, lo cual se denomina frecuencia de clase. Esta ordenación tabular de los datos en clases, reunidas las clases y con las frecuencias correspondientes a cada una, se conoce como una distribución de frecuencias o tabla de frecuencias.

Cada categoría esta compuesta por un intervalo, en el cual los números extremos son los límites de clase, el número menor es el límite inferior de clase y el mayor es el límite superior.

Los datos se registran generalmente con aproximación a la unidad, incluyendo teóricamente todas las medidas decimales. Sin embargo, los números representados por números exactos con un solo decimal, se conocen como límites reales de clase o límites verdaderos de clase, por ejemplo 30,5 es un límite real de clase que pertenece al intervalo de clase 30 – 40, además, el menor de ellos es el límite real inferior (30,5) y el mayor es el límite real superior (40,5).

La frecuencia relativa de una clase es la frecuencia de la clase dividida por el total de frecuencias de todas las clases y se expresa generalmente como porcentaje. La suma de las frecuencias relativas de todas las clases es evidentemente 1 o 100%.

Si las frecuencias de la tabla de frecuencias se sustituyen por las correspondientes frecuencias relativas se forma una distribución de frecuencias relativas, distribución porcentual o tabla de frecuencias relativas.

Además, si en cada intervalo se van adicionando las frecuencias de los intervalos anteriores, se obtiene la frecuencia acumulada. A la tabla que representa las frecuencias acumuladas se le llama distribución de frecuencias acumuladas, tabla de frecuencias acumuladas o brevemente distribución acumulada.

Cuando se requiere centralizar los datos, se puede hacer uso de la media aritmética o media de un conjunto de  $N$  números  $X_1, X_2, X_3, \dots, X_N$ , que se representa por  $\bar{X}$  y se define como:

$$\bar{X} = \frac{X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_N}{N} = \frac{\sum_{j=1}^N X_j}{N} \quad (9)$$

Si además se requiere saber el grado en que los datos numéricos tienden a extenderse alrededor de un valor medio se utilizan las medidas de variación o dispersión de los datos, entre las que se encuentra la desviación típica y que se define por:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (X_j - \bar{X})^2}{N}} \quad (10)$$

s, es la raíz cuadrada del cuadrado medio de las desviaciones a la media, o raíz del cuadrado medio de las desviaciones.

Cuando se requiere distinguir la desviación típica de una población de la desviación típica de una muestra sacada de esta población, se emplea el símbolo s para la última y  $\sigma$  para la primera.

**2.5.2 La Distribución Normal.** La distribución normal, curva normal o distribución de Gauss es uno de los más importantes ejemplos de una distribución de probabilidad continua, la cual proporciona una buena aproximación alrededor de la media de una variable aleatoria y está determinada por la ecuación:

$$Y = \frac{1}{s\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{X-m}{s}\right)^2} \quad (11)$$

donde  $\mu$ = media y  $\sigma$  =desviación típica.

El área total limitada por la curva y el eje X es uno; de aquí que el área bajo la curva entre dos ordenadas  $X=a$  y  $X=b$ , donde  $a<b$ , representa la probabilidad de que X se encuentre entre a y b.

La apariencia gráfica de la distribución normal es una curva simétrica con forma de campana, que se extiende sin límite tanto en la dirección positiva como en la negativa.

Un gran número de estudios indican que la distribución normal proporciona una adecuada representación, por lo menos en una primera aproximación, de las distribuciones de una gran cantidad de variables físicas.

Para ajustar datos estadísticos a una curva normal, se hace uso de la variable normalizada:

$$z = \frac{(X - \bar{X})}{s} \quad (12)$$

Esta variable mide la desviación de la media en unidades de desviación típica, las cuales son adimensionales. Y es de gran valor en la comparación de distribuciones.

Dicho ajuste de datos a una curva normal se especifica a continuación:

- § Organización de los datos en categorías o clases.
- § Cálculo de la frecuencia de cada clase.
- § Cálculo de la media y la desviación típica de la muestra de datos.
- § Determinación de los límites reales de clase X.
- § Cálculo de la variable normalizada “z” para los límites reales de clase anteriormente calculados
- § Extracción del valor del área bajo la curva normal de 0 a z mediante la Tabla que se presenta en el anexo III al final de este estudio, para los límites reales de clase calculados.
- § Cálculo del área bajo la curva normal para cada clase.
- § Esta se obtienen restando las áreas sucesivas del numeral anterior cuando las correspondientes z tienen igual signo, y sumándolas cuando tienen signo contrario.
- § Cálculo de la Frecuencia esperada.
- § Dicha frecuencia se obtiene al multiplicar las áreas de cada clase obtenidas en el numeral anterior por el número total de datos de la muestra.

§ Se determina si los datos se ajustan a una curva normal al observar si las frecuencias observadas en cada categoría se asemejan o son iguales a las frecuencias esperadas obtenidas en el anterior numeral.

También se puede establecer si existe un buen ajuste de los datos a la curva normal haciendo la prueba Chi-cuadrado a las frecuencias observadas y las frecuencias esperadas.

**2.5.3 La Prueba Chi-cuadrado de bondad de ajuste.** Muchas veces los resultados obtenidos de muestras no siempre concuerdan exactamente con los resultados teóricos esperados según las reglas de probabilidad, es por ello que se requiere saber si dichos resultados difieren significativamente entre sí.

Para determinar dicha diferencia se puede hacer uso de la prueba chi-cuadrado “ $\chi^2$ ” la cual se define a continuación:

$$c^2 = \sum_{j=1}^K \frac{(o_j - e_j)^2}{e_j} \quad (13)$$

donde  $o_j$  es el resultado observado y  $e_j$  es el resultado esperado o teórico.

Si  $\chi^2 = 0$  los resultados observados y teóricos concuerdan exactamente, mientras que si  $\chi^2 > 0$  no coinciden exactamente. A valores mayores de  $\chi^2$ , mayores son las discrepancias entre los resultados observados y esperados.

- Grados de Libertad

Para calcular un estadístico, tal como  $\chi^2$ , es necesario basarse en observaciones sacadas de las muestras, y en ciertos parámetros poblacionales como la media, la desviación típica, etc.

El *número de grados de libertad* de un estadístico denotado generalmente por  $\nu$  se define como el número  $N$  de observaciones independientes en la muestra (es decir, el tamaño muestral) menos el número  $k$  de parámetros de la población que deben estimarse a partir de las observaciones de la muestra.

Sin embargo, para la prueba  $\chi^2$ , el número de grados de libertad  $\nu$  está dado por:

§  $\nu = k-1$  si los resultados esperados pueden calcularse sin tener que estimar parámetros poblacionales con los estadísticos muestrales.

§  $v = k-1-m$  si los resultados esperados solamente pueden calcularse estimando  $m$  parámetros de la población a partir de los estadísticos muestrales.

- Nivel de Significación

La probabilidad máxima con la que en un ensayo de hipótesis se puede cometer el error de decir que la hipótesis se acepta cuando debería ser rechazada, se denomina nivel de significación del ensayo.

En la práctica se acostumbra a utilizar niveles de significación del 0,05 y 0,01, aunque pueden emplearse otros valores. Si por ejemplo, se elige un nivel de significación del 0,05 o 5% al realizar un ensayo de hipótesis, se dice entonces que hay aproximadamente 5 ocasiones en 100 en que se rechazaría la hipótesis cuando debería ser aceptada, es decir, se está con un 95% de confianza de que se toma la decisión adecuada. En tal caso se dice que la hipótesis ha sido rechazada al nivel de significación del 0,05, lo que significa que se puede cometer error con una probabilidad de 0,05

- Aplicación de la prueba  $\chi^2$

Al tener una muestra que previamente se ha ajustado a una curva normal como se expuso anteriormente, se puede aplicar la prueba  $\chi^2$  para saber si dicho ajuste es satisfactorio así:

§ Cálculo de la prueba  $\chi^2$  a los resultados esperados y los observados.

§ Determinación del número de grados de libertad.

§ Obtención del parámetro  $\chi^2$  para los grados de libertad determinados y para un nivel de confianza de 0,95 y su respectivo nivel de significación 0,05 o un nivel de confianza de 0,99 y su respectivo nivel de significación 0,01, de las tablas que aparecen en el anexo III del presente estudio.

§ Aplicación de la prueba. Si el valor de  $\chi^2$  calculado es menor que el valor de  $\chi^2_{0,95}$  obtenido de las tablas se deduce que el ajuste de los datos es bueno, y además se comprueba que tan bueno es dicho ajuste, si al comparar el valor de  $\chi^2$  calculado con el valor de  $\chi^2_{0,05}$  y este último es menor, se dice que el ajuste no es demasiado bueno.

**2.5.4 Prueba de Hipótesis con respecto a las medias mediante la distribución t de Student.** La distribución t de student es una distribución que para muestras con tamaño  $N \geq 30$  se aproxima estrechamente a la curva normal tipificada, es por ello que para muestras que siguen una distribución normal se

puede realizar un ensayo de hipótesis y significación mediante su estadístico t, el cual está definido por:

$$t = \frac{\bar{x} - m}{s} \sqrt{N - 1} \quad (14)$$

Dicho estadístico se define como el cociente entre una variable aleatoria normal estándar y la raíz cuadrada de una variable aleatoria chi-cuadrada dividida por sus grados de libertad. El conjunto de todos los posibles valores de la variable aleatoria T es el intervalo  $(-\alpha, \alpha)$  puesto que los valores de Z se encuentran en éste y los valores de chi-cuadrado son positivos.

El estadístico “t” permite comparar dos distribuciones distintas que tienen media y desviación típica diferentes, con las siguientes hipótesis:

Ho:  $\mu_1 = \mu_2$  no hay diferencia esencial entre las dos distribuciones

H<sub>1</sub>:  $\mu_1 \neq \mu_2$  en la que hay diferencia esencial entre los dos grupos

Bajo la hipótesis nula Ho se tiene que el estadístico “t” sigue la ecuación:

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{s \sqrt{\frac{1}{N_1} + \frac{1}{N_2}}} \quad \text{donde} \quad s = \sqrt{\frac{N_1 s_1^2 + N_2 s_2^2}{N_1 + N_2 - 2}} \quad (15)$$

Que permite realizar un ensayo bilateral al nivel de significación deseado, en el que se rechazará la hipótesis Ho si t se encuentra fuera del rango para dicho nivel de significación, y que se obtiene mediante la tabla que se encuentra en el Anexo C del presente estudio.

Por ejemplo, si se realiza un ensayo bilateral al nivel de significación del 0,01, se rechazará la hipótesis Ho si el valor de t calculado se encuentra fuera del rango  $-t_{0,995}$  a  $t_{0,995}$  que se obtiene de la tabla correspondiente a este estadístico y según los grados de libertad que tienen las muestras.

El grado de libertad de las muestras corresponde a  $(N_1 + N_2 - 2)$  para el estadístico t de student.

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

Uno de los objetivos de la presente tesina es evaluar el comportamiento de dos humedales construidos de flujo subsuperficial, con el fin de evaluar la influencia del tamaño de la materia orgánica en la eficiencia de depuración.

Para tal fin se construyeron dos modelos de laboratorio basándose en algunas de las características de los humedales de flujo subsuperficial pertenecientes al sistema de tratamiento de aguas residuales de la urbanización de Can Suquet, situada en “Les Franqueses del Vallés” en la provincia de Barcelona, que hacen parte de un proyecto de investigación coordinado por la UPC financiado con fondos FEDER.

Dichas características son:

- § El medio granular y las plantas, que se trajeron directamente de los humedales.
- § La demanda bioquímica de oxígeno, que en promedio es de 150 mg/l.
- § La carga orgánica media superficial de 6 g DBO/m<sup>2</sup> \* día

#### 3.1 DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS

Los humedales construidos de flujo subsuperficial que se usaron para desarrollar la presente tesina, se pueden observar en la Figura 6. Están compuestos por contenedores plásticos que en su interior llevan la grava, las plantas y el agua residual sintética.

Para simular las condiciones ambientales se construyó una estructura de iluminación que aportará una parte de calor y luz para la fotosíntesis de las plantas.

## Figura 6. Modelos de Humedales de Flujo Subsuperficial



a. Contenedor plástico con sistema de recogida del efluente



b. Llenado de los contenedores con grava



c. Contenedores preparados para ser plantados con Carrizos



d. Raíz de Phragmites Australis (Carrizo)



e. Contenedores sembrados con Phragmites Australis.



f. Humedales con sistema de iluminación artificial

**3.1.1 Dimensiones.** Los Humedales construidos en laboratorio fueron dos. Dichos modelos se fabricaron en contenedores plásticos con las siguientes dimensiones:

§ Longitud = 0.93 m

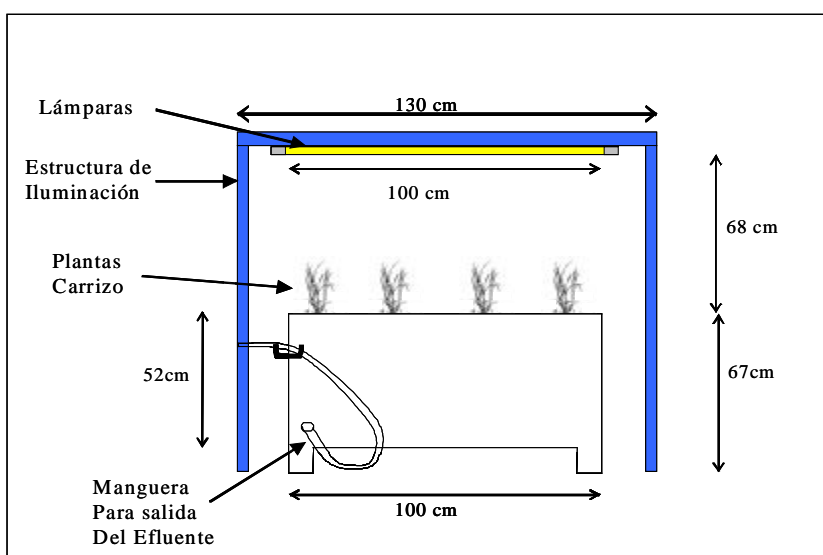
§ Ancho = 0.59 m

§ Alto = 0.52 m

En su interior contenían el material granular hasta una altura de 0,40 metros y el agua residual a una altura de 0,30 metros.

Las luces están compuestas por 15 lámparas fluorescentes de 1 metro de largo en cada modelo y situadas a una altura de 0,68 m desde el humedal (Figura 7)

**Figura 7. Dimensiones de los Modelos**



**3.1.2 Material Granular y Plantas.** El lecho granular está constituido por grava fina de  $d_{10} < 4$  mm, traída directamente de los humedales construidos de las Franquezas del Valles, por lo tanto trae consigo la película biológica que tienen los nombrados humedales en la urbanización Can Suquet.

La especie vegetal plantada es el carrizo (*Phragmites Australis*), la cual al igual que el material granular se trajo de los humedales en mención.

Es importante destacar que para simular el efecto del día y la noche, el cual influye en el crecimiento de las plantas, se estableció un ciclo de encendido y apagado de las lámparas en cada humedal.

**3.1.3 Tipo de reactor, Alimentación del Humedal y Sistema de Recogida del Efluente.** Los modelos de humedales funcionaron en sistema batch. El sistema Batch consiste en la sucesión temporal de las fases de llenado, extracción, reacción e inactividad<sup>8</sup>.

En la fase de llenado se produce la entrada del afluente al reactor. El llenado se realizó por vaciado directo del afluente, es decir, la mezcla se preparó e inmediatamente se vertió directamente por gravedad hacia el humedal en sus primeros 15 cm, (Figura 8).

Simultáneamente a la fase de llenado se presenta la fase de extracción. Este hecho se produce porque el modelo tiene fijo el nivel del agua residual dentro del humedal, de esta forma, si el nivel sube dentro del humedal inmediatamente se produce la salida del excedente hasta conseguir regular nuevamente el nivel.

Es importante resaltar que todos los litros de mezcla que se ponen en cada reactor son tomados totalmente e inmediatamente en la fase de extracción, mediante el sistema de recogida.

El sistema de recogida se localizó en el extremo inferior izquierdo del lecho, allí mediante una abertura del contenedor, se comunicó el humedal a una manguera, la cual además de servir para la recolección del efluente controló el nivel del agua residual dentro del humedal (Figura 8).

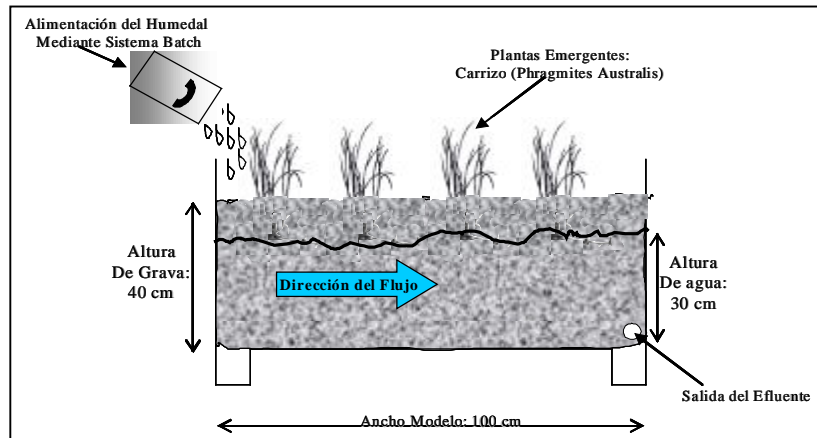
El ciclo de llenado y extracción tuvo una duración aproximada de 1 hora diariamente.

Posteriormente vienen las fases de reacción e inactividad, en la primera tienen lugar las reacciones bioquímicas para reducir la concentración de sustrato o materia orgánica y en la segunda el sistema permanece a la espera de recibir de nuevo agua residual afluente, sin embargo es importante destacar que es una inactividad respecto del flujo y no respecto a las reacciones bioquímicas que se suceden continuamente en el humedal.

---

<sup>8</sup> BIGAS I SERRALLONGA, 1987

**Figura 8. Alimentación del Humedal y Recogida del Efluente**



a. Esquema General del Modelo



b. Sistema de Recogida del Efluente

**3.1.4 Caudal diario de agua residual afluente.** El caudal diario de agua residual que se vertió en cada humedal se determinó en función de la carga orgánica media superficial, la cual según los datos de las Franquezas del Vallés es de 6 g DBO/ m<sup>2</sup> \* día.

La carga orgánica media superficial “Ls” se rige por la siguiente ecuación:

$$L_s = \frac{Q * C}{S}$$

(16)

Donde Q es el caudal, C la concentración de DBO y S la superficie del humedal.

Por lo tanto, para una carga orgánica media superficial de 6 g DBO/ m<sup>2</sup> \* día, una DBO de 150 mg/l y una superficie de 0,5605 m<sup>2</sup>, obtenemos que se requiere un caudal de 22,42 litros / día.

Sin embargo, para disminuir errores en el proceso de preparación de la mezcla se determinó que el caudal sería de 20 litros.

### 3.2 COMPOSICIÓN DEL AGUA RESIDUAL SINTÉTICA

Los modelos trataron dos tipos de agua residual sintética, de esta forma, el que a partir de ahora se llamará "Humedal 1" depuró un agua compuesta por Glucosa, y el que se denominará "Humedal 2" un agua compuesta por Almidón.

Dichas sustancias (Glucosa y el Almidón) se eligieron, por su facilidad de degradación.

Como medio de dilución se usó agua del grifo, que trae consigo las sales y compuestos que normalmente tiene un agua residual. Sin embargo se añadieron unas partes de nitrógeno y fósforo para asegurar la similitud con las aguas residuales domésticas y prever además el alimento de algunas bacterias.

Las concentraciones de nitrógeno y fósforo se determinan según la relación:  
100 partes Carbono: 16 partes Nitrógeno: 1 parte Fósforo

**3.2.1 Humedal 1:** El contenido de glucosa se determinó partiendo de la ecuación de la demanda bioquímica de oxígeno, en la cual ya conocemos la DBO<sub>5</sub> (150mg/l), y siendo la glucosa el compuesto usado en la determinación de la DBO<sub>Límite</sub> se calculó su contenido directamente, así:

$$DBO_5 = DBO_L (1-10^{-5k}) \quad (17)$$

Con k = 0.12

$$DBO_L = \frac{150}{(1-10^{-5*0.12})} = 200.32 \text{ mg / l}$$

Con este valor de la demanda bioquímica límite de oxígeno, se determinó el peso de oxígeno requerido, según la fórmula de oxidación de la glucosa así:



Peso Molecular de la Glucosa:	Peso Molecular de Oxígeno
6 * 12 = 72	6 * 32 = 192 g
12 * 1 = 12	
6 * 16 = <u>96</u>	
180 g	

$$\frac{192gOxigeno}{180gGlucosa} * XmgGlucosa = 200.32mg / l$$

$$XmgGlucosa = \frac{200.32}{\left(\frac{192}{180}\right)} = 187.5mg / l$$

Con lo cual para la DBO<sub>5</sub> que queremos simular debemos tener una mezcla con 187,5 mg de Glucosa por litro de agua. Sin embargo para unificar las concentraciones de los sustratos en los dos humedales se determino que la concentración de Glucosa seria de 180 mg/l.

Además se determinó la cantidad de Nitrógeno y fósforo según la relación:

100 partes de Carbono: 16 partes de Nitrógeno: 1 parte de Fósforo

Obteniéndose que en los 180 mg/l de glucosa, se tienen 72 mg de Carbono, 12 mg de Nitrógeno y 0,72 mg de Fósforo.

Para las cantidades de Nitrógeno y Fósforo se utilizaron los compuestos cloruro de amonio (NH<sub>4</sub>Cl) y el fosfato dibásico de potasio (K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>).

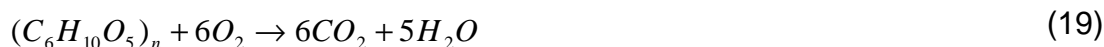
Por lo tanto, según los cálculos anteriores la mezcla de agua residual sintética para el humedal 1 y el caudal de 20 litros estuvo compuesta de:

Glucosa: 3,6 gramos

NH<sub>4</sub>Cl: 0,9 gramos  
 K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>: 0,082 gramos

**3.2.2 Humedal 2.** La determinación del contenido de almidón se realizó con base en un estudio experimental de su turbiedad y de la demanda química de oxígeno que este compuesto registra al estar diluido en agua destilada, así mismo se observó su variación con el paso de los días, al estar expuesto a condiciones ambientales.

La estructura molecular del almidón es de elevado peso molecular por lo que es considerado una macromolécula. Está formado por varias unidades de glucosa y obedece a la fórmula química de (C<sub>6</sub>H<sub>10</sub>O<sub>5</sub>)<sub>n</sub>. Ya que no se sabía con exactitud el valor del radical (n) se estableció que como mínimo debe de ser 1, por lo tanto se tomo este valor como inicial y se determinó la DQO teórica para este valor así:



Peso Molecular del Almidón:	Peso Molecular de Oxígeno
6 * 12 = 72	6 * 32 = 192 g
10 * 1 = 10	
5 * 16 = <u>80</u>	
162 g	

$$\frac{192gOxigeno}{162gAlmidón} * 1gAlmidón = 1,18518g / DQO$$

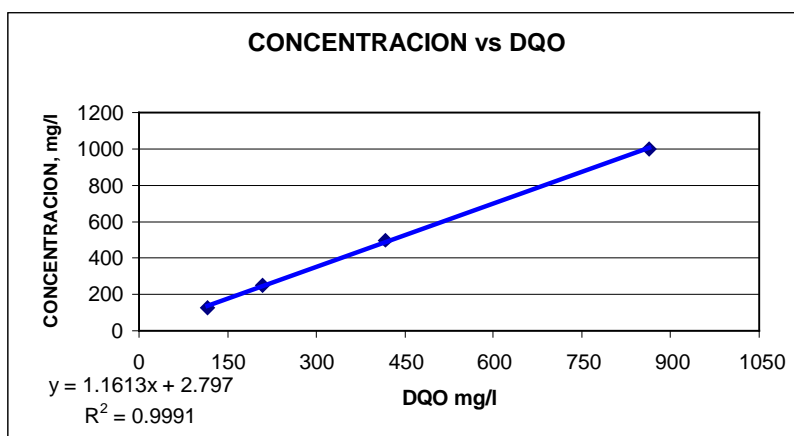
Partiendo del cálculo anterior se obtuvo que teóricamente 1 gramo de almidón tendrá una DQO aproximada de 1185.18 mg, lo cual es un valor muy alto respecto al que se quiere simular que es de aproximadamente 150mg/l. Por otra parte como se desconocía el comportamiento del almidón, se realizaron varios ensayos de DQO y turbiedad para caracterizarlo con muestras de diferentes concentraciones, los resultados se pueden observar en la Tabla 2 y la Figura 9.

**Tabla 2. Evaluación de la DQO para diferentes concentraciones de Almidón**

Concentración mg/l Almidón	DQO 3/Feb	DQO 23/Feb	DQO 26/Feb	DQO 3/Mar	Promedio	DQO Teórica
Patrón	470	406	468	486	458	
125				116	116	148
250	165	210	175	241	209	296

500	393	536	363	493	446	592
1000		765	963		864	1185

**Figura 9. Evaluación de DQO con diferentes concentraciones de almidón**



Según los resultados experimentales, para una DBO de 150 mg/l se requiere una concentración de 178 mg/l de Almidón. Sin embargo se decidió dejar en 180 mg/l la concentración de almidón, con el fin de unificar las concentraciones de los dos humedales.

Igualmente se determinó la cantidad de Nitrógeno y fósforo según la relación:

100 partes de Carbono: 16 partes de Nitrógeno: 1 parte de Fósforo

Obteniéndose que en los 180 mg/l de almidón, se tienen 80 mg de Carbono, 12 mg de Nitrógeno y 0,8 mg de Fósforo.

Para las cantidades de Nitrógeno y Fósforo calculadas, se utilizaron los compuestos cloruro de amonio ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ) y el fosfato dibásico de potasio ( $\text{K}_2\text{HPO}_4$ ).

Por lo tanto, según los cálculos anteriores la mezcla de agua residual sintética para el humedal 2 para el caudal de 20 litros estuvo compuesta de:

Almidón: 3,6 gramos  
 $\text{NH}_4\text{Cl}$ : 0,9 gramos  
 $\text{K}_2\text{HPO}_4$ : 0,092 gramos

### 3.3 ESTUDIO EXPERIMENTAL

El objetivo del estudio consiste principalmente en determinar los rendimientos de eliminación de materia orgánica, según su estado físico en los humedales analizados y su influencia en la eficiencia de tales sistemas.

El experimento tuvo una duración de 3 meses y medio. En el primer mes se determinaron las características físicas de los humedales, se cuantificaron y comprobaron las mezclas de agua residual sintética. En el segundo mes se construyeron y se pusieron en funcionamiento los dos modelos, hasta lograr que los dos sistemas se estabilizaran. A partir de entonces se realizó la toma de muestras y su respectivo análisis.

**3.3.1 Rutina diaria.** Sistemáticamente todos los días a las 8:30 de la mañana se pesaron los compuestos para las mezclas, se elaboraron las aguas residuales sintéticas y se vertieron en los modelos, así mismo simultáneamente se tomaron las muestras en los afluentes y los efluentes, que inmediatamente fueron analizadas.

**3.3.2 Parámetros Analizados.** Los análisis practicados para las muestras de afluente y efluente en cada uno de los humedales fueron:

- Demanda Química de Oxígeno
- Ion Amonio ( $\text{NH}_4^+$ )
- Turbiedad
- Transmitancia
- Temperatura
- Conductividad

#### **Demanda Química de Oxígeno**

La demanda química de oxígeno (DQO) es una medida aproximada de la demanda teórica de oxígeno, es decir, el oxígeno requerido para la oxidación total de los constituyentes orgánicos en inorgánicos.

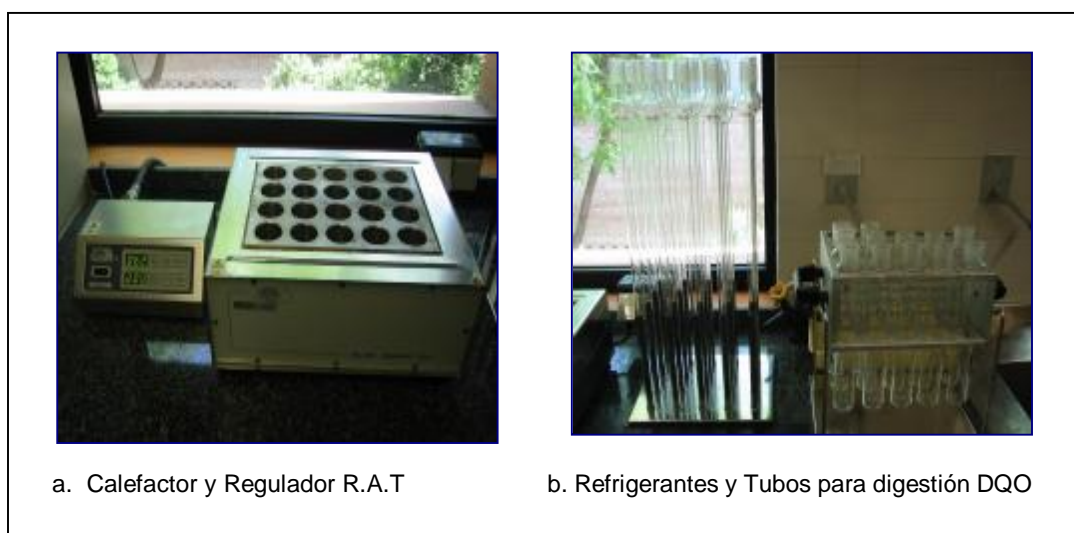
La DQO se desarrolla de la siguiente manera: la materia orgánica se oxida por acción de una mezcla de dicromato y ácido sulfúrico caliente. La mezcla se pone en reflujo junto a una solución ácida con exceso de sal de cromo ( $K_2Cr_2O_7$ ), una vez realizada la digestión, se valora el exceso con sulfato ferroso amónico (FAS), el cual permite conocer la materia orgánica oxidable, determinada en función del oxígeno equivalente ( $mg O_2/l$ )

El equipo de ensayo utilizado es:

- § Bloque metálico calefactor BLOC-DIGEST, marca SELECTA, modelo 4000509
- § Regulador de temperatura y tiempo R.A.T, marca SELECTA, modelo 4000051
- § Tubos para digestión de DQO
- § Gradilla con soporte porta-tubos
- § Refrigerantes para DQO
- § Soporte para tubos refrigerantes
- § Bureta de precisión para la valoración

El cual se puede observar en la Figura 10.

**Figura 10. Equipo para ensayo de DQO**



La metodología del análisis de DQO es la siguiente:

- Se ubican los tubos de digestión debidamente etiquetados en la gradilla.
- Se introduce en el primer y segundo tubo de digestión 20 ml de agua destilada, en el tercero y cuarto 10 ml de solución patrón y en los siguientes 20 ml de muestra a analizar con su respectiva réplica.
- Se añaden 3 trozos de piedra pómez en cada tubo con el fin de regular la ebullición.
- Se añaden 10 ml de dicromato potásico a cada tubo de digestión.
- Se vierten 15 ml de ácido sulfúrico con sulfato de plata.
- Se lleva la gradilla con los tubos de digestión al bloque metálico calefactor.
- Se acopla sobre cada tubo un refrigerante, asegurándose que encajen bien.
- Se programa el regulador de temperatura en 150°C y el tiempo en 2 horas. En este instante el bloque metálico calefactor empezará a calentar los tubos de digestión, hasta alcanzar progresivamente la temperatura seleccionada, cuando llegue a dicha temperatura se iniciará el conteo del tiempo de reflujos.
- Al finalizar el tiempo de reflujos se detiene automáticamente el bloque metálico calefactor. Se dejan enfriar los tubos unos 30 minutos aproximadamente, se vierten unos 60 ml de agua destilada en los refrigerantes para lavar las proyecciones que hayan podido producirse en la pared interna, así como diluir la muestra en los tubos de digestión.
- Cuando los tubos de digestión se encuentren a temperatura ambiente, se quitan los refrigerantes y se titula el exceso de dicromato con sulfato ferroso amónico (FAS), en presencia de 2 o 3 gotas de ferroína (debe haber un cambio de color verde-azulado a rojo). Al valorar el blanco se debe obtener un consumo de FAS de aproximadamente 10 ml y en el patrón un consumo de 4,8 ml.
- Se calcula la DQO, expresada en mg de oxígeno por litro, mediante la siguiente fórmula:

$$DQO = \frac{8000 * C * (V_1 - V_2)}{V_o} \quad (21)$$

Donde,

- § C es la concentración en mol/l de sulfato ferroso amónico.
- §  $V_1$  es el volumen de FAS consumido por el blanco.
- §  $V_2$  es el volumen de FAS consumido por la muestra.
- §  $V_0$  es el volumen de la muestra.

## ION AMONIO

El contenido de nitrógeno amoniacal y en concreto en forma de amoniaco, es un parámetro que nos proporciona información sobre el estado ecológico de la calidad de un agua. Si se presenta un aumento de este compuesto habrá dificultades para el desarrollo de la vida acuática.

El contenido total de nitrógeno está formado por nitrógeno orgánico, amoniaco, nitrito y nitrato. El nitrógeno amoniacal se encuentra en solución acuosa, en forma de ión amonio o como amoniaco (forma no ionizada), en función del pH de la solución y de la temperatura, de acuerdo con la siguiente ecuación de equilibrio:



A niveles de pH superiores a 7, el equilibrio se desplaza hacia la izquierda, formándose amoniaco, mientras que el ión amonio predomina en valores del pH inferiores a 7<sup>9</sup>.

El procedimiento utilizado para la medición de amonio en aguas residuales se denomina método potenciométrico. El método permite determinar el contenido de amonio en el rango de 0,01 a 100 ppm, para concentraciones mayores la muestra debe ser previamente diluida.

El equipo utilizado consta de un analizador de iones marca ORION modelo 920 A, un electrodo de amonio ORION, modelo 95-12 y un patrón con concentración de 1000 ppm de amonio. El equipo se puede observar en la Figura 11.

---

<sup>9</sup> OJEDA, 2003.

**Figura 11. Equipo para medición de Amonio.**



El funcionamiento del equipo obedece a los siguientes fundamentos: En medio básico el nitrógeno amoniacal disuelto en la muestra de agua ( $\text{NH}_3$  y  $\text{NH}_4^+$ ) pasa a amoniaco gas ( $\text{NH}_3(\text{g})$ ), este último se difunde a través de una membrana permeable a gases que contiene el electrodo, cambiando el pH de la solución contenida dentro del electrodo. El analizador de iones mide esa variación de pH y la relaciona con medidas potenciométricas que se encuentran en el rango de  $-700$  mV a  $+700$ mV.

El procedimiento para realizar el ensayo consta de dos partes: La calibración del electrodo de amonio y la medición de la concentración de amonio.

La calibración del electrodo de amonio se realiza con dos patrones que difieran entre sí 10 unidades de concentración. Por el rango esperado de amonio se utilizaron patrones de 1 y 10 ppm, y se realizó la calibración así:

- Partiendo del patrón de 1000 ppm se realizan mediante dilución los patrones de 10 y 1 ppm.
- Se toman 100 ml del patrón de 10 ppm y se le agregan 2 ml de NaOH 5 M. Se sumerge el electrodo de amonio en la solución que debe estar en agitación, una vez estabilizada la lectura se le asigna el valor de 10 mediante el teclado.
- Se toman 100 ml del patrón de 1 ppm y se le agregan 2 ml de NaOH 5 M. Se sumerge el electrodo de amonio en la solución que debe estar en agitación, una vez estabilizada la lectura se le asigna el valor de 1 mediante el teclado.

- Enseguida, el analizador de iones calcula la pendiente, la cual debe estar en el rango de  $-55$  y  $-60$ , si está es aceptable se pasa nuevamente el patrón de 1 ppm para asegurarnos que está bien calibrado. Si la lectura de este patrón de 1 ppm de comprobación está comprendida entre 0,5 y 1,5 ppm se considera que el aparato está bien calibrado.

Al estar calibrado el analizador de iones se procede a realizar la medición del amonio en las muestras de agua residual así:

Se toman 100 ml de muestra, se le agregan 2 ml de NaOH 5 M. Se sumerge el electrodo de amonio en la solución que debe estar en agitación, una vez estabilizado el analizador se lee el resultado de la medición.

## **TURBIEDAD**

La turbidez de una muestra de agua, es la reducción de su transparencia ocasionada por el material particulado en suspensión. Este material puede consistir de arcillas limos, plankton o material orgánico finamente dividido, que se mantiene en suspensión por su naturaleza coloidal o por la turbulencia que genera el movimiento

El método se basa en la comparación de la magnitud de la luz dispersada por las partículas coloidales de la muestra, con la intensidad emergente, de una muestra patrón o una muestra de blanco. Se parte de la hipótesis de que cuanto mayor es la dispersión de la luz, mayor es el contenido en sólidos suspendidos y en consecuencia, mayor la turbidez de la muestra.

El equipo consta de un turbidímetro con rango de lecturas entre 0 a 20 UNT y 0 a 200 UNT (Unidades Nefelométricas de Turbiedad) y de celdas fotométricas de cristal incoloro o transparente, las cuales deben estar escrupulosamente limpias, por dentro y por fuera, descartándose las rayadas y/o manchadas. (Figura 12)

El ensayo se inicia con la calibración del instrumento ajustando el equipo a cero unidades de turbiedad mediante el blanco.

Posteriormente se introduce la muestra en las celdas y se agita cuidadosamente la muestra, esperando que desaparezcan las burbujas de aire.

Se introduce la celda en el turbidímetro, se lee y registra la turbiedad que aparece en la pantalla del equipo.

**Figura 12. Turbidímetro**



## **TRANSMITANCIA**

La espectrofotometría es un método analítico que utiliza los efectos de la interacción de las radiaciones electromagnéticas con la materia (átomos y moléculas) para medir la absorción o la transmisión de luz por las sustancias.

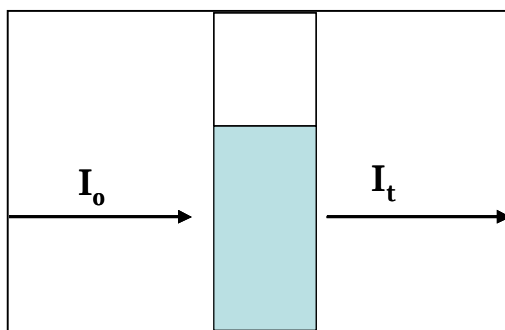
Las sustancias químicas son capaces de absorber luz (o radiaciones electromagnéticas) de determinadas longitudes de onda; en concreto aquellas radiaciones cuya energía es igual a la diferencia de energía entre los estados fundamental y excitado de los átomos o moléculas que las componen.

Cuando un haz de luz monocromática (de una sola longitud de onda) incide sobre una disolución de una sustancia que la absorbe, la intensidad de luz transmitida (la que atraviesa la disolución) es menor que la incidente (Figura 13).

Si  $I_0$  es la intensidad de luz incidente e  $I_t$  es la intensidad de luz transmitida, se define la Transmitancia (T) como la fracción de luz incidente que es transmitida:

$$T = I_t / I_0 \quad (23)$$

**Figura 13. Transmisión de un haz de luz**



La Transmitancia de una sustancia en disolución se mide con un aparato denominado espectrofotómetro, el cual consta básicamente de:

- Una fuente de luz: Lámpara que emite una mezcla de longitudes de onda. Puede ser de tungsteno (luz visible e infrarroja) o de deuterio (luz ultravioleta)
- Un colimador: Conjunto de lentes que enfocan la luz convirtiéndola en un haz de rayos paralelos.
- Monocromador: Dispositivo que selecciona luz de una única longitud de onda. Está compuesto por un difractor, que suele ser un prisma que descompone la luz policromática en sus diferentes longitudes de onda, y por un selector, que sólo deja pasar la luz de la longitud de onda seleccionada.
- Compartimiento de la muestra: Lugar donde se coloca la solución a medir, en una cubeta o en un tubo de ensayo.
- Detector fotoeléctrico: Transductor de luz en electricidad. La luz provoca el desplazamiento de electrones en el metal del detector, produciendo una corriente eléctrica que es proporcional a la intensidad de la luz recibida.
- Registrador: Mide la señal del detector, la compara y genera una medida en una escala determinada.

Antes de realizar cualquier medida en un espectrofotómetro hay que calibrarlo con un blanco para compensar los efectos de reflexión, dispersión o absorción de luz de la celda con la muestra. El funcionamiento del aparato es el siguiente: la luz de la fuente pasa a través del monocromador, que selecciona una banda estrecha de

longitudes de onda del haz incidente; esta luz monocromática atraviesa una muestra de espesor  $b$ , y se mide así la potencia radiante de la luz que sale.

La medición de una muestra se inicia con el encendido del aparato, acción que dura aproximadamente unos 15 segundos mientras este se estabiliza. En seguida se selecciona la longitud de onda en la cual se va a medir, que para el presente estudio fue de 254 nm (luz ultravioleta), se llena con el blanco (agua destilada) la cubeta de cuarzo (este material no interfiere en la medición) y se introduce en el equipo para realizar así su calibración. Para esta longitud de onda el agua destilada tiene una transmitancia de 100%.

Con el aparato calibrado, se hacen las mediciones de las muestras de la misma forma que se realizo con el blanco.

El aparato utilizado para medir la transmitancia fue un espectrofotómetro Marca Spectronic modelo Genesys™ 8 se puede observar en la Figura 14.

**Figura 14. Espectrofotómetro**



## **TEMPERATURA**

La temperatura ejerce una gran influencia en algunos procesos químicos y biológicos que hacen parte de la depuración de aguas residuales. Los contaminantes disueltos en el agua son eliminados por acción de las reacciones bioquímicas producidas en el humedal, estas reacciones son muy sensibles a la temperatura, de tal forma que al ser favorables las condiciones ambientales habrá

una gran actividad microbiológica, la cual es responsable de la eliminación de los nutrientes presentes en el agua residual.

La medición de la temperatura se realizó con termómetros modelo Checktemp 1, marca Hanna, los cuales pueden observarse en la Figura 15.

**Figura 15. Termómetro**



La medición se realizó diariamente en tres puntos del humedal, todas las mañanas antes de hacer el vertido del agua residual afluyente. La medida se efectuó por inmersión del termómetro dentro del lecho gravoso en un punto situado al principio del humedal, otro punto justo en medio y el último punto en el final.

## **CONDUCTIVIDAD ELECTRICA**

La conductividad eléctrica se define como la capacidad que tienen las sales inorgánicas en solución (electrolitos) para conducir la corriente eléctrica.

El agua pura, prácticamente no conduce la corriente, sin embargo el agua con sales disueltas conduce la corriente eléctrica. Los iones cargados positiva y negativamente son los que conducen la corriente, y la cantidad conducida dependerá del número de iones presentes y de su movilidad.

En la mayoría de las soluciones acuosas, entre mayor sea la cantidad de sales disueltas, mayor será la conductividad, este efecto continúa hasta que la solución

está tan llena de iones que se restringe la liberta de movimiento y la conductividad puede disminuir en lugar de aumentar.

Algunas sustancias se ionizan en forma mas completa que otras y por lo mismo conducen mejor la corriente. Las moléculas de sustancias orgánicas que por la naturaleza de sus enlaces son no iónicas como la sacarosa, los hidrocarburos y los carbohidratos, no se ionizan en el agua y por lo tanto no conducen la corriente eléctrica.

El equipo para la medición de la conductividad eléctrica en muestras de agua, es un equipo que consta de un sensor y de una parte electrónica desde donde se envía una señal eléctrica hacia dicho sensor durante cada medición. En el presente estudio se utilizó un conductivímetro marca Yellow Springs Instrument, modelo 30/10FT, el cual se puede observar en la Figura 16.

**Figura 16. Conductivímetro**



Para la toma de la conductividad se dispone de un vaso de precipitado muy limpio, al cuál se le insertan 100 ml de agua destilada, se le introducen el electrodo y se realiza directamente la lectura para comprobar su conductividad cuyo resultado es cero.

Posteriormente se realiza el mismo procedimiento pero con las respectivas muestras del agua residual.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo, se presentan los resultados obtenidos después de analizar las muestras de agua residual que se extrajeron de los humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal, los cuales se fabricaron en laboratorio para depurar aguas residuales sintéticas. La toma de datos se realizó durante los meses de Abril, Mayo y Junio de 2004.

El análisis de los resultados inicia con el estudio de los parámetros de control que se realizaron como son: temperatura, turbiedad, transmitancia, conductividad y contenido de amonio. En seguida se realiza el análisis de la eliminación de la materia orgánica y la influencia de su estado físico en la eficiencia de los humedales, el cual es el objetivo principal de esta tesina.

### 4.1 PARAMETROS DE CONTROL

**4.1.1 Temperatura.** La medición de este parámetro se realizó en tres puntos del humedal, sin embargo al no existir variación se calculó el valor promedio de estas tres mediciones.

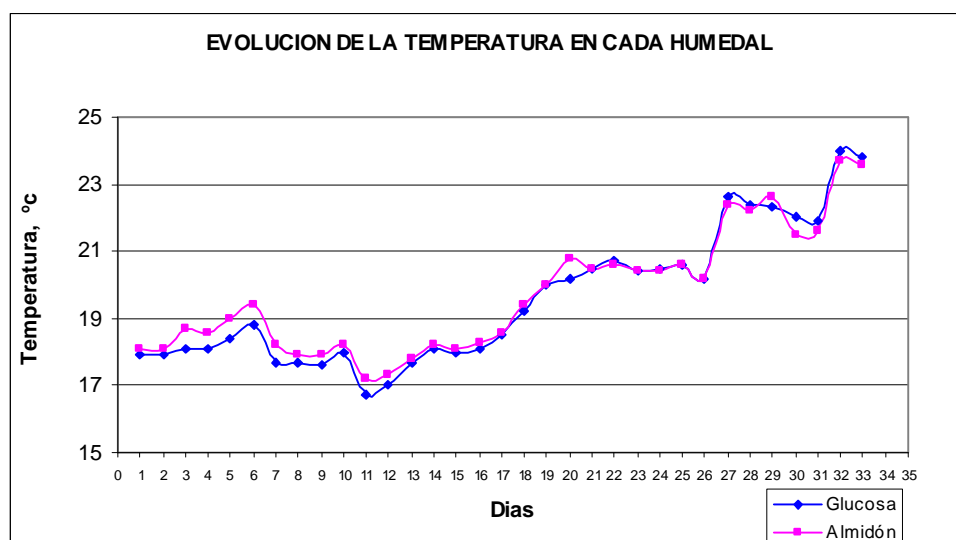
- Humedal 1 (Glucosa)

La temperatura en el sistema registró un ascenso de 6°C durante todo el experimento, con valor máximo de 24 °C, un valor mínimo de 16,7 °C y una media de 19,6 °C. Es de destacar que este ascenso se debió al cambio de estación, primavera a verano.

En general la temperatura no tuvo variaciones importantes que pudiesen influir en los procesos metabólicos que se dieron en el humedal.

El comportamiento de la temperatura se puede observar en la Figura 17.

**Figura 17. Evolución de la Temperatura en Humedales 1 y 2**



- Humedal 2 (Almidón)

La temperatura en este modelo tuvo un ascenso de 6,5 °C, y registró un valor mínimo de 17.2 °C, un máximo de 23.7 °C y una media de 19.7 °C.

Al igual que en el humedal 1, la variación de temperatura se dio principalmente por el cambio de estación, de primavera a verano. Además dicha variación se presentó como un ascenso gradual.

El comportamiento de la temperatura en el humedal se observa en la Figura 17.

- Comparación de la Temperatura en los Humedales

Según el análisis individual de los humedales y la Figura 17, se concluye que hay una diferencia de 0,01 °C. en promedio entre los dos sistemas, la cual no es muy significativa, por lo tanto se establece que la temperatura es prácticamente la misma en los dos humedales.

Como se expuso en los análisis individuales, el ascenso de temperatura se produjo por el cambio de estación y no influyó en los procesos bioquímicos de los humedales.

**4.1.2 Turbiedad.** La evolución de la turbiedad se analizará por separado para cada humedal como parámetro de control. Y a continuación se comparará dicha evolución según el estado físico de la materia orgánica.

- Humedal 1 (Glucosa)

Debido a que la glucosa es una sustancia que se disuelve completamente en agua, y no presenta ningún color al estar diluida, era de esperar que la turbiedad del agua residual afluyente preparada con glucosa presentara un valor de turbiedad cercano a cero.

Las mediciones de turbiedad en el afluyente arrojaron un valor máximo de 0,9UNT y un valor mínimo de 0,1UNT. Es importante destacar que el agua destilada tiene una turbiedad prácticamente nula, lo cual nos permite confirmar que la turbiedad del afluyente es muy baja.

Como se puede observar en la Figura 18 la turbiedad del afluyente no tuvo variaciones significativas, lo cual indica que la preparación del agua residual fue sistemática y que la glucosa es un compuesto que tiene un comportamiento muy regular.

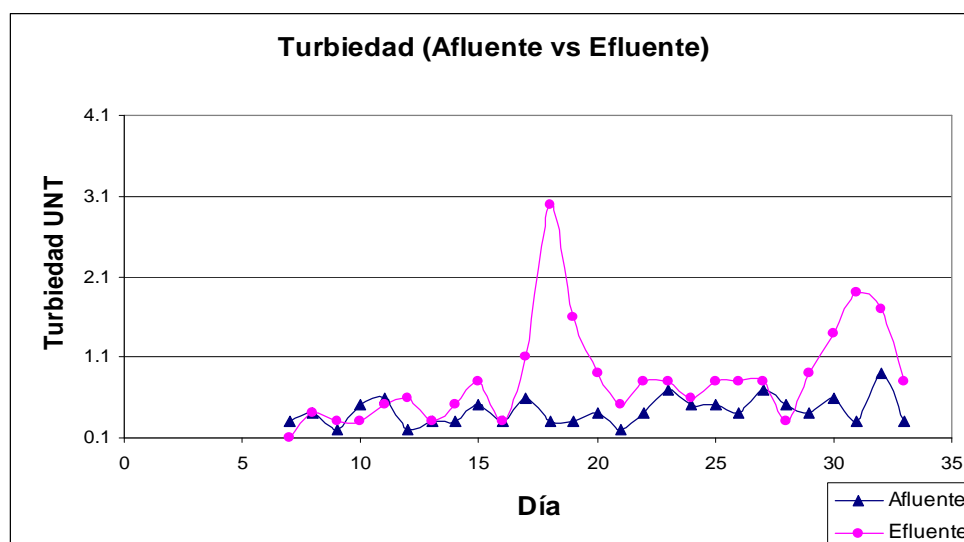
Por otra parte, el agua residual efluente presentó turbiedades del orden de 0,1 a 1,6 UNT, descartando los 5 primeros días de ensayos de la muestra porque se llegó a tener valores de hasta 49 UNT, debido a que después de cierto tiempo de la toma de la muestra se formaron precipitados, que no demostraban la calidad real del efluente, por esta razón la medición de la turbiedad se empezó a tomar in situ arrojando valores normales. Sumado a lo anterior, se evidencia que en los días 17 a 19 se presentó un ascenso de la turbiedad sin alguna razón especial.

La evolución de la turbiedad en el agua residual efluente aparece en la Figura 18.

La diferencia entre el afluyente y el efluente no es muy significativa porque la turbiedad en los dos es muy semejante. Sin embargo el efluente presenta valores de turbiedad mayores debido a que el humedal genera partículas por la degradación de las raíces y la materia orgánica, así como por la regeneración de la biopelícula.

Al estar la materia orgánica disuelta en el agua afluyente no se puede establecer un porcentaje de rendimiento de eliminación de la turbiedad ya que se presenta ganancia de turbiedad en lugar de disminución. Sin embargo esto no indica que no hay degradación de la materia orgánica puesto que como se verá mas adelante el ensayo de la DQO nos muestra dicha degradación.

**Figura 18. Evolución de la Turbiedad en Humedal 1 (Glucosa)**



- Humedal 2 (Almidón)

El Humedal 2 depuró agua residual preparada con almidón, dicho componente se encuentra en estado particulado, lo cual influye que el agua residual afluente tenga una cierta turbiedad.

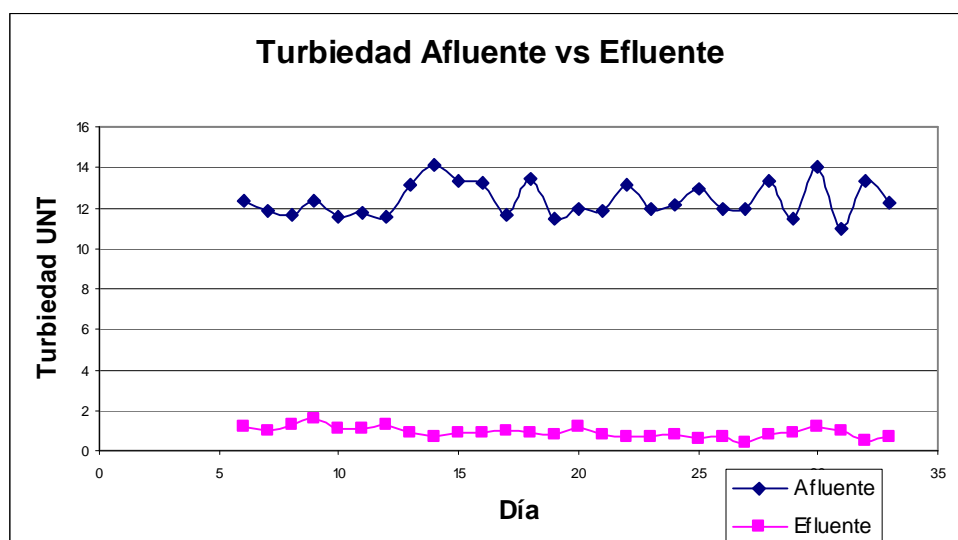
El afluente registró valores de turbiedad en el rango de 8,1 a 14,4 UNT. Se presentó variación de 6 unidades en el rango, debido a que el almidón es un compuesto que decanta fácilmente, por lo tanto al realizar la mezcla de agua residual y tomar la muestra, el almidón aún siendo agitado tendía a decantar y a no estar distribuido uniformemente en el agua de dilución. La evolución del afluente se puede observar en la Figura 19.

La turbiedad del agua residual efluente presentó turbiedades del orden de 0,4 a 1,6 UNT, descartando los 5 primeros días de ensayos de la muestra porque se llegó a tener valores de hasta 99 UNT, debido a la formación de precipitados, que no demostraban la calidad real del efluente, por esta razón la medición de la turbiedad se empezó a tomar in situ arrojando valores normales.

Según los resultados el efluente tiene turbiedades muy bajas, lo cual indicaría que el almidón ha cambiado de estado físico, gracias a los procesos bioquímicos que se suceden en el humedal.

La evolución de la turbiedad del efluente se puede observar en la Figura 19.

**Figura 19. Evolución de la Turbiedad en Humedal 2 (Almidón)**



La diferencia entre el afluente y el efluente es importante ya que la turbiedad disminuye tanto que tiende a alcanzar valores cercanos a cero. Esta disminución demuestra que el almidón está sufriendo cambios ya sea por su propio estado físico o por los procesos biológicos de depuración.

- Comparación de la Turbiedad en los dos Humedales

Según el análisis individual de los humedales se puede concluir que los dos sistemas tienen una turbiedad en el efluente muy similar.

La semejanza radica en que una parte del almidón tiene una retención en los primeros centímetros del humedal, y la otra parte es hidrolizada a partículas más pequeñas que son procesadas fácilmente por la biopelícula, de esta forma la turbiedad disminuye puesto que en el efluente ya no se tendrán partículas grandes, sino por el contrario partículas más pequeñas que pueden ser productos intermedios de su degradación biológica. Por lo tanto, al haber degradación se logró que el almidón estuviera al mismo nivel de turbiedad que la glucosa. Es importante destacar que esta similitud no indica que las sustancias en los dos efluentes sean las mismas o que el rendimiento de eliminación de materia orgánica sea igual.

Por otro lado, la glucosa es un compuesto que se degrada al 100%, por lo cual, como se explicó anteriormente la turbiedad en el efluente se debe posiblemente a restos de partículas que son arrastradas por el flujo.

Es satisfactorio este resultado en los efluentes, ya que una turbiedad mínima proporciona mayor calidad al agua residual que sería retornada al medio ambiente.

Sin embargo, es importante que se realice un análisis más profundo al efluente para determinar que tipo de partículas o materia se encuentra en el, y por que se presenta el precipitado después de dejar cierto tiempo al efluente en contacto con el aire.

**4.1.3 Transmitancia.** La medición de la transmitancia es un parámetro de control semejante a la turbiedad. Principalmente se utilizó para controlar si el comportamiento de los humedales era constante.

- Humedal 1 (Glucosa)

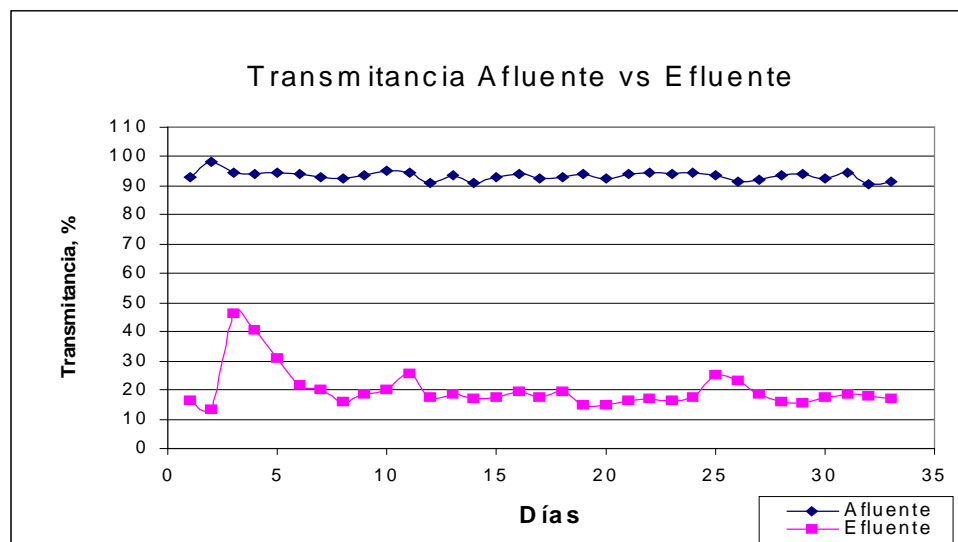
La glucosa no presenta coloración, ni partículas que puedan interferir el paso de la luz en la medición de la transmitancia, por esta razón los valores obtenidos al realizar la medición en el afluente se encontraron muy cercanos al 100%. Este valor de 100% corresponde al agua destilada que se utilizó como patrón y deja pasar la luz al 100%.

Como se puede observar en la Figura 20 el afluente tuvo un comportamiento regular, registrando un valor máximo de 98%, un valor mínimo de 91% y un valor medio de 93%.

El control del afluente, da una idea principalmente de que los análisis se realizaron diariamente siguiendo un estricto procedimiento, lo cual disminuye el error en la obtención de resultados.

Respecto al efluente, los valores obtenidos de su análisis muestran un fuerte incremento en la presencia de materia que absorbe la luz y solo deja pasar en promedio el 18% de la misma, con un valor máximo de 46% y un valor mínimo de transmisión de 13%.

**Figura 20. Evolución de la Transmitancia en Humedal 1 (Glucosa)**



Según la observación de la muestra en el momento de obtenerse y después al analizarse, se notó que ésta tendía a presentar una precipitado. Dicho cambio iniciaba inmediatamente después de tomar la muestra y a medida que se tardara más en realizar la medición el precipitado era mayor. Es importante aclarar que no era posible realizar la medición in situ debido a que el espectrofotómetro es un equipo de mucho cuidado y que no debe ser manipulado constantemente puesto que puede afectar su funcionamiento. Sin embargo, la medición del efluente se hizo siempre de la misma forma y procurando disminuir los errores debidos a la formación del precipitado.

La evolución del efluente se puede observar en la Figura 20.

- Humedal 2 (Almidón)

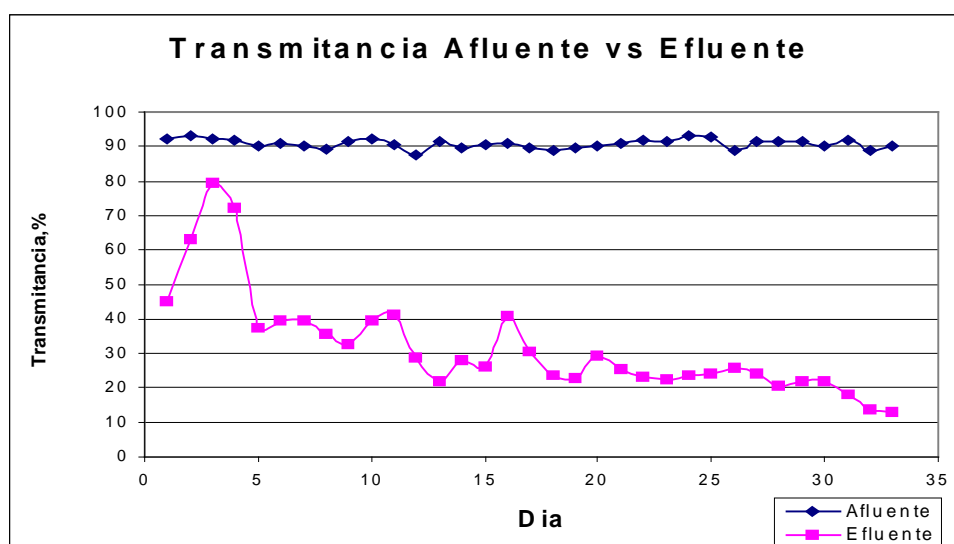
El afluente de este humedal registró valores de transmitancia en el rango de 88% a 93%, con una media de 91%. El almidón es un compuesto que decanta fácilmente, por lo tanto al realizar la mezcla de agua residual y tomar la muestra, el almidón aún siendo agitado tendía a decantar y a no estar distribuido uniformemente en el agua de dilución, sin embargo los resultados obtenidos son satisfactorios puesto que no varían demasiado y se presentan en el mismo rango a lo largo de todo el experimento.

La transmitancia del agua residual efluente tuvo un valor medio de 27%, en el rango de 41% a 13%, sin embargo hubo algunos valores mayores que fueron

descartados porque no corresponden al comportamiento normal de la muestra. El efluente tuvo gran variación en la transmitancia porque la formación del precipitado debido a la exposición al medio ambiente afecta el resultado, generando dicha variación.

La evolución de la transmitancia tanto del afluente como del efluente se puede observar en la Figura 21.

**Figura 21. Evolución de la Transmitancia en Humedal 2 (Almidón)**



Comparando la diferencia entre afluente y efluente se puede establecer que hay una ganancia de materia que impide el paso de la luz y por tanto disminuye el porcentaje de transmitancia, esto puede deberse, como se ha mencionado, a la formación del precipitado que impide la medición exacta de la transmitancia.

- Comparación de la Transmitancia en los dos Humedales  
Según el análisis individual de los humedales se puede concluir que los dos sistemas tienen una transmitancia en el efluente diferente.

El humedal que depura glucosa tiene un valor medio de transmitancia en el efluente menor que el humedal que depura almidón (18% vs. 27%). Este resultado se puede deber a que los dos humedales no sigan la misma vía de degradación

de la materia orgánica, y en los efluentes se encuentren diferentes tipos de sustancias.

Por esta razón, se debe analizar con más detalle el tipo de sustancia que se encuentra en los efluentes, con el fin de aclarar los procesos que se están llevando a cabo en cada humedal.

Por otra parte, es importante destacar que el humedal que depuró glucosa tuvo valores de transmitancia con menos variación que el humedal del almidón, situación que también debe ser analizada con más detalle pues es una clara indicación que los dos humedales no tienen un metabolismo similar.

**4.1.4 Conductividad Eléctrica.** Ya que la conductividad eléctrica es una medición del contenido de sales inorgánicas, esta medición nos da idea principalmente de la calidad del agua de dilución, mas no de la materia orgánica que usamos en el experimento.

- Humedal 1 (Glucosa)

La conductividad registrada en las muestras de agua afluyente alcanzó un valor máximo de 1758  $\mu\text{S}$ , un valor mínimo de 743  $\mu\text{S}$ , y un valor medio de 1189  $\mu\text{S}$ .

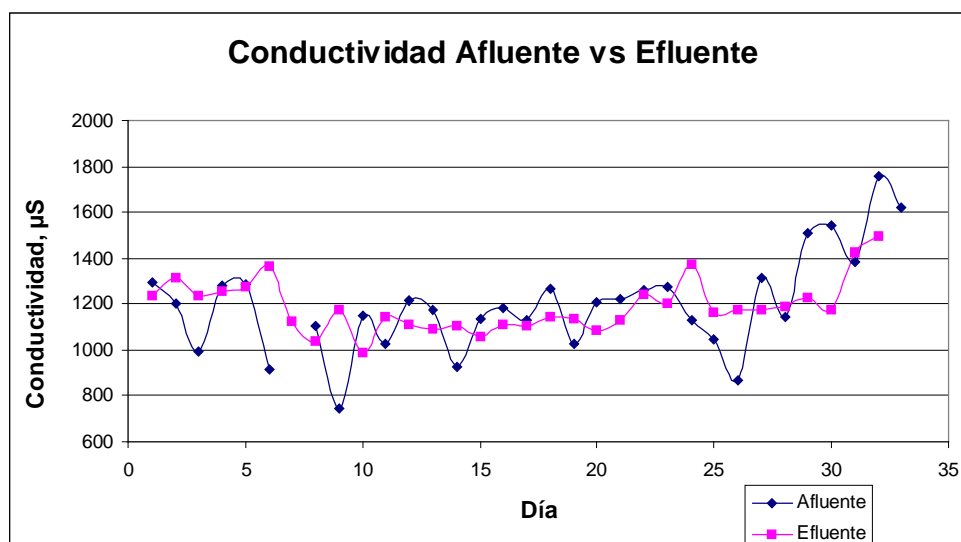
Para efectos de realizar una comparación, el agua potable tiene por lo general una conductividad entre 800 y 1200  $\mu\text{S}$ .

Respecto al efluente se registraron valores de conductividad de 1494  $\mu\text{S}$  de máximo, 983  $\mu\text{S}$  de valor mínimo, y un valor medio de 1193  $\mu\text{S}$ .

Según los resultados de valores medios entre afluyente y efluente, su diferencia es muy pequeña, por lo cual se puede decir que el humedal no afecta al contenido de sales.

Por otra parte, la conductividad tiene un comportamiento estable a lo largo del experimento, tanto en el afluyente como en el efluente, lo cual se puede observar en la Figura 22.

Figura 22. Evolución de la Conductividad en Humedal 1 (Glucosa)



- Humedal 2 (Almidón)

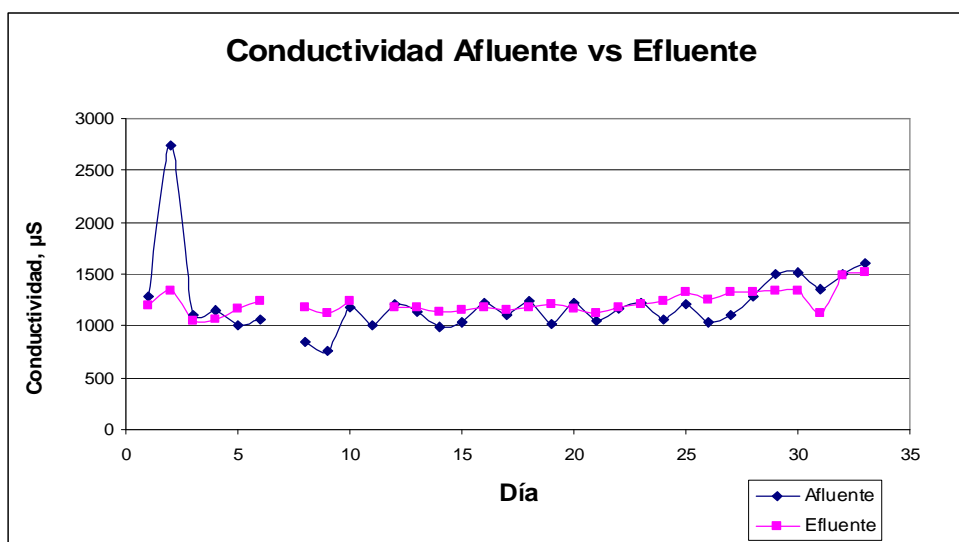
La conductividad registrada en las muestras de agua afluente alcanzó un valor máximo de 2732  $\mu\text{S}$ , un valor mínimo de 762  $\mu\text{S}$ , y un valor medio de 1210  $\mu\text{S}$ .

Respecto al efluente se registraron valores de conductividad de 1519  $\mu\text{S}$  de máximo, 1053  $\mu\text{S}$  de valor mínimo, y un valor medio de 1214  $\mu\text{S}$ .

Según los resultados de valores medios entre afluente y efluente, su diferencia es casi nula, por lo cual se puede decir que el humedal no afecta al contenido de sales.

Por otra parte, la conductividad tiene un comportamiento estable a lo largo del experimento, tanto en el afluente como en el efluente, lo cual se puede observar en la Figura 23.

**Figura 23. Evolución de la Conductividad en Humedal 2 (Almidón)**



- **Comparación de la Conductividad en los dos Humedales**

Según el análisis individual de los humedales y su posterior comparación, se puede concluir que los dos sistemas tienen una conductividad muy similar.

Los valores medios en los dos humedales son relativamente cercanos, puesto que la unidad de medida es grande, ya que una variación de 40  $\mu\text{S}$  como máximo, no supone que la conductividad registrada sea diferente.

De acuerdo a los resultados, se corrobora que no hay intervención del sistema en el tratamiento de sales inorgánicas.

**4.1.5 Amonio.** El contenido de nitrógeno amoniacal y en concreto en forma de amoniaco, es un parámetro que nos proporciona información sobre el estado ecológico de la calidad de un agua. El nitrógeno amoniacal se encuentra en solución acuosa, en forma de ión amonio o como amoniaco. Además, el contenido de amonio, da una idea del tipo de ruta de eliminación de nutrientes que puede tener el humedal.

- Humedal 1 (Glucosa)

La medición del contenido de amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) en el afluente registró un valor máximo de 16,6 mg/l, un valor mínimo de 4,6 mg/l y una media de 11,8 mg/l.

La evolución del afluente a lo largo de todo el experimento no fue constante, presentó una variación muy marcada en los primeros nueve días. La cual se debe principalmente a que hubo un cierto tiempo de sistematización en la medición del amonio porque el potenciómetro es un instrumento muy sensible, que puede descalibrarse fácilmente.

Respecto al efluente, se tuvo una concentración máxima de 10,6 mg/l, una mínima de 4,8 mg/l y una media de 8,4 mg/l. Como es de esperarse, el efluente también tuvo variación en los primeros nueve días, a partir del cual se estabiliza la concentración.

Al comparar el afluente con el efluente, se puede concluir que hay un descenso en el contenido de amonio, lo cual indica que el humedal logra eliminar un 28% de la concentración inicial. Sin embargo este porcentaje es bajo, e indica que debido a la baja presencia de oxígeno disuelto en el agua, la nitrificación es poca.

También es de destacar que en algunos días de muestreo el contenido de amonio en el efluente fue mayor que en el afluente, esto se puede presentar principalmente por una aportación extra de nitrógeno debido a la descomposición anaerobia del nitrógeno orgánico atrapado en el humedal como materia particulada.

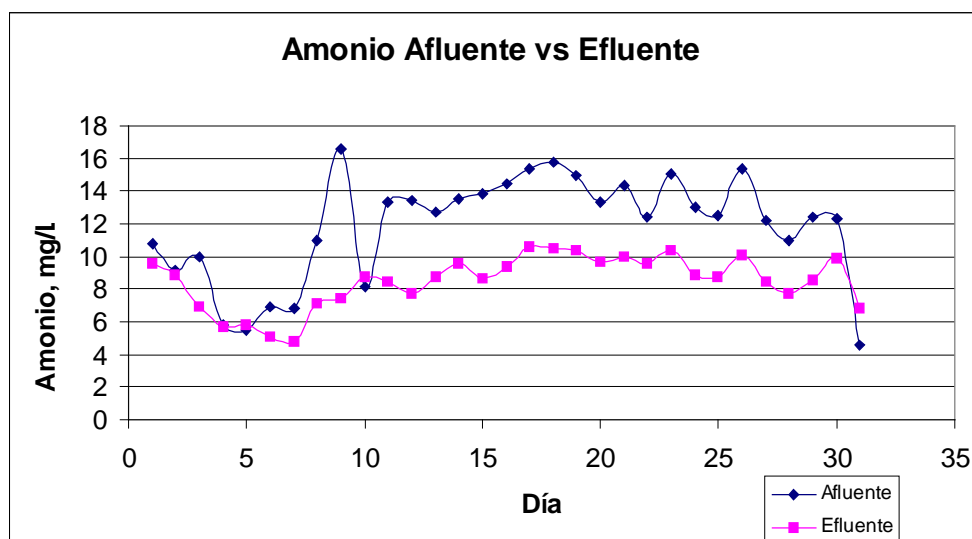
En la Figura 24 se puede observar el comportamiento del amonio en el afluente y el efluente del humedal.

- Humedal 2 (Almidón)

El contenido de amonio en el afluente presentó una concentración máxima de 16,4 mg/l, una mínima de 7,4 mg/l y una media de 12,2 mg/l.

La evolución del afluente a lo largo de todo el experimento no fue constante, presentó una variación muy marcada en los primeros nueve días, la cual se debió a que hubo un cierto tiempo de sistematización en la medición como se mencionó en el apartado anterior.

**Figura 24. Evolución del Amonio en Humedal 1 (Glucosa)**



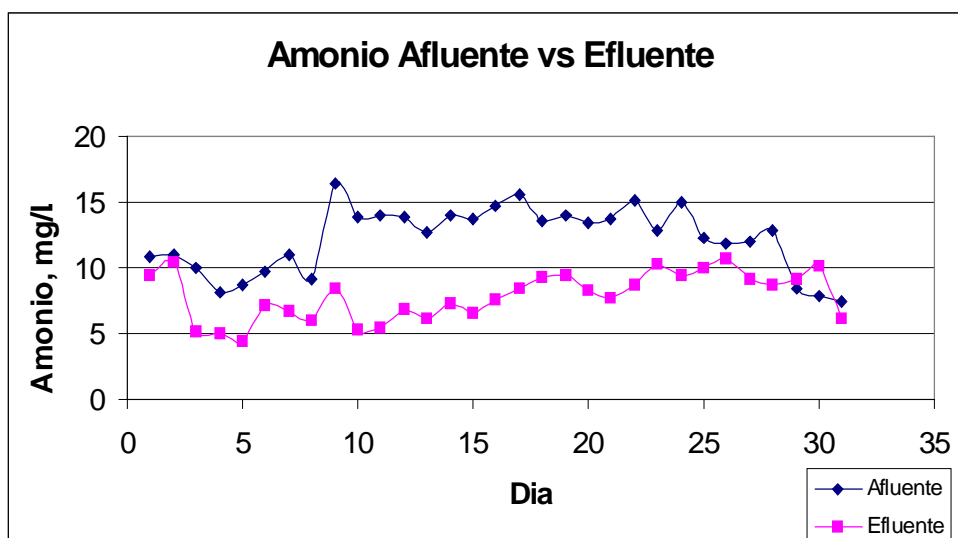
Respecto al efluente, se tuvo una concentración máxima de 10,7 mg/l, una mínima de 4,4 mg/l y una media de 7,9 mg/l. Como es de esperarse, el efluente también tuvo variación en los primeros nueve días, a partir del cual se estabiliza la concentración.

Al comparar el afluyente con el efluente, se puede concluir que hay un descenso en el contenido de amonio, lo cual indica que el humedal logra eliminar un 34% de la concentración inicial. Sin embargo este porcentaje es bajo, e indica que debido a la baja presencia de oxígeno disuelto en el agua, la nitrificación es poca.

También es de destacar que en algunos días de muestreo el contenido de amonio en el efluente fue mayor que en el afluyente, esto se puede presentar principalmente por una aportación extra de nitrógeno debido a la descomposición anaerobia del nitrógeno orgánico atrapado en el humedal como materia particulada.

En la Figura 25 se puede observar el comportamiento del amonio en el afluyente y el efluente del humedal.

**Figura 25 Evolución del Amonio en Humedal 2 (Almidón)**



- Comparación del Amonio en los dos Humedales

Según el análisis individual de los humedales y su posterior comparación, se puede concluir que los dos sistemas tienen un contenido de amonio similar.

Al analizar el porcentaje de eliminación se encontró que el humedal que degrada el almidón (34%) procesa más el amonio que el humedal que degrada la glucosa (28%). Estos rendimientos de eliminación son menores a los registrados en la literatura para humedales poco profundos como en este caso, ya que se esperarían rendimientos de eliminación del amonio del orden del 35% al 66%.

Por otra parte al comparar el rendimiento de eliminación desde el punto de vista estadístico, se obtuvo que estos porcentajes no son diferentes, y corroboran que los humedales son iguales en la degradación del nitrógeno, además se concluye que hay poca nitrificación, lo cual es debido a los bajos niveles de oxígeno.

También se puede concluir que al no haber suficiente presencia de oxígeno en los humedales, los dos sistemas son principalmente anaerobios y la ruta de eliminación de la materia orgánica se rige por esta condición.

## 4.2 ELIMINACION DE MATERIA ORGÁNICA

La eliminación de materia orgánica se evaluó desde el punto de vista de su estado físico (disuelto o particulado), mediante el análisis de los datos obtenidos con la demanda química de oxígeno.

**4.2.1 Humedal 1 (Glucosa).** El contenido de materia orgánica en el afluente tuvo un valor máximo de 266mgO<sub>2</sub>/l, un mínimo de 150 mgO<sub>2</sub>/l y una media de 175 mgO<sub>2</sub>/l. El valor de la media corresponde aproximadamente con el valor teórico que se quiso tener en el afluente, el cual era de 180 mgO<sub>2</sub>/l.

El afluente, como se puede observar en la Figura 26, no presenta variaciones significativas que pudieran intervenir en el experimento.

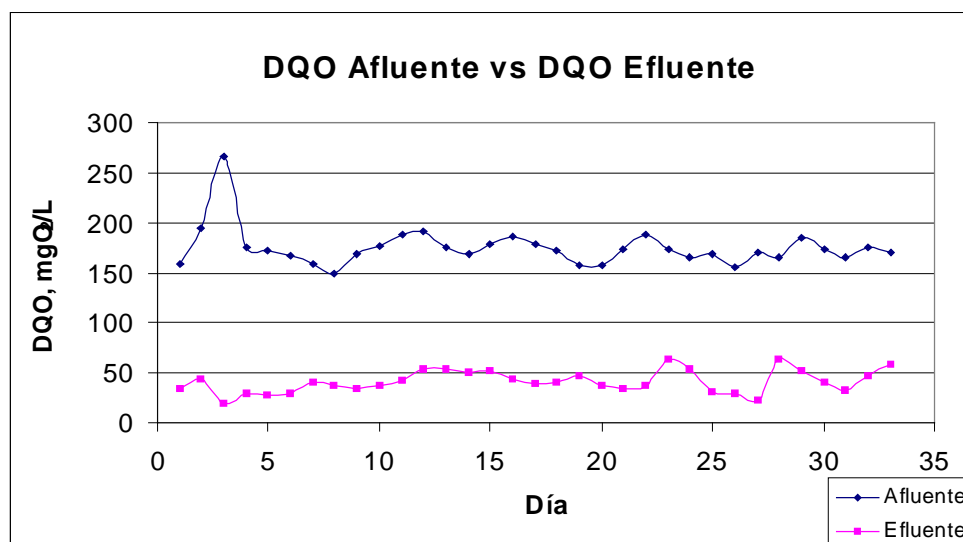
Respecto al efluente, se observó un valor máximo de 64 mgO<sub>2</sub>/l, un valor mínimo de 20 mgO<sub>2</sub>/l y una media de 41 mgO<sub>2</sub>/l. Al igual que el afluente, no se presentó ninguna variación importante, sino por el contrario, el comportamiento fue muy similar.

El rendimiento de eliminación de materia orgánica, tuvo un valor medio de 134mgO<sub>2</sub>/l, lo que en porcentaje respecto del afluente representa el 76% del total de materia orgánica puesta en el humedal.

**4.2.2 Humedal 2 (Almidón).** El contenido de materia orgánica en el afluente tuvo un valor máximo de 194 mgO<sub>2</sub>/l, un mínimo de 91 mgO<sub>2</sub>/l y una media de 147 mgO<sub>2</sub>/l.

Es importante aclarar, que el hecho de no registrar el valor medio teórico de contenido materia orgánica con el ensayo de la DQO que debía ser de 180 mgO<sub>2</sub>/l, no indica que en la mezcla no se tuviera tal contenido, sino que al ser el almidón un compuesto altamente sedimentable, al realizar el ensayo de DQO, el compuesto no se encontró en suspensión completamente y por ello su presencia en la muestra no alcanzó dicho valor.

**Figura 26. Evolución de la DQO en el Humedal 1 (Glucosa)**



La evolución del afluente a lo largo del experimento se puede observar en la Figura 27.

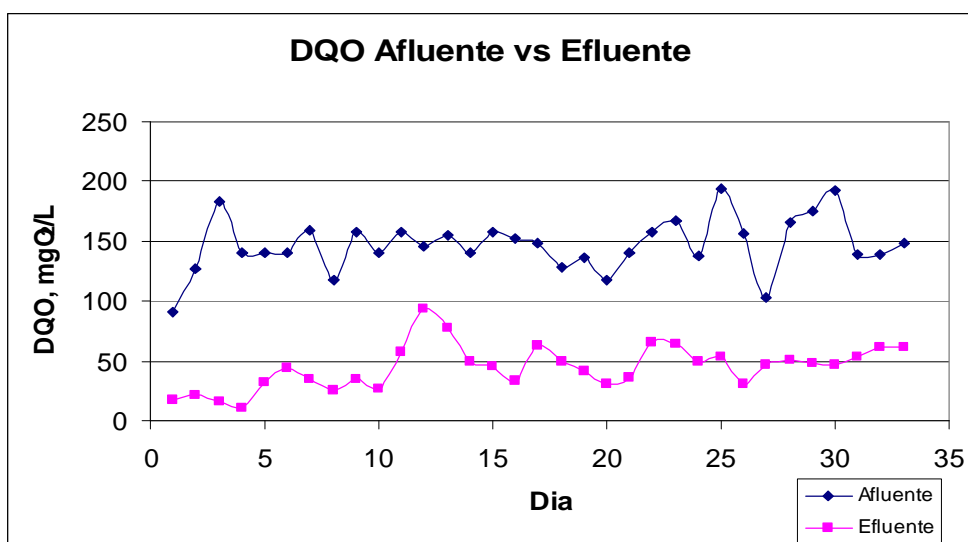
Respecto al efluente, se observó un valor máximo de 93 mgO<sub>2</sub>/l, un valor mínimo de 11 mgO<sub>2</sub>/l y una media de 45 mgO<sub>2</sub>/l, y su comportamiento se encuentra en la Figura 27.

El rendimiento de eliminación de materia orgánica, tuvo un valor medio de 102mgO<sub>2</sub>/l, lo que en porcentaje respecto del afluente representa el 69% del total de materia orgánica puesta en el humedal.

**4.2.3 Comparación de los rendimientos de eliminación de la Materia Orgánica.** Según los resultados obtenidos, el humedal 1 tiene un rendimiento de eliminación de 76%, mayor al obtenido por el humedal 2 de 69%.

Con el fin de comprobar si estos resultados realmente son diferentes, se realizó el análisis estadístico de significancia mediante la t de student, y se obtuvo que estadísticamente la eliminación de materia orgánica si es diferente, predominando la eliminación en el humedal 1. Dicha diferencia, se debe principalmente al estado físico y a su vez químico de la materia orgánica.

Figura 27. Evolución de la DQO en Humedal 2 (Almidón)



El humedal 1, que depuró la glucosa, alcanzó una mayor degradación de dicha materia orgánica, puesto que esta sustancia por sus propiedades físicas y químicas es degradada fácilmente por la biopelícula, cosa que el almidón no puede garantizar por las siguientes razones:

- Su estado físico:

El almidón se encuentra en estado particulado. Esta forma física hace que al entrar en el humedal, las partículas sean retenidas debido al efecto tamiz, porque los poros de la grava tienen menor tamaño que la partícula, o por intercepción directa, ya que las partículas al acercarse a la superficie de la grava a una distancia menor que su radio, son interceptadas y quedan adheridas. Esta retención de las partículas de almidón hace que posteriormente se genere materia orgánica disuelta, que a su vez debe ser degradada por el humedal.

- Su densidad:

Debido a la densidad de sus partículas el almidón tiende a decantar fácilmente, por esta razón al entrar en el humedal tenderá a sedimentar en los primeros centímetros del sistema. Esta parte de almidón se convierte en una fuente de generación de materia orgánica disuelta, lo cual incrementa la materia que debe

degradar el humedal, haciendo que la eliminación no sea tan rápida respecto a la materia que entró directamente al humedal en estado disuelto.

- Su estado químico:

El almidón es un polisacárido, es decir un conjunto de moléculas, por lo tanto para ser degradado debe ser hidrolizado y de esta forma separado en moléculas individuales o monómeros, lo cual implica mayor tiempo de degradación respecto a una molécula como la glucosa que está lista para degradada. La separación en monómeros es indispensable ya que los polímeros como el almidón y las proteínas no penetran en las membranas celulares y por ende las bacterias presentes en el biofilm pueden realizar así el proceso de degradación.

- Su tamaño:

El almidón es una partícula de gran tamaño, de entre 2 y 150  $\mu\text{m}$  (DEFRA, 2002), es decir una partícula supracoloidal o una partícula sedimentable. Este tipo de partículas se deben hidrolizar para ser descompuestas en partículas más pequeñas, las cuales continuarán la degradación o podrán igualmente estar en el efluente.

Por las anteriores razones, se demuestra que el almidón debe sufrir una serie de cambios antes de poder ser degradado, y por ello el humedal 2 no tuvo rendimientos de eliminación semejantes al humedal 1.

Por otra parte, se debe tener en cuenta, que la materia orgánica en el efluente del humedal es un balance entre las aportaciones del afluente, la hidrolización en los primeros metros del humedal y las reducciones por filtraciones y por mecanismos de eliminación como son la fermentación anaeróbica, sulfatoreducción, metanogénesis y desnitrificación.

### **4.3 DISCUSION DE RESULTADOS**

Los datos obtenidos en esta investigación permiten realizar un análisis global del funcionamiento de los humedales de flujo subsuperficial que se construyeron en laboratorio y los cuales demostraron que el estado físico de la materia orgánica es un factor determinante en la depuración de la misma.

Según la Figura 28, a simple vista se puede decir que los dos humedales tuvieron un comportamiento similar, sin embargo, esto no es cierto desde el punto de vista

de los procesos físicos y químicos que cada uno de ellos tiene al depurar un agua residual con materia orgánica en diferente estado físico

Los resultados de la turbiedad en los afluentes evidencian la diferencia del estado físico de la materia orgánica, con valores superiores en el humedal del almidón, esto es debido a su estado particulado. Los resultados de los efluentes, muestran una clara disminución del contenido de partículas en el humedal 2, y un aumento en el humedal 1, lo cual se debe al arrastre de partículas de la biopelícula o de degradación de las raíces. Sin embargo, en los dos sistemas, los valores de turbiedad del efluente son óptimos para un posterior vertido al medio ambiente.

Los análisis de la transmitancia presentan que los afluentes son similares, en realidad, esta similitud se debe a que el almidón es altamente sedimentable, por esta razón, aún cuando se haya tenido gran precaución para evitar la decantación y al realizar la medición, este compuesto ya se estaba hundiendo al fondo, por lo tanto no permanecían en suspensión y la medición puede decir no es muy confiable. Por otra parte, se presentó el inconveniente de la precipitación de los efluentes, lo cual a priori podría deberse a la presencia de carbonatos que al estar en contacto con el ambiente se precipitan dando una tonalidad blanquecina a las muestras. La presencia de carbonato, a su vez se podría deber a subproductos de la sulfatoreducción. Sin embargo, sugiero que se debe analizar los efluentes y aclarar este proceso de precipitación.

El contenido de sales, es decir la conductividad, en general fue la misma para el afluente como para el efluente, aun cuando se perciba una diferencia, dicha diferencia no es significativa debida al rango de medida, ya que una variación de hasta 50 uS no indica que haya un contenido de sales muy diferente.

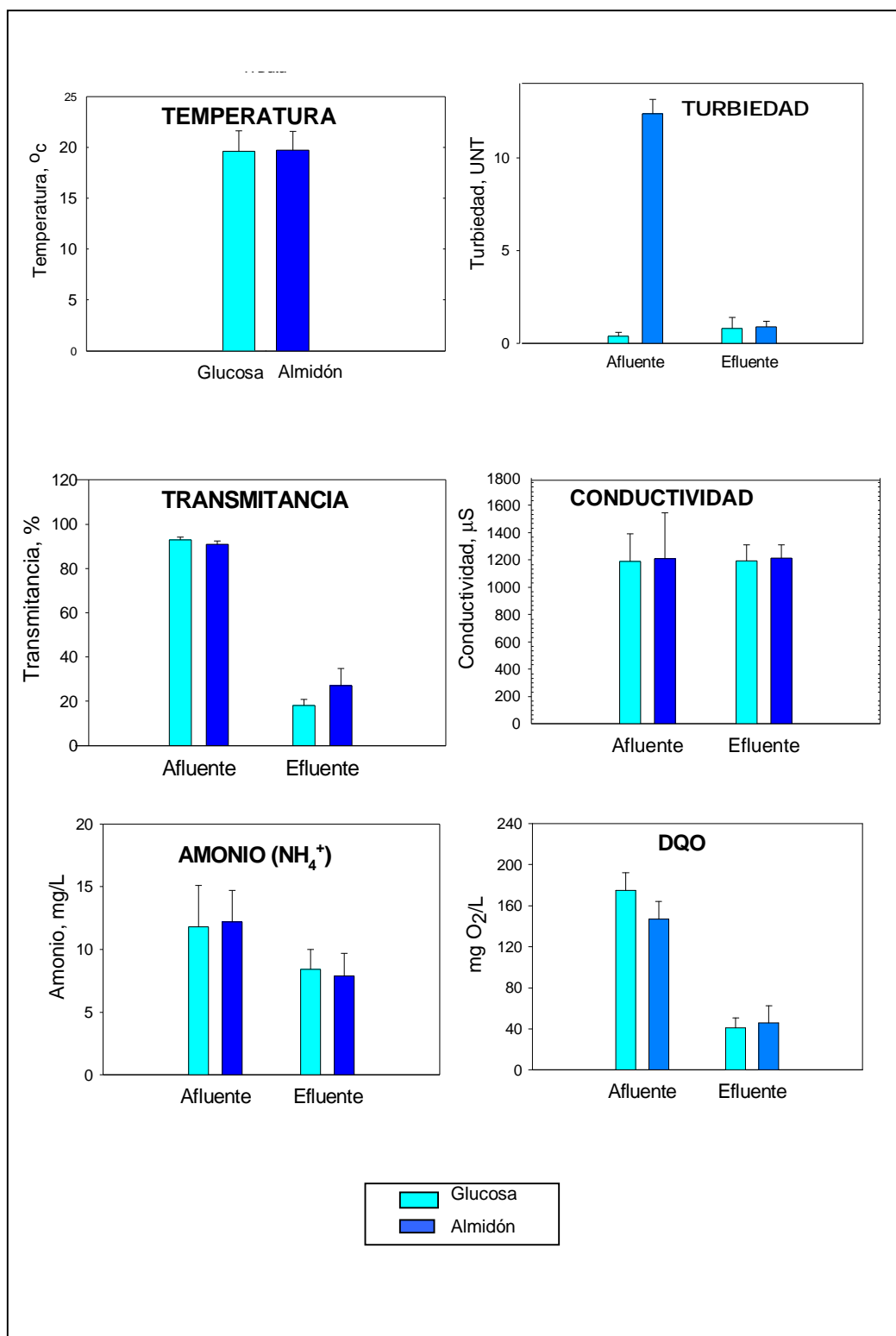
La baja disminución del contenido de amonio en los efluentes evidencia que los humedales están siendo principalmente anaerobios. El oxígeno disuelto que lleva el agua residual es gastado en oxidar la materia orgánica, y ya que no hubo aportación de este elemento por parte de la vegetación, debido a su poco desarrollo, no habrá una cantidad suficiente para realizar la nitrificación y por ende no hubo disminución de la concentración del amonio.

Es importante aclarar, que aunque se trató de simular las condiciones ambientales que se tienen en la naturaleza, no se pudo obtener un desarrollo normal de la vegetación, lo cual en parte puede influir en los procesos metabólicos del humedal, gracias a los aportes de oxígeno que esta puede dar.

Al analizar la medición de DQO, se comprueba que los humedales son sistemas efectivos para degradar materia orgánica, y que dicho rendimiento depende en gran medida de las condiciones en que se encuentren los componentes del agua residual, es decir su estado particulado o disuelto.

Según los porcentajes de eliminación se evidencia que el estado físico de la materia orgánica afecta en gran medida los procesos físicos y químicos que realiza el humedal para la degradación, siendo mayores cuando la materia orgánica está particulada, ya que si una partícula entra al humedal debe sufrir procesos de hidrólisis, retención por el medio granular ya sea por intercepción o absorción, además de los posteriores cambios que sufre esta materia orgánica que es retenida, porque no solo permanece en la grava sino que se convierte en una fuente de materia orgánica disuelta, la cual aumentará la cantidad de materia que debe procesar el sistema, seguidamente la materia ya hidrolizada sufre fermentación y los procesos siguientes a esta como es la sulfatorreducción, metanogénesis o desnitrificación; en contra posición, cuando la materia orgánica se encuentra en estado disuelto, es fácilmente asimilable y durará menos tiempo en degradarse.

Figura 28. Rendimientos medios de los parámetros de control y de la eliminación de contaminantes en cada humedal.



Por lo anterior, se puede deducir que una disminución de la materia orgánica particulada en las aguas residuales domésticas, ayudaría a mejorar la eficiencia de los humedales, aumentando a su vez la calidad del efluente.

Esta disminución se podría conseguir implementando un pretratamiento que actuará principalmente en la materia particulada, como puede ser un sistema de microfiltración, o bien uno de coagulación – floculación.

El sistema de microfiltración, no sería muy viable debido a los costos que generaría, tanto en su instalación como en su mantenimiento. Las membranas usadas para microfiltración son elementos de gran cuidado, ya que se encuentran sometidas a una compresión mecánica que tiende a deformarlas, además su exposición a los agentes químicos que pueda traer el agua residual, las hace altamente susceptible a la oxidación. Sumado a lo anterior, el grado de acidez o alcalinidad del medio afecta su vida útil.

El sistema de coagulación- floculación sería una buena opción, porque permite el uso de coagulantes orgánicos que no alterarían la composición del agua residual, ya que están compuestos de polímeros de origen biológico, derivados de almidón, celulosa y alginatos. Por otra parte, el tiempo usado en este proceso sería de unos 20 minutos.

La estación de depuración estaría conformada entonces por un pretratamiento para retirar los materiales gruesos, un tratamiento primario formado por dos reactores de mezcla completa donde se realice la coagulación y la floculación y un tanque Imhoff que actúe como fosa séptica mejorada, la cual tendrá un compartimiento para decantación y otro para la zona de digestión de los fangos, y por último el tratamiento secundario formado por los humedales de flujo subsuperficial.

La calidad del agua afluente que llegará a los humedales ahora tendrá materia orgánica en estado disuelto, lo cual permitirá reducir el tiempo hidráulico y por ende el volumen de humedal necesario para la depuración.

Cabe destacar que la reducción del volumen de humedal equilibra los costos que se generan al implantar el sistema de coagulación- floculación.

## 5. CONCLUSIONES

Según el presente estudio se pueden realizar las siguientes conclusiones:

- En el humedal que trató la glucosa la eliminación de materia orgánica fue alta, logrando un rendimiento del 76%. La eliminación del amonio fue baja (27%), debido a la insuficiencia de oxígeno, ya que el contenido de oxígeno disuelto en el afluente se utilizó principalmente en oxidar la materia orgánica, limitando de esta forma la nitrificación.
- El humedal 2 que degradó el almidón obtuvo un rendimiento de eliminación de materia orgánica del 69%. La eliminación del contenido de amonio también tuvo un valor bajo (34%), debido a la insuficiencia de oxígeno, ya que el oxígeno disuelto disponible en el afluente se utilizó en la oxidación de la materia orgánica, limitando de esta forma la nitrificación.
- Según los rendimientos de eliminación de los contaminantes, se puede establecer que los humedales han tenido una buena degradación de la materia orgánica, y que la baja eliminación de amonio, indica que probablemente la vía de degradación predominante fue sulfatoreducción
- Al comparar los rendimientos de eliminación de contaminantes obtenidos en cada humedal, se obtiene que el humedal que degrada la glucosa tiene mejor eficiencia, principalmente en lo que se refiere a la materia orgánica. Tal diferencia se debe al estado físico de los compuestos (glucosa y almidón) que deben seguir diferentes procesos de degradación. En el humedal 2, primero se deben hidrolizar las partículas para descomponerlas tanto física como químicamente en unidades mas pequeñas, para de esta forma poder seguir los procesos biológicos comunes a la materia disuelta (glucosa).

Según lo anterior se establece que el estado físico de la materia orgánica condiciona los procesos de degradación a los que se verá sometida y por tanto la eficiencia de su eliminación. La materia orgánica disuelta es más fácil de degradar que la materia orgánica particulada.

- Un agua residual con materia orgánica particulada debe seguir mayores procesos de descomposición que un agua residual con materia orgánica disuelta, por lo tanto se estima que los tiempos de degradación serán mayores en la particulada, lo cual influencia a su vez el tiempo hidráulico de retención del agua residual si se quieren alcanzar rendimientos de eliminación iguales a los que se tendría con la materia orgánica disuelta.
- La eliminación de las partículas del afluente es un paso determinante de la eficiencia de los humedales, por lo tanto si se quiere aumentar los rendimientos se sugiere realizar un tratamiento previo al afluente antes de entrar al humedal como puede ser un sistema de coagulación-floculación.

## 6. RECOMENDACIONES

Los resultados obtenidos en el presente estudio permiten realizar las siguientes recomendaciones:

- Se recomienda analizar los primeros centímetros de los modelos de humedales, con el fin de corroborar la sedimentación del almidón, así como cuantificar que porcentaje se queda en esta parte del humedal.
- Se recomienda realizar otro estudio en el cual se utilice otra sustancia en lugar del almidón, con el fin de confirmar y generalizar el comportamiento de las partículas en los humedales.
- Se recomienda investigar sobre nuevos procesos o tecnologías de bajo coste que permitan separar las partículas antes de entrar al humedal, con el fin de optimizar su eficiencia.

## BIBLIOGRAFÍA

AGUIRRE, Paula. *Mecanismos de eliminación de la materia orgánica y de los nutrientes en humedales construidos de flujo subsuperficial*. Nuevos criterios para el diseño y operación de humedales construidos. DEHMA, Sección de Ingeniería Sanitaria, UPC. 2004.

ARIAS, Carlos. *Humedales construidos de flujo subsuperficial: Una alternativa para el tratamiento de aguas residuales en pequeños núcleos de población*. Tesina de especialidad ETSECCPB-UPC. 1998.

BIGAS I SERRALLONGA, Joan. *El sistema Batch o discontinuo de fangos activados para el tratamiento de aguas residuales*. Tesina de especialidad ETSECCPB-UPC. 1987.

CAMPOS, Virginia. *Distribución de tamaños de partículas en el agua contenida en humedales de flujo subsuperficial. Influencia sobre su eficiencia*. Tesina de especialidad ETSECCPB-UPC. 2004.

CANAVOS, George. *Probabilidad y estadística, aplicaciones y métodos*. Editorial McGraw Hill, México. 1988.

CHICO, Francisco. *Vías de degradación de la materia orgánica en humedales construidos de flujo subsuperficial*. Tesina de especialidad ETSECCPB-UPC. 2002

DEFRA. *Starch granule deconstructurisation and modification under homogeneous aqueous conditions*. University of Wales, Bio Composites Centre, Department for environment, food and rural affairs, Bangor. 2002

EASTMAN, John y FERGUSON, John *Solubilization of particulate organic carbon during the acid phase of anaerobic digestion*. Journal WPCF, Vol. 53, No. 3. 1981. 352-366 p.

HERNÁNDEZ MUÑOZ, Aurelio. *Depuración y desinfección de aguas residuales*. Colegio de Ingenieros de caminos, canales y puertos. España, 2001.

KADLEC, Robert y KNIGHT, Robert. *Treatment Wetlands*. Ed. CRC Press. Boca Ratón. 1996.

LARA, J. A. *Depuración de aguas residuales mediante humedales artificiales*. Master en ingeniería y contaminación ambiental UPC. 1999.

LEVINE, Audrey, TCHOBANOGLOUS, George. y ASANO, Takashi. *Size distributions of particulate contaminants in wastewater and their impact on treatability*. Wat. Res. Vol. 25, No. 8, 1991. 911-922 p.

PIRIZ Antonio Jesús. *Condiciones de óxido – reducción en humedales construidos de flujo subsuperficial*. Tesina de especialidad ETSECCPB-UPC. 2000.

REDDY, K. R. y D'ANGELO, E.M. *Biogeochemical indicators to evaluate pollutant removal efficiency in constructed wetlands*. Wat.Sci.Tech. Vol. 35, No.5, 1997.1-10 p.

SANDERS, W.T.M., et. al. *Anaerobic hydrolysis kinetics of particulate substrates*. Wat.Sci.Tech. Vol. 41 No.3, 2000. 17-24 p.

SMITH, Oliver y CRISTOL, Stanley. *Química Orgánica*. Editorial Reverté. Barcelona. 1972.

SPIEGEL, Murray. *Teoría y problemas de estadística*. Editorial McGraw Hill, México. 1970.

UBUKATA, Y. *Kinetics of polymeric substrate (dextrin or peptone) removal by activated sludge: hydrolysis of polymers to monomers is the rate-determining step*. Wat. Sci. Tech. Vol. 36 No. 12. 1997. 159-167 p.

## Anexo A. Datos de los Muestreos

Tabla 3. Datos del muestreo realizado al **afluente** del humedal 1 (**Glucosa**)

FECHA	TEMPERATURA °C	TURBIEDAD UNT	TRANSMITANCIA %	CONDUCTIVIDAD mS	AMONIO ppm	DQO mg O <sub>2</sub> /L
22/04/04	17,9	0,5	92,8	1296	10,8	159
23/04/04	17,9	0,4	98,2	1201	9,2	194
26/04/04	18,1	0,2	94,4	990	10	266
27/04/04	18,1	0,4	94,0	1280	5,8	175
28/04/04	18,4	0,2	94,8	1285	5,5	172
29/04/04	18,8	0,1	94,19	913	6,9	167
30/04/04	17,7	0,3	93,03		6,8	159
03/05/04	17,7	0,4	92,67	1104	11	150
04/05/04	17,6	0,2	93,72	743	16,6	168
05/05/04	18	0,5	95,03	1152	8,10	176
06/05/04	16,7	0,6	94,49	1022		188
07/05/04	17	0,2	90,95	1217	13,3	191
10/05/04	17,7	0,3	93,80	1174	13,4	175
11/05/04	18,1	0,3	91,21	92	12,7	168
12/05/04	18	0,5	93,24	1134	13,5	178
13/05/04	18,1	0,3	94,13	1180	13,8	187
14/05/04	18,5	0,6	92,64	1128	14,4	178
17/05/04	19,2	0,3	92,79	1269	15,4	172
18/05/04	20	0,3	93,89	1026	15,8	158
19/05/04	20,2	0,4	92,45	1207	14,9	158
20/05/04	20,5	0,2	94,01	1224	13,3	173
21/05/04	20,7	0,4	94,72	1264	14,3	188
24/05/04	20,4	0,7	94,11	1277	12,6	174
25/05/04	20,5	0,5	94,59	1130	12,4	165
26/05/04	20,7	0,7	93,60	1112	11	
27/05/04	20,6	0,5	93,60	1043	15,1	169
28/05/04	20,2	0,4	91,53	866	13	156
31/05/04	22,6	0,7	92,25	1310	12,5	171
01/06/04	22,4	0,5	93,30	1144	15,4	165
02/06/04	22,3	0,4	94,17	1507	12,2	185
03/06/04	22	0,6	92,5	1544	11	174
04/06/04	21,9	0,3	94,52	1385	12,4	165
07/06/04	24	0,9	90,65	1758	12,3	175
08/06/04	23,8	0,3	91,72	1619	4,59	171

Tabla 4. Datos del muestreo realizado al efluente del humedal1(**Glucosa**)

FECHA	TURBIEDAD UNT	TRANSMITANCIA %	CONDUCTIVIDAD mS	AMONIO ppm	DQO mg O <sub>2</sub> /L
22/04/04	1,2	16,21	1232	9,56	34
23/04/04	2,8	13,14	1316	8,8	43
26/04/04	41	46,25	1233	6,9	20
27/04/04	49	40,51	1251	5,7	29
28/04/04	20	30,72	1272	5,8	27
29/04/04	44	21,42	1367	5,1	29
30/04/04	0,1	20,10	1124	4,8	41
03/05/04	0,4	15,94	1038	7,1	37
04/05/04	0,3	18,29	1178	7,47	34
05/05/04	0,3	19,90	983	8,7	38
06/05/04	0,5	25,65	1143	8,21	42
07/05/04	0,6	17,41	1108	8,48	53
10/05/04	0,3	18,48	1093	7,73	53
11/05/04	0,5	16,82	1103	8,77	51
12/05/04	0,8	17,58	1060	9,51	52
13/05/04	0,3	19,74	1108	8,66	43
14/05/04	1,1	17,46	1103	9,31	39
17/05/04	3,0	19,56	1143	10,6	40
18/05/04	1,6	14,97	1136	10,5	47
19/05/04	0,9	15,08	1082	10,4	37
20/05/04	0,5	16,23	1129	9,63	34
21/05/04	0,8	17,08	1240	10	37
24/05/04	0,8	16,22	1205	9,35	63
25/05/04	0,6	17,38	1369	9,56	54
26/05/04	1,4	18,90	1306	9,41	
27/05/04	0,8	25,14	1163	10,4	31
28/05/04	0,8	23,23	1177	8,88	29
31/05/04	0,8	18,5	1178	8,71	22
01/06/04	0,3	16,02	1187	10,1	64
02/06/04	0,9	15,21	1228	8,40	52
03/06/04	1,4	17,44	1177	7,74	41
04/06/04	1,9	18,72	1426	8,53	32
07/06/04	1,7	17,8	1494	9,84	47
08/06/04	0,8	16,9		6,83	58

Tabla 5. Datos del muestreo realizado al afluente del humedal 2 (**Almidón**)

FECHA	TEMPERATURA °C	TURBIEDAD UNT	TRANSMITANCIA %	CONDUCTIVIDAD mS	AMONIO ppm	DQO mg O <sub>2</sub> /L
22/04/04	18,1	13,7	92,19	1284	10,8	91
23/04/04	18,1	8,1	93,04	2732	11	127
26/04/04	18,7	14,4	92,09	1104	10	183
27/04/04	18,6	12,8	91,80	1156	8,1	141
28/04/04	19	12,1	90,18	1006	8,7	140
29/04/04	19,4	12,3	91,13	1057	9,7	141
30/04/04	18,2	11,9	90,01		11	159
03/05/04	17,9	11,7	89,25	839	9,1	117
04/05/04	17,9	12,3	91,45	762	16,4	158
05/05/04	18,2	11,6	92,12	1174	13,8	141
06/05/04	17,2	11,8	90,71	999		158
07/05/04	17,3	11,6	87,7	1208	14	146
10/05/04	17,8	13,1	91,6	1142	13,8	155
11/05/04	18,2	14,1	89,67	995	12,7	140
12/05/04	18,1	13,3	90,71	1030	14	158
13/05/04	18,3	13,2	91,14	1220	13,7	153
14/05/04	18,6	11,7	89,82	1105	14,7	149
17/05/04	19,4	13,4	89,04	1237	15,6	128
18/05/04	20	11,5	89,54	1014	13,6	137
19/05/04	20,8	12	90,10	1228	14	117
20/05/04	20,5	11,9	91,20	1055	13,5	140
21/05/04	20,6	13,1	91,64	1172	13,7	158
24/05/04	20,4	12	91,53	1222	11,6	167
25/05/04	20,4	12,1	93,23	1067	15,2	138
26/05/04	20,6	11,3	90,87	1210	13,8	
27/05/04	20,6	12,9	92,50	1205	12,9	140
28/05/04	20,2	12	89,02	1036	15	156
31/05/04	22,4	12	91,33	1110	12,3	103
01/06/04	22,2	13,3	91,43	1278	11,9	166
02/06/04	22,6	11,5	91,51	1496	12	175
03/06/04	21,5	14	90,25	1521	12,9	192
04/06/04	21,6	11	91,74	1348	8,37	139
07/06/04	23,7	13,3	88,67	1501	7,89	139
08/06/04	23,6	12,2	90,33	1608	7,37	148

Tabla 6. Datos del muestreo realizado al **efluente** del humedal 2(**Almidón**)

FECHA	TURBIEDAD UNT	TRANSMITANCIA %	CONDUCTIVIDAD mS	AMONIO ppm	DQO mg O <sub>2</sub> /L
22/04/04	99	45,10	1199	9,47	18
23/04/04	25	62,95	1346	10,5	22
26/04/04	4,2	79,30	1053	5,2	16
27/04/04	19	72,02	1066	5,0	11
28/04/04	39	37,2	1159	4,4	32
29/04/04	1,2	39,3	1237	7,2	44
30/04/04	1,0	39,4		6,7	35
03/05/04	1,3	35,45	1179	6,0	25
04/05/04	1,6	32,74	1116	8,50	35
05/05/04	1,1	39,48	1232	5,25	27
06/05/04	1,1	41,30		8,0	58
07/05/04	1,3	28,78	1186	5,47	93
10/05/04	0,9	21,69	1179	6,90	78
11/05/04	0,7	27,71	1140	6,16	50
12/05/04	0,9	26,22	1145	7,35	46
13/05/04	0,9	40,82	1183	6,53	34
14/05/04	1,0	30,30	1153	7,60	63
17/05/04	0,9	23,47	1179	8,45	49
18/05/04	0,8	22,88	1205	9,35	41
19/05/04	1,2	29,30	1172	9,40	31
20/05/04	0,8	25,12	1124	8,30	36
21/05/04	0,7	23,24	1185	7,77	65
24/05/04	0,7	22,22	1216		64
25/05/04	0,8	23,53	1242	8,65	49
26/05/04	0,8	24,78	1377	7,68	29
27/05/04	0,6	24,01	1321	10,3	54
28/05/04	0,7	25,55	1246	9,42	31
31/05/04	0,4	24,20	1323	9,93	47
01/06/04	0,8	20,67	1322	10,7	51
02/06/04	0,9	21,86	1337	9,18	48
03/06/04	1,2	21,82	1347	8,68	47
04/06/04	1,0	18,23	1128	9,21	54
07/06/04	0,5	13,70	1487	10,2	61
08/06/04	0,7	12,7	1519	6,09	61

Tabla 7. Valores Medios y Desviación Típica en cada humedal para Afluente y Efluente.

		GLUCOSA		ALMIDON	
		Afluente	Efluente	Afluente	Efluente
Temperatura °c	Media	19,6		19,7	
	Desv. Típica	2,022		1,832	
Turbiedad UNT	Media	0,4	0,8	12,36	0,9
	Desv. Típica	0,2	0,6	0,8	0,3
Transmitancia %	Media	93	18	91	27
	Desv. Típica	1,2	2,8	1,3	7,8
Conductividad µs	Media	1189	1193	1210	1214
	Desv. Típica	204	116	335	95
Amonio mg/L	Media	11,8	8,4	12,2	7,9
	Desv. Típica	3,3	1,6	2,5	1,8
DQO mg O2/L	Media	175	41	147	45
	Desv. Típica	19	11	22	18

Tabla 8. Rendimientos de eliminación de amonio %

Fecha	% Eliminación Glucosa	% Eliminación Almidón
22-04-04	11	12
23-04-04	4	5
26-04-04	31	48
27-04-04	2	38
28-04-04	-5	49
29-04-04	26	26
30-04-04	29	39
03-05-04	35	34
04-05-04	55	48
05-05-04	-7	62
06-05-04	36	61
07-05-04	42	50
10-05-04	31	51
11-05-04	30	48
12-05-04	37	52
13-05-04	35	48
14-05-04	31	46
17-05-04	34	31
18-05-04	30	33
19-05-04	28	39
20-05-04	30	43
21-05-04	23	43
24-05-04	31	20
25-05-04	32	37
27-05-04	30	19
28-05-04	34	10
31-05-04	31	24
01-06-04	30	33
02-06-04	31	-10
03-06-04	20	-29
04-06-04	11	12
07-06-04	4	5
<b>Promedio</b>	<b>27</b>	<b>34</b>

Tabla 9. Rendimientos de eliminación de materia orgánica en %

Fecha	% Eliminación Glucosa	% Eliminación Almidón
22-04-04	79	80
23-04-04	78	83
26-04-04	92	91
27-04-04	83	92
28-04-04	84	77
29-04-04	83	69
30-04-04	74	78
03-05-04	75	79
04-05-04	80	78
05-05-04	78	81
06-05-04	78	63
07-05-04	72	36
10-05-04	70	50
11-05-04	70	64
12-05-04	71	71
13-05-04	77	78
14-05-04	78	58
17-05-04	77	62
18-05-04	70	70
19-05-04	77	74
20-05-04	80	74
21-05-04	80	59
24-05-04	64	62
25-05-04	67	64
27-05-04	82	72
28-05-04	81	80
31-05-04	87	54
01-06-04	61	69
02-06-04	72	73
03-06-04	76	76
04-06-04	81	61
07-06-04	73	56
<b>Promedio</b>	<b>76</b>	<b>69</b>

Tabla 10. Rendimientos de eliminación de materia orgánica en mg O<sub>2</sub>/l

Fecha	Eliminación Glucosa	Eliminación Almidón
22-04-04	125	73
23-04-04	151	105
26-04-04	246	167
27-04-04	146	130
28-04-04	145	108
29-04-04	138	97
30-04-04	118	124
03-05-04	113	92
04-05-04	134	123
05-05-04	138	114
06-05-04	146	100
07-05-04	138	53
10-05-04	122	77
11-05-04	117	90
12-05-04	126	112
13-05-04	144	119
14-05-04	139	86
17-05-04	132	79
18-05-04	111	96
19-05-04	121	86
20-05-04	139	104
21-05-04	151	93
24-05-04	111	103
25-05-04	111	89
27-05-04	138	140
28-05-04	127	125
31-05-04	149	56
01-06-04	101	115
02-06-04	133	127
03-06-04	133	145
04-06-04	133	85
07-06-04	128	78
<b>Promedio</b>	<b>134</b>	<b>102</b>

## Anexo B. Análisis estadístico de datos

Tabla 11. Análisis Estadístico de la Eliminación de Amonio en los Humedales 1 y 2

	Glucosa	Almidón
N de la muestra	31	31
Mínimo	-2.2	-2.31
Máximo	9.1	8.55
Media	3.4	4.3
Desviación Standard	2.25	2.758

Ahora Análisis de las dos medias y las respectivas desviaciones típicas al nivel de significancia del 0,05 y 0,01 con la t de student.

Ho :  $\mu_1 = \mu_2$  y no hay diferencia esencial entre los dos grupos

H1:  $\mu_1 \neq \mu_2$  y hay diferencia esencial entre los dos grupos

Bajo la hipótesis Ho,

$$t = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{s \sqrt{1/N_1 + 1/N_2}} \quad s = \sqrt{\frac{N_1 s_1^2 + N_2 s_2^2}{N_1 + N_2 - 2}}$$

Entonces

$$t = \frac{3.352 - 4.326}{2.56 \sqrt{1/31 + 1/31}} = -1.5 \quad s = \sqrt{\frac{31(2.25)^2 + 31(2.758)^2}{31 + 31 - 2}} = 2.56$$

Para un ensayo bilateral al nivel de significación del 0,01, se rechazará la hipótesis Ho si t se encuentra fuera del rango  $-t_{0,995}$  a  $t_{0,995}$  que para  $(N_1 + N_2 - 2) = (31 + 31 - 2) = 60$  grados de libertad es el rango -2.66 a 2.66.

Ya que  $t = -1.5$  y se encuentra en el rango, se deduce que no hay diferencia esencial entre los dos grupos para el nivel de significación del 0,01

Para un ensayo bilateral al nivel de significación del 0,05, se rechazará la hipótesis Ho si t se encuentra fuera del rango  $-t_{0,975}$  a  $t_{0,975}$  que para  $(N_1 + N_2 - 2) = (31 + 31 - 2) = 60$  grados de libertad es el rango -2.0 a 2.0

Ya que  $t = -1.5$  y se encuentra en el rango, se deduce que no hay diferencia esencial entre los dos grupos para el nivel de significación del 0,05

Tabla 12. Análisis Estadístico de la Eliminación de Materia Orgánica en los Humedales

	Glucosa	Almidón
N de la muestra	33	33
Mínimo	101	53
Máximo	151	167
Media	130	102
Desviación Standard	13.42	24.49

1. Ajuste de los datos a una distribución normal

Humedal 1 (Glucosa)

Rendimiento de Eliminación	Frecuencia datos	Límite Real de clase	z Para los límites reales de clase	Área bajo la curva normal de 0 a z	Área para cada clase
		99.5	-2.27	0.4884	
100-110	1	110.5	-1.45	0.4265	0.0619
111-120	8	120.5	-0.71	0.2612	0.1653
121-130	6	130.5	0.04	0.016	0.2772
131-140	11	140.5	0.78	0.2823	0.2663
141-150	5	150.5	1.53	0.437	0.1547
151-160	2	160.5	2.27	0.4884	0.0514

Rendimiento de Eliminación	Frecuencia Esperada	Frecuencia Observada	Diferencia de Frecuencias	Diferencia al cuadrado
100-110	2	1	-1	1.1
111-120	5	8	3	6.5
121-130	9	6	-3	9.9
131-140	9	11	2	4.9
141-150	5	5	0	0.0
151-160	2	2	0	0.1
Total	32	33	1	22.5

Valor de chi- cuadrado según las frecuencias esperadas y observadas: 0.68

Número de parámetros utilizados en la prueba: 2

Grado de libertad v:3

Prueba de Ajuste:

Chi 0,95= 7.81 El ajuste de los datos es bueno

Chi 0,05= 0.352 Si 0.68 es mayor que 0.352 el ajuste no es demasiado bueno

### Humedal 2 (Almidón)

Rendimiento de Eliminación	Frecuencia datos	Límite Real de clase	z Para los límites reales de clase	Área bajo la curva normal de 0 a z	Área para cada clase
		49.5	-2.14	0.4838	
50-70	2	70.5	-1.29	0.4015	0.0823
71-90	10	90.5	-0.47	0.1808	0.2207
91-110	9	110.5	0.35	0.1368	0.3176
111-130	9	130.5	1.16	0.377	0.2402
131-150	2	150.5	1.98	0.4761	0.0991
151-170	1	170.5	2.80	0.4974	0.0213

Rendimiento de Eliminación	Frecuencia Esperada	Frecuencia Observada	Diferencia de Frecuencias	Diferencia al cuadrado
50-70	3	2	-1	3
71-90	7	10	3	7
91-110	10	9	-1	10
111-130	8	9	1	8
131-150	3	2	-1	3
151-170	1	1	0	1
Total	32	33	1	32

Valor de chi- cuadrado calculado según las frecuencias esperadas y observadas: 0.39

Número de parámetros utilizados en la prueba M: 2

Grado de libertad v:3

Prueba de Ajuste:

Chi 0,95: 7.81 El Ajuste de los datos es bueno

Chi 0,05: 0.352 Si 0.39 es mayor que 0.352 el ajuste no es demasiado bueno

2. Comparación Estadística de la Eliminación de Materia Orgánica en los dos Humedales.

Análisis de las dos medias y las respectivas desviaciones típicas al nivel de significancia del 0,05 y 0,01 con la t de student.

Ho:  $\mu_1 = \mu_2$  y no hay diferencia esencial entre los dos grupos

H1:  $\mu_1 \neq \mu_2$  y hay diferencia esencial entre los dos grupos

Bajo la hipótesis Ho,

$$t = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{s \sqrt{1/N_1 + 1/N_2}} \quad s = \sqrt{\frac{N_1 s_1^2 + N_2 s_2^2}{N_1 + N_2 - 2}}$$

Entonces

$$t = \frac{134 - 102}{20.05 \sqrt{1/33 + 1/33}} = 6.48 \quad s = \sqrt{\frac{33(13.42)^2 + 33(24.49)^2}{33 + 33 - 2}} = 20.05$$

Para un ensayo bilateral al nivel de significación del 0,01, se rechazará la hipótesis Ho si t se encuentra fuera del rango  $-t_{0,995}$  a  $t_{0,995}$  que para  $(N_1 + N_2 - 2) = (33 + 33 - 2) = 64$  grados de libertad es el rango -2.66 a 2.66.

Ya que  $t = 6.48$  y se encuentra fuera del rango, se deduce que hay diferencia esencial entre los dos grupos para el nivel de significación del 0,01

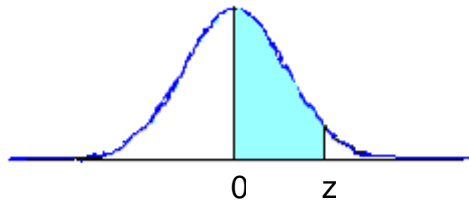
Para un ensayo bilateral al nivel de significación del 0,05, se rechazará la hipótesis Ho si t se encuentra fuera del rango  $-t_{0,975}$  a  $t_{0,975}$  que para  $(N_1 + N_2 - 2) = (33 + 33 - 2) = 64$  grados de libertad es el rango -2.0 a 2.0

Ya que  $t = 6.48$  y se encuentra fuera del rango, se deduce que hay diferencia esencial entre los dos grupos para el nivel de significación del 0,05

## Anexo C. Tablas de las Distribuciones Estadísticas

### Áreas bajo la curva normal estándar de 0 a z.

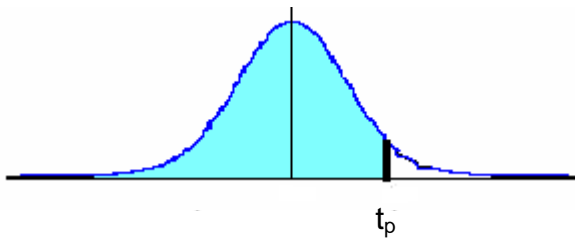
Los valores de la tabla que no se muestran en negrita representan la probabilidad de observar un valor menor o igual a z. La cifra entera y el primer decimal de z se buscan en la primera columna, y el segundo decimal en la cabecera de la tabla.



Segunda cifra decimal del valor de z										
z	0.00	.01	.02	.03	.04	.05	.06	.07	.08	.09
0.0	.0000	.0040	.0080	.0120	.0160	.0199	.0239	.0279	.0319	.0359
0.1	.0398	.0438	.0478	.0517	.0557	.0596	.0636	.0675	.0714	.0753
0.2	.0793	.0832	.0871	.0910	.0948	.0987	.1026	.1064	.1103	.1141
0.3	.1179	.1217	.1255	.1293	.1331	.1368	.1406	.1443	.1480	.1517
0.4	.1554	.1591	.1628	.1664	.1700	.1736	.1772	.1808	.1844	.1879
0.5	.1915	.1950	.1985	.2019	.2054	.2088	.2123	.2157	.2190	.2224
0.6	.2257	.2291	.2324	.2357	.2389	.2422	.2454	.2486	.2517	.2549
0.7	.2580	.2611	.2642	.2673	.2704	.2734	.2764	.2794	.2823	.2852
0.8	.2881	.2910	.2939	.2967	.2995	.3023	.3051	.3078	.3106	.3133
0.9	.3159	.3186	.3212	.3238	.3264	.3289	.3315	.3340	.3365	.3389
1.0	.3413	.3438	.3461	.3485	.3508	.3531	.3554	.3577	.3599	.3621
1.1	.3643	.3665	.3686	.3708	.3729	.3749	.3770	.3790	.3810	.3830
1.2	.3849	.3869	.3888	.3907	.3925	.3944	.3962	.3980	.3997	.4015
1.3	.4032	.4049	.4066	.4082	.4099	.4115	.4131	.4147	.4162	.4177
1.4	.4192	.4207	.4222	.4236	.4251	.4265	.4279	.4292	.4306	.4319

1.5	.4332	.4345	.4357	.4370	.4382	.4394	.4406	.4418	.4429	.4441
1.6	.4452	.4463	.4474	.4484	.4495	.4505	.4515	.4525	.4535	.4545
1.7	.4554	.4564	.4573	.4582	.4591	.4599	.4608	.4616	.4625	.4633
1.8	.4641	.4649	.4656	.4664	.4671	.4678	.4686	.4693	.4699	.4706
1.9	.4713	.4719	.4726	.4732	.4738	.4744	.4750	.4756	.4761	.4767
2.0	.4772	.4778	.4783	.4788	.4793	.4798	.4803	.4808	.4812	.4817
2.1	.4821	.4826	.4830	.4834	.4838	.4842	.4846	.4850	.4854	.4857
2.2	.4861	.4864	.4868	.4871	.4875	.4878	.4881	.4884	.4887	.4890
2.3	.4893	.4896	.4898	.4901	.4904	.4906	.4909	.4911	.4913	.4916
2.4	.4918	.4920	.4922	.4925	.4927	.4929	.4931	.4932	.4934	.4936
2.5	.4938	.4940	.4941	.4943	.4945	.4946	.4948	.4949	.4951	.4952
2.6	.4953	.4955	.4956	.4957	.4959	.4960	.4961	.4962	.4963	.4964
2.7	.4965	.4966	.4967	.4968	.4969	.4970	.4971	.4972	.4973	.4974
2.8	.4974	.4975	.4976	.4977	.4977	.4978	.4979	.4979	.4980	.4981
2.9	.4981	.4982	.4982	.4983	.4984	.4984	.4985	.4985	.4986	.4986
3.0	.4987	.4987	.4987	.4988	.4988	.4989	.4989	.4989	.4990	.4990
3.1	.4990	.4991	.4991	.4991	.4992	.4992	.4992	.4992	.4993	.4993
3.2	.4993	.4993	.4994	.4994	.4994	.4994	.4994	.4995	.4995	.4995
3.3	.4995	.4995	.4995	.4996	.4996	.4996	.4996	.4996	.4996	.4997
3.4	.4997	.4997	.4997	.4997	.4997	.4997	.4997	.4997	.4997	.4998

**Percentiles ( $t_p$ ) de la Distribución  $t$  de Student con  $v$  grados de libertad.**  
 (Area sombreada =  $p$ )



$v$	0,6	0,75	0,9	0,95	0,975	0,99	0,995	0,9975	0,999	0,9995
1	0,325	1,000	3,078	6,314	12,706	31,821	63,656	127,321	318,289	636,578
2	0,289	0,816	1,886	2,920	4,303	6,965	9,925	14,089	22,328	31,600
3	0,277	0,765	1,638	2,353	3,182	4,541	5,841	7,453	10,214	12,924
4	0,271	0,741	1,533	2,132	2,776	3,747	4,604	5,598	7,173	8,610
5	0,267	0,727	1,476	2,015	2,571	3,365	4,032	4,773	5,894	6,869
6	0,265	0,718	1,440	1,943	2,447	3,143	3,707	4,317	5,208	5,959
7	0,263	0,711	1,415	1,895	2,365	2,998	3,499	4,029	4,785	5,408
8	0,262	0,706	1,397	1,860	2,306	2,896	3,355	3,833	4,501	5,041
9	0,261	0,703	1,383	1,833	2,262	2,821	3,250	3,690	4,297	4,781
10	0,260	0,700	1,372	1,812	2,228	2,764	3,169	3,581	4,144	4,587
11	0,260	0,697	1,363	1,796	2,201	2,718	3,106	3,497	4,025	4,437
12	0,259	0,695	1,356	1,782	2,179	2,681	3,055	3,428	3,930	4,318
13	0,259	0,694	1,350	1,771	2,160	2,650	3,012	3,372	3,852	4,221
14	0,258	0,692	1,345	1,761	2,145	2,624	2,977	3,326	3,787	4,140
15	0,258	0,691	1,341	1,753	2,131	2,602	2,947	3,286	3,733	4,073
16	0,258	0,690	1,337	1,746	2,120	2,583	2,921	3,252	3,686	4,015
17	0,257	0,689	1,333	1,740	2,110	2,567	2,898	3,222	3,646	3,965
18	0,257	0,688	1,330	1,734	2,101	2,552	2,878	3,197	3,610	3,922
19	0,257	0,688	1,328	1,729	2,093	2,539	2,861	3,174	3,579	3,883
20	0,257	0,687	1,325	1,725	2,086	2,528	2,845	3,153	3,552	3,850
21	0,257	0,686	1,323	1,721	2,080	2,518	2,831	3,135	3,527	3,819
22	0,256	0,686	1,321	1,717	2,074	2,508	2,819	3,119	3,505	3,792
23	0,256	0,685	1,319	1,714	2,069	2,500	2,807	3,104	3,485	3,768
24	0,256	0,685	1,318	1,711	2,064	2,492	2,797	3,091	3,467	3,745
25	0,256	0,684	1,316	1,708	2,060	2,485	2,787	3,078	3,450	3,725
26	0,256	0,684	1,315	1,706	2,056	2,479	2,779	3,067	3,435	3,707
27	0,256	0,684	1,314	1,703	2,052	2,473	2,771	3,057	3,421	3,689
28	0,256	0,683	1,313	1,701	2,048	2,467	2,763	3,047	3,408	3,674
29	0,256	0,683	1,311	1,699	2,045	2,462	2,756	3,038	3,396	3,660
30	0,256	0,683	1,310	1,697	2,042	2,457	2,750	3,030	3,385	3,646
40	0,255	0,681	1,303	1,684	2,021	2,423	2,704	2,971	3,307	3,551
60	0,254	0,679	1,296	1,671	2,000	2,390	2,660	2,915	3,232	3,460
120	0,254	0,677	1,289	1,658	1,980	2,358	2,617	2,860	3,160	3,373
$\infty$	0,253	0,674	1,282	1,645	1,960	2,326	2,576	2,807	3,090	3,290

### Distribución Chi-cuadrado de Pearson

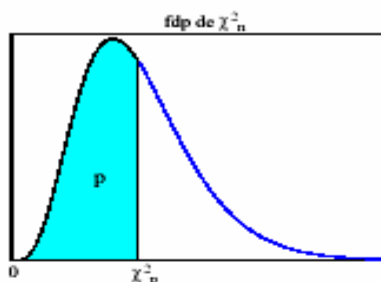
Tabla de la función de distribución:

$$P(\chi^2_n \leq \chi^2_p) = p$$

$\chi^2_p$ : valor tabulado

p: probabilidad acumulada

n: grados de libertad



n/p	0.005	0.01	0.025	0.05	0.1	0.50	0.90	0.95	0.975	0.99	0.995
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.45	2.71	3.84	5.02	6.63	7.88
2	0.01	0.02	0.05	0.10	0.21	1.39	4.61	5.99	7.38	9.21	10.60
3	0.07	0.11	0.22	0.35	0.58	2.37	6.25	7.81	9.35	11.34	12.84
4	0.21	0.30	0.48	0.71	1.06	3.36	7.78	9.49	11.14	13.28	14.86
5	0.41	0.55	0.83	1.15	1.61	4.35	9.24	11.07	12.83	15.09	16.75
6	0.68	0.87	1.24	1.64	2.20	5.35	10.64	12.59	14.45	16.81	18.55
7	0.99	1.24	1.69	2.17	2.83	6.35	12.02	14.07	16.01	18.48	20.28
8	1.34	1.65	2.18	2.73	3.49	7.34	13.36	15.51	17.53	20.09	21.95
9	1.73	2.09	2.70	3.33	4.17	8.34	14.68	16.92	19.02	21.67	23.59
10	2.16	2.56	3.25	3.94	4.87	9.34	15.99	18.31	20.48	23.21	25.19
11	2.60	3.05	3.82	4.57	5.58	10.34	17.28	19.68	21.92	24.72	26.76
12	3.07	3.57	4.40	5.23	6.30	11.34	18.55	21.03	23.34	26.22	28.30
13	3.57	4.11	5.01	5.89	7.04	12.34	19.81	22.36	24.74	27.69	29.82
14	4.07	4.66	5.63	6.57	7.79	13.34	21.06	23.68	26.12	29.14	31.32
15	4.60	5.23	6.26	7.26	8.55	14.34	22.31	25.00	27.49	30.58	32.80
16	5.14	5.81	6.91	7.96	9.31	15.34	23.54	26.30	28.85	32.00	34.27
17	5.70	6.41	7.56	8.67	10.09	16.34	24.77	27.59	30.19	33.41	35.72
18	6.26	7.01	8.23	9.39	10.86	17.34	25.99	28.87	31.53	34.81	37.16
19	6.84	7.63	8.91	10.12	11.65	18.34	27.20	30.14	32.85	36.19	38.58
20	7.43	8.26	9.59	10.85	12.44	19.34	28.41	31.41	34.17	37.57	40.00
21	8.03	8.90	10.28	11.59	13.24	20.34	29.62	32.67	35.48	38.93	41.40
22	8.64	9.54	10.98	12.34	14.04	21.34	30.81	33.92	36.78	40.29	42.80
23	9.26	10.20	11.69	13.09	14.85	22.34	32.01	35.17	38.08	41.64	44.18
24	9.89	10.86	12.40	13.85	15.66	23.34	33.20	36.42	39.36	42.98	45.56
25	10.52	11.52	13.12	14.61	16.47	24.34	34.38	37.65	40.65	44.31	46.93
26	11.16	12.20	13.84	15.38	17.29	25.34	35.56	38.89	41.92	45.64	48.29
27	11.81	12.88	14.57	16.15	18.11	26.34	36.74	40.11	43.19	46.96	49.64
28	12.46	13.56	15.31	16.93	18.94	27.34	37.92	41.34	44.46	48.28	50.99
29	13.12	14.26	16.05	17.71	19.77	28.34	39.09	42.56	45.72	49.59	52.34
30	13.79	14.95	16.79	18.49	20.60	29.34	40.26	43.77	46.98	50.89	53.67
40	20.71	22.16	24.43	26.51	29.05	39.34	51.81	55.76	59.34	63.69	66.77
60	35.53	37.48	40.48	43.19	46.46	59.33	74.40	79.08	83.30	88.38	91.95
120	83.85	86.92	91.57	95.70	100.6	119.33	140.2	146.5	152.2	158.9	163.6