

VALIDACIÓN DE MODELOS COMPUTACIONALES DE FLUJO DINÁMICO CON PRUEBA DE TRAZADORES EN LAGUNAS DE GRAN ESCALA

RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se realizó la validación de un modelo computacional tridimensional de flujo dinámico (CFD) mediante pruebas de trazadores en las 2 lagunas Facultativas de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Ucubamba, Cuenca, Ecuador. En las pruebas experimentales se utilizó el trazador fluorescente Rodamina WT, muestreadores automáticos y un fluorómetro. El proceso de modelación inició con la construcción geométrica de las lagunas y su posterior discretización en el software GAMBIT. La geometría se basó en un levantamiento topográfico y se simplificó para obtener un modelo manejable y representativo. Para la discretización se dividió a las lagunas en elementos tridimensionales finitos agrupados en volúmenes de acuerdo a las características hidráulicas de las zonas. El modelo fue simulado en el paquete de software FLUENT. Adicionalmente se comparó 2 condiciones de frontera para la superficie libre de las lagunas para un análisis de comparativo en base de las pruebas experimentales. Finalmente se realizó un análisis de la confiabilidad de la grilla aumentando número de elementos en que se discretizó la laguna desde 100000 hasta 200000 y 400000 elementos.

Los resultados más destacados son la construcción metodológica del proceso de implementación de un modelo CFD en base de la geometría real y validación mediante pruebas experimentales. Los modelos predicen en forma aceptable las pruebas de trazadores y son una herramienta muy poderosa para una descripción detallada de la hidráulica de las lagunas, pudiendo en un futuro incorporar condiciones externas como el viento y la temperatura para optimizar los resultados.

PALABRAS CLAVES: CFD, trazadores, laguna de estabilización, facultativa, discretización, modelamiento, Hidráulica, Ucubamba.

ÍNDICE

1 INTRODUCCIÓN	18
2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS	22
3 MATERIALES Y METODOLOGÍA	79
4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	105
5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	139
Bibliografía	142
Anexos	146



UNIVERSIDAD DE CUENCA
Fundada en 1867

Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

VALIDACIÓN DE MODELOS COMPUTACIONALES DE FLUJO DINÁMICO CON PRUEBA DE TRAZADORES EN LAGUNAS DE GRAN ESCALA

Director:
Ing. Andrés Alvarado M.

Proyecto de graduación previo
a la obtención del grado de
Ingeniero Civil

Autores:
Juan Sebastián Cedillo Galarza
María Magdalena Matailo Quituisaca

Cuenca - Ecuador
Septiembre 2011

Dedicatoria

Dedico esta tesis a mis padres Lautaro y Patricia por todo su paciencia, apoyo y guía durante estos años de carrera universitaria A mi hermano Adrian por su apoyo incondicional en todo momento.

Sebastián

A mis padres Gerardo y María por su amor, confianza y apoyo durante esta etapa de formación profesional. De igual manera a mis hermanas, hermanos y sobrinos que con su presencia supieron brindarme estima y seguridad en mi misma durante estos años.

A mis amigos que de distinta forma supieron estar presentes y son partícipes de la alegría por los logros conseguidos.

Magdalena

Agradecimiento

Agradecemos en primera instancia a Dios por concedernos la vida, salud y familia para habernos mantenido perseverantes en esta etapa universitaria.

Expresamos nuestros agradecimientos al PROMAS y a la Cooperación Interuniversitaria Flamenca (Bélgica) VLIR-IUC, y de manera especial agradecemos a nuestro Director de Tesis, Ing. Andrés Alvarado M. por su guía, dedicación y paciencia en la dirección de la tesis.

A todo el personal de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Ucubamba ETAPA, especialmente al Ing. Galo Durazno y al Sr Ricardo Guerky.

De igual manera, a los profesores y personal de la Facultad de Ingeniería por impartirnos las enseñanzas durante esta etapa.

Resumen

En el presente trabajo de investigación se realizó la validación de un modelo computacional tridimensional de flujo dinámico (CFD) mediante pruebas de trazadores en las 2 lagunas Facultativas de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Ucubamba, Cuenca, Ecuador. En las pruebas experimentales se utilizó el trazador fluorescente Rodamina WT, muestreadores automáticos y un fluorómetro. El proceso de modelación inició con la construcción geométrica de las lagunas y su posterior discretización en el software GAMBIT. La geometría se basó en un levantamiento topográfico y se simplificó para obtener un modelo manejable y representativo. Para la discretización se dividió a las lagunas en elementos tridimensionales finitos agrupados en volúmenes de acuerdo a las características hidráulicas de las zonas. El modelo fue simulado en el paquete de software FLUENT. Adicionalmente se comparó 2 condiciones de frontera para la superficie libre de las lagunas para un análisis de comparativo en base de las pruebas experimentales. Finalmente se realizó un análisis de la confiabilidad de la grilla aumentando número de elementos en que se discretizó la laguna desde 100000 hasta 200000 y 400000 elementos.

Los resultados más destacados son la construcción metodológica del proceso de implementación de un modelo CFD en base de la geometría real y validación mediante pruebas experimentales. Los modelos predicen en forma aceptable las pruebas de trazadores y son una herramienta muy poderosa para una descripción detallada de la hidráulica de las lagunas, pudiendo en un futuro incorporar condiciones externas como el viento y la temperatura para optimizar los resultados.

Abstract

The present document includes the process for the validation of a 3D computational fluid dynamic model (CFD) against experimental data obtained from tracer tests executed in 2 full scale facultative ponds from the waste stabilization pond system Ucubamba, Cuenca, Ecuador. The tracer experiments were conducted with the fluorescent dye Rhodamine WT, using automatic samplers and a portable fluorometer for the measuring campaign. The modelling process started with the geometric representation of the system based on the surveys executed in which some simplifications were made in order to have a suitable representation of the system yet simple model. A 3D grid was built in the package GAMBIT which allowed to increase the number of elements in certain zones of the pond where turbulence is present such as inlet and outlet surroundings. The model was simulated in the software package FLUENT 6.3. Two boundary conditions were tested in the free surface of the ponds in order to compare the model outputs of these conditions against experimental data. Finally, a grid dependency check was performed varying the number of elements from the original 100 000 until 200 000 and 400 000 elements.

Residence Time Distribution curves (RTD) were obtained both from the tracer test and CFD modelling. From these curves, the average residence time, dispersion number and effective volume were calculated and analyzed. Besides, the analysis of CFD results allowed the identification of dead zones, vortex and zones of preferential flow direction. The highlighted results are the methodological process for CFD model implementation and further validation against tracer experimental results in full-scale ponds. The CFD models satisfactorily predicted the experimental results, demonstrating their powerfulness for describing the pond hydrodynamics. A further incorporation of meteorological conditions could improve the results showed in the present research.

LISTA DE SÍMBOLOS

La siguiente lista da una visión general de los símbolos usados a través del texto. A continuación se presentan los símbolos generales y las siglas.

Símbolos Generales

A_i	Area de cada forma geométrica [m^2]
B	Ancho de la laguna [m]
C	Concentración del trazador en la salida a lo largo del tiempo [ppb]
C_{min}	Nivel mínimo de detección del trazador [ppb]
C_o	Concentración idealizada de Rodamina [ppb]
c_u	Constante empirica (~ 0.9) $[-]$
D	Coeficiente de dispersión longitudinal [$m^2 h^{-1}$]
$D_{i,m}$	Coeficiente de difusión para la especie i en la mezcla
d	Factor o número de dispersión $[-]$
E	Energía interna
e	Relación de volumen efectivo $[-]$
F	Fuerza
$\frac{F}{M}$	Relación $\frac{Comida}{Microorganismos}$ [$kg DBO kg^{-1} MLVSS^{-1} d^{-1}$]
H	Profundidad de la laguna [m]
h	Paso [m]
I	Intensidad de turbulencia [%]
J_i	Difusión de la masa
k	Energía cinética turbulenta [$m^2 s^{-2}$]
Kr	Relación $\frac{C_o}{C_{min}} = 8$ para Rodamina WT en lagunas $[-]$
L	Longitud de la laguna [m]
M_s	Mass fraction [$g g^{-1}$]
n	Número de valores comparados $[-]$
O_i	Valor observado $[-]$
$\bar{O}$	Promedio de los valores observados $[-]$
P	Porcentaje de Rodamina en la solución líquida, fracción decimal (usualmente 0.2) $[-]$
p	Presión
Pe	Número de Peclet $[-]$
Q	Caudal [$m^3 s^{-1}$]
q	Término de fuente de calor
R_E	Número de Reynolds $[-]$
R^2	Coeficiente de Correlación $[-]$
r_i	Razón de creación por adición de la fase dispersa más cualquier fuente que haya definido el usuario
S_i	Valor simulado $[-]$

Sc_t	Número turbulento de Smith
s_i	Razón neta de producción de la especie i por la reacción química
$\bar{S}$	Promedio de los valores simulados $[-]$
t	Tiempo transcurrido desde que se añade el trazador $[s]$
t_m	Tiempo medio de residencia $[d]$
t_{mi}	Brazo de palanca $[d]$
t_n	Tiempo de residencia nominal $[d]$
t_s	Time step $[s]$
$\#t_s$	Número de time step $[-]$
t_t	Tiempo en el que se añade el trazador $[s]$
U	Velocidad $[m\ s^{-1}]$
u_m	Velocidad media $[m\ s^{-1}]$
V	Volumen de la laguna $[m^3]$
$\vec{V}$	Vector de velocidad del fluido
v	Volumen de la solución de Rodamina $[m^3]$
W	Peso de la Rodamina en la solución $[g]$
Ws	Peso de la solución de Rodamina $[g]$
Y_i	Especie i
δ	Densidad de la solución de Rodamina $[g\ ml^{-1}]$
δ_E	Densidad de la solución de Rodamina en la entrada de la laguna $[g\ ml^{-1}]$
ϵ	Tasa de disipación turbulenta $[m^2\ s^{-3}]$
Θ	Pendiente representativa sobre el intervalo $[-]$
θ	Variable
μ_t	Viscosidad turbulenta
ρ	Densidad del fluido
σ^2	Varianza de la curva C vs t $[-]$
$\sigma\tau^2$	Varianza a dimensional $[-]$
ν	Viscosidad cinética $[m^2\ d^{-1}]$
ϕ	Diámetro de la tubería $[m]$
∇	Operador diferencial nabla
τ_{ij}	Tensor de esfuerzo de viscosidad
Φ	Término de disipación

SIGLAS

CFD	Flujo Dinámico Computacional
COHNS	Carbono, Oxígeno, Hidrógeno, Nitrógeno y Azufre
CSTR	Tanque Reactor de Flujo Continuo Agitado
DBO	Demanda Bioquímica de Oxígeno
DNS	Solución Numérica Directa
DQO	Demanda Química de Oxígeno



EDP	Ecuaciones Diferenciales Parciales
EF	Coeficiente de Eficiencia
GUI	Interfaz Gráfica de Usuario
HRT	Tiempo de Retención Hidráulica
MAE	Error Absoluto Promedio
MLVS	Mezcla de Sólidos Suspendidos Volátiles
RMSE	Error de Raíz Promedio de Cuadrados
SST	Sólidos Suspendidos Totales
SRT	Tiempo de Retención de Sólidos
UASB	Manta Anaerobia de Lodo con Flujo Ascendente

Contenido

Dedicatoria	3
Agradecimiento	4
Resumen	5
Abstract	6
Lista de Símbolos	7
Contenido	10
Lista de Figuras	13
Lista de Tablas	16
1 INTRODUCCIÓN	18
1.1 ANTECEDENTES	18
1.2 JUSTIFICACIÓN	18
1.3 LOCALIZACIÓN	19
1.4 OBJETIVOS	19
1.4.1 OBJETIVO GENERAL	19
1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
1.5 DESCRIPCIÓN GENERAL	21
2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS	22
2.1 TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES	22
2.1.1 INTRODUCCIÓN	22
2.1.2 LODOS ACTIVADOS	23
2.1.3 PROCESOS ANAEROBIOS	29
2.1.4 LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN	33
2.2 LAGUNAS FACULTATIVAS	38
2.2.1 INTRODUCCIÓN	38
2.2.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO	38
2.2.3 PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DEL EFLUENTE	40
2.2.4 INFLUENCIA DE LAS ALGAS	40
2.2.5 INFLUENCIA DE LAS CONDICIONES AMBIENTALES	42
2.3 HIDRÁULICA DE LAGUNAS	45
2.3.1 INTRODUCCIÓN	45
2.3.2 PATRONES DE CAUDAL Y MEZCLA EN LAGUNAS	45
2.3.3 PRUEBA DE TRAZADORES	52
2.4 MODELOS CFD	65
2.4.1 INTRODUCCIÓN	65



2.4.2	GENERALIDADES	66
2.4.3	IMPORTANCIA DEL CFD EN LA MODELACION DE LAGUNAS DE TRATAMIENTO	70
2.4.4	APLICACIÓN	71
2.4.5	VALIDACIÓN	72
2.4.6	DISCRETIZACIÓN DEL MODELO CFD EN UNA LAGUNA	74
2.4.7	TURBULENCIA	75
2.5	DESCRIPCIÓN DE LOS PAQUETES DE SOFTWARE UTILIZADOS	76
2.5.1	GAMBIT v.2.4	76
2.5.2	FLUENT v.6.3	76
3	MATERIALES Y METODOLOGÍA	79
3.1	PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES UCUBAMBA	79
3.1.1	INTRODUCCIÓN	79
3.1.2	UBICACIÓN	79
3.1.3	OBJETIVOS DEL PLAN DE SANEAMIENTO DE LA CIUDAD DE CUENCA	80
3.1.4	CARACTERÍSTICAS DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES	80
3.2	MATERIALES	85
3.2.1	INTRODUCCIÓN	85
3.2.2	MATERIALES UTILIZADOS	85
3.3	METODOLOGÍA	87
3.3.1	INTRODUCCIÓN	87
3.3.2	PREPARACIÓN DE LA SOLUCIÓN TRAZADOR	88
3.3.3	CALIBRACIÓN DEL FLUORÓMETRO	89
3.3.4	DETERMINACIÓN DE LA CANTIDAD DE RODAMINA UTILIZADA	90
3.3.5	DESCRIPCIÓN DE LA PRUEBA DE TRAZADORES EN LAS LAGUNAS FACULTATIVAS	91
3.4	MODELAMIENTO DINÁMICA DE FLUJO EN LAS LAGUNAS	94
3.4.1	INTRODUCCIÓN	94
3.4.2	GAMBIT 2.4	94
3.4.3	FLUENT 6.3	97
3.5	EVALUACIÓN ESTADÍSTICA	103
4	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	105
4.1	INTRODUCCIÓN	105
4.2	RESULTADOS DE LAS PRUEBAS EN CAMPO	105
4.2.1	INTRODUCCIÓN	105
4.2.2	FACULTATIVA 1	105
4.2.3	FACULTATIVA 2	108
4.3	RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN EN EL CFD	111
4.3.1	INTRODUCCIÓN	111
4.3.2	FACULTATIVA 1	111
4.3.3	FACULTATIVA 2	118
4.4	COMPARACIÓN ENTRE LOS DATOS OBTENIDOS DE LAS LAGUNAS FACULTATIVA 1 Y FACULTATIVA 2	123
4.4.1	INTRODUCCIÓN	123



4.4.2	COMPARACIÓN DE LOS DATOS DE CAMPO, CFD Y DISEÑO	123
4.5	CONFIABILIDAD DE LA GRILLA	125
4.5.1	INTRODUCCIÓN	125
4.5.2	GRILLAS	125
4.5.3	RESULTADOS DE LOS MODELOS CON DIFERENTES NUMEROS DE ELEMENTOS	127
5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	139
5.1	CONCLUSIONES	139
5.2	RECOMENDACIONES	141
	Bibliografía	142
	Anexos	146
A	DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL	146
A.1	PAQUETES DE SOFTWARE CFD DISPONIBLES EN EL MERCADO	146
A.2	PROBLEMAS DE FLUIDOS QUE LOS CÓDIGOS CFD PUEDEN RESOLVER	148
A.3	APLICACIONES DEL CFD	149
A.4	GAMBIT v.2.4	151
A.5	FLUENT v.6.3	158
A.6	DISCRETIZACIÓN	165
A.7	PROGRAMA PRUEBA.M	177
A.8	CONFIABILIDAD DE LA GRILLA	179
B	RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE TRAZADORES	187
B.1	PRUEBA DE TRAZADORES EN LA LAGUNA FACULTATIVA 2	187
B.2	PRUEBA DE TRAZADORES EN LA LAGUNA FACULTATIVA 1	217

Lista de Figuras

1.1	Ubicación	20
2.1	Principales componentes de un sistema de lodos activados	24
2.2	Microorganismos comunes del proceso de lodos activados	25
2.3	Representación esquemática del floc que garantiza una alta eficiencia en el sistema de lodos activados	25
2.4	Esquema general de un bio-reactor anaerobio	31
2.5	Lagunas en serie	36
2.6	Lagunas en paralelo	36
2.7	Principio simplificado de trabajo de una laguna facultativa	39
2.8	Algas presentes en lagunas facultativas	41
2.9	Algas, energía de la luz y oxígeno en una laguna facultativa (sección transversal)	42
2.10	Estratificación y mezclado en lagunas	44
2.11	Flujo de pistón	46
2.12	Mezcla Completa	47
2.13	Reactor de mezcla completa en serie	47
2.14	Flujo disperso	48
2.15	Cortocircuitos	51
2.16	Tipos de estímulos en trazadores	53
2.17	Ejemplo de las curvas de tiempo de retención hidráulica en pruebas de laboratorio	54
2.18	Representación geométrica de t_m	60
2.19	Curvas típicas de trazadores	60
2.20	Dispersión	61
2.21	Esquema de análisis de los CFD	67
2.22	Ejemplo de la aplicación práctica de los modelos de CFD a lagunas de tratamiento	73
2.23	Elementos comunes usados en discretización	74
3.1	Vista en planta de la PTAR de Ucubamba	79
3.2	Cajón de llegada, By-pass y compuerta de admisión	81
3.3	Cribas mecánicas autolimpiantes	81
3.4	Deflectores de caudal, desarenadores y transportadores de arena	82
3.5	Lagunas aereadas	83
3.6	Lagunas facultativas	84
3.7	Laguna de maduración	84
3.8	Materiales	87
3.9	Disolución 100 ppb	88
3.10	Diluciones 100 veces, 100 ppm, 100 ppb	89
3.11	Fluorómetro	89
3.12	Muestreador automatico ISCO 6712	91
3.13	Mezcla del trazador con agua de la laguna para homogenizar la temperatura	92
3.14	Prueba de trazadores en la laguna Facultativa 2	92



3.15 Secuencia de fotos de la prueba en la laguna facultativa 2	93
3.16 Prueba de trazadores en la laguna Facultativa 1	94
3.17 Secuencia de fotos de la prueba en la laguna facultativa 1	95
4.1 Curva concentración versus tiempo de la Facultativa 1	107
4.2 Curva concentración versus tiempo de la Facultativa 2	109
4.3 Curvas C vs t, condición wall y condición symmetry (Facultativa 1)	112
4.4 Diferencia entre los valores de las variables y sus medias de la Facultativa 1	113
4.5 Gráficos de vectores de velocidad de la simulación en la Facultativa 1	115
4.6 Gráficos de contorno de velocidades de la simulación en la Facultativa 1	116
4.7 Curvas C vs t de datos de campo y de CFD de la Facultativa 1	118
4.8 Simulación en CFD frente a prueba de campo	119
4.9 Diferencia entre los valores de las variables y sus medias de la Facultativa 2	120
4.10 Gráficos de la simulación en la Facultativa 2	121
4.11 Curvas C vs t de datos de campo y de CFD de la Facultativa 2	123
4.12 Curvas C vs t/tm	131
4.13 Discretización de la entrada en lagunas con 100000, 200000 y 400000 elementos	132
4.14 Discretización de la salida en lagunas con 100000, 200000 y 400000 elementos	132
4.15 Discretización del cuerpo en lagunas con 100000, 200000 y 400000 elementos	133
4.16 Division en volúmenes de la Facultativa 2 symmetry	134
4.17 Promedio de velocidades en los volúmenes Superficie	135
4.18 Promedio de velocidades en los volúmenes a dos tercios de profundidad	135
4.19 Promedio de velocidades en los volúmenes a un tercios de profundidad	136
4.20 Contornos de velocidad con multiples números de elementos	137
4.21 Contornos de velocidad a multiples alturas	138
A.1 Ejemplos de aplicación práctica de los CFD	150
A.2 Inicio en GAMBIT	151
A.3 Barra de herramientas	152
A.4 Campo de forma	152
A.5 Control global de herramientas	153
A.6 Ventana de descripción	153
A.7 Ventana de transcripción	154
A.8 Entidades señaladas	154
A.9 Condiciones de contorno	156
A.10 Exportación al FLUENT	157
A.11 Inicio de FLUENT	158
A.12 Ventana principal de FLUENT	158
A.13 Pantalla de gráficos	159
A.14 Definición del modelo	160
A.15 Modelos de turbulencia	161
A.16 Definición de materiales	162
A.17 Condiciones de operación	162
A.18 Definición de las condiciones de frontera	163



A.19 Condiciones de operación	163
A.20 Condiciones de operación	164
A.21 Esquema de los volúmenes de discretización de la laguna Facultativa 1	165
A.22 Esquema de los volúmenes de discretización de la facultativa 2	171
A.23 Promedio de Energía Cinética Turbulenta (k) en superficie	179
A.24 Promedio de Energía Cinética Turbulenta (k) a dos tercios de profundidad . .	179
A.25 Promedio de Energía Cinética Turbulenta (k) a un tercio de profundidad . . .	180
A.26 Promedio de Tasa de disipación turbulenta (ϵ) en superficie	180
A.27 Promedio de Tasa de disipación turbulenta (ϵ) a dos tercios de profundidad . .	181
A.28 Promedio de Tasa de disipación turbulenta (ϵ) a un tercios de profundidad . .	181
A.29 Promedio de Intensidad de turbulencia (I) en superficie	182
A.30 Promedio de Intensidad de turbulencia (I) a dos tercios de profundidad	182
A.31 Promedio de Intensidad de turbulencia (I) a un tercio de profundidad	183

Lista de Tablas

2.1	Variantes del sistema de lodos activados	29
2.2	Variantes de los sistemas anaerobios	32
2.3	Respiración y Fotosíntesis	39
2.4	Factores ambientales y su influencia en las lagunas	43
2.5	Información sobre trazadores en sistemas de agua	56
2.6	Características de los trazadores colorantes más comunes	57
2.7	Técnicas tradicionales vs Experimentación	71
3.1	Características de las lagunas aereadas (ETAPA, 2007)	82
3.2	Características de las lagunas facultativas (ETAPA, 2007)	83
3.3	Características de las lagunas de maduración (ETAPA, 2007)	84
3.4	Intervalo de toma de muestras (Facultativa 2)	93
3.5	Intervalo de toma de muestras (Facultativa 1)	94
3.6	Coordenadas de las lagunas	96
3.7	Radios utilizados en las esquinas de las lagunas	96
4.1	Datos geométricos y de viscosidad de la laguna Facultativa 1	106
4.2	Resultados de la prueba de trazadores en la laguna Facultativa 1	106
4.3	Coeficientes de dispersión obtenidos de la literatura (Facultativa 1)	107
4.4	Datos geométricos y de viscosidad de la laguna Facultativa 2	108
4.5	Resultados de la prueba de trazadores en la laguna Facultativa 2	108
4.6	Coeficientes de dispersión obtenidos de la literatura (Facultativa 2)	109
4.7	Parámetros estadísticos entre datos de campo, wall, symmetry y combinación wall symmetry (Facultativa 1)	113
4.8	Datos de la prueba de trazadores Campo vs CFD de la Facultativa 1	117
4.9	Parámetros estadísticos entre datos de campo y CFD (Facultativa 2)	118
4.10	Datos de la prueba de trazadores Campo vs CFD de la Facultativa 2	122
4.11	Parámetros de las lagunas	124
4.12	Características del mallado en las lagunas con 100000, 200000 y 400000	126
4.13	Diferencia en% de las lagunas de 100000 y 400000 con respecto a la velocidad	128
4.14	Diferencia en% de las lagunas de 200000 y 400000 con respecto a la velocidad	128
4.15	Demanda computacional	130
A.1	Paquetes comerciales disponibles	147
A.2	Problemas que los códigos CFD resuelven	148
A.3	Aplicaciones del CFD	149
A.4	Discretización en la zona de entrada (Facultativa 1)	167
A.5	Discretización en la zona de salida (Facultativa 1)	169
A.6	Discretización en la zona central (Facultativa 1)	170
A.7	Discretización en la zona de entrada (Facultativa 2)	174
A.9	Discretización en la zona central (Facultativa 2)	176
A.8	Discretización en la zona de salida (Facultativa 2)	176
A.10	Diferencia en% de las lagunas de 100000 y 400000 con respecto a k	183



A.11 Diferencia en% de las lagunas de 200000 y 400000 con respecto a k	184
A.12 Diferencia en% de las lagunas de 100000 y 400000 con respecto a ϵ	184
A.13 Diferencia en% de las lagunas de 200000 y 400000 con respecto a ϵ	185
A.14 Diferencia en% de las lagunas de 100000 y 400000 con respecto a l	185
A.15 Diferencia en% de las lagunas de 200000 y 400000 con respecto a l	186
B.1 Prueba de trazadores Facultativa 2	216
B.2 Prueba de trazadores Facultativa 1	248

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

El tratamiento de aguas residuales es una parte fundamental del proceso de saneamiento ambiental en ciudades. En este sentido, ETAPA (Empresa Pública Municipal de Telecomunicaciones, Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Cuenca) ha situado a la ciudad de Cuenca como un referente en el tratamiento de agua residual en el país. La ciudad de Cuenca cuenta con la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Ucubamba, que ha venido funcionando desde el año 1999 como parte de la primera fase de los Planes Maestros de Agua Potable y Alcantarillado del Área Metropolitana de la Ciudad de Cuenca, que consta de un sistema de colectores ubicados al borde de los ríos que conducen el agua hacia Ucubamba para su tratamiento a través del sistema de lagunas de estabilización. A pesar que al momento la planta sufre de acumulación de lodos en las lagunas aereadas y facultativas, su eficiencia en la calidad del efluente se ha mantenido en el transcurso del tiempo.

Las lagunas de estabilización a pesar de ser un proceso de operación relativamente simple, comprende procesos físicos y químicos complejos. Así, el presente trabajo contribuye al proceso de conocimiento de este sistema que es aplicado con éxito alrededor del mundo donde existe la disponibilidad de terreno.

Este trabajo forma parte del Proyecto de Investigación "Manejo Integral de la Calidad del Agua" que recibe financiamiento de la Cooperación Interuniversitaria Flamenca (Bélgica) VLIR-IUC y el apoyo Institucional de la Empresa ETAPA

1.2 JUSTIFICACIÓN

Dentro de la conservación del medio ambiente y de la salud pública, el tratamiento de aguas provenientes del uso doméstico, comercial e industrial tiene una gran importancia y dificultad debido a su composición variable. Los modelos que se emplean para predecir la eficiencia de un tratamiento en una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) deben reflejar de la mejor manera posible el comportamiento real que tienen los sistemas para así conseguir utilidades prácticas del modelo al aplicarlo al sistema. En la literatura revisada, la cual se encuentra orientada al sistema de depuración comprendida por lagunas de estabilización, se ha visto que debido a que se ha tomado algunos supuestos que se alejan del comportamiento real de la laguna, los efluentes no cumplen con las normas ambientales establecidas, por lo que es necesario profundizar en el conocimiento de estos sistemas.

El sistema de lagunas de estabilización es el método más empleado en países en desarrollo debido a su bajo costo de mantenimiento y a su eficiencia (Mendoza, 2000) que depende



directamente de la hidráulica del sistema en donde parámetros como el tiempo medio de retención (t_m), número de dispersión (d), volumen efectivo (e) son indicadores del funcionamiento hidráulico de las lagunas. El problema de dichos factores es que se conocen sus valores reales únicamente cuando el sistema ya está construido. Una solución para este problema es el uso de modelos Computacionales de Flujo Dinámico (CFD), los cuales son herramientas que permiten predecir el comportamiento hidráulico en sistemas que están siendo diseñados, y mejorar aquellos que ya están construidos.

Como todo modelo computacional, el CFD requiere de una validación de los resultados obtenidos, uno de los métodos más utilizados y que es detallado en el presente trabajo es el uso de trazadores fluorescentes. Para el efecto se realizaron pruebas de trazadores en las lagunas facultativas de la PTAR de Ucubamba para posteriormente construir modelos CFD de las mismas. Experiencias previas realizadas en las lagunas de maduración de la planta (Espinoza y Rengel, 2009) fueron importantes para la ejecución de las pruebas de trazadores, mientras que el proceso de construcción y validación de modelos CFD es una tarea nueva no reportada en la literatura científica en el país para sistemas lagunares de gran escala como es el caso de las lagunas Facultativas de la PTAR Ucubamba.

1.3 LOCALIZACIÓN

La PTAR de Ucubamba, se encuentra ubicada en la República del Ecuador, Provincia del Azuay, Cantón Cuenca, al noreste de la Ciudad de Cuenca, en el sector de Ucubamba, en el Km 8.5 de la Autopista Cuenca-Azogues conforme se puede observar en la Figura 1.1.

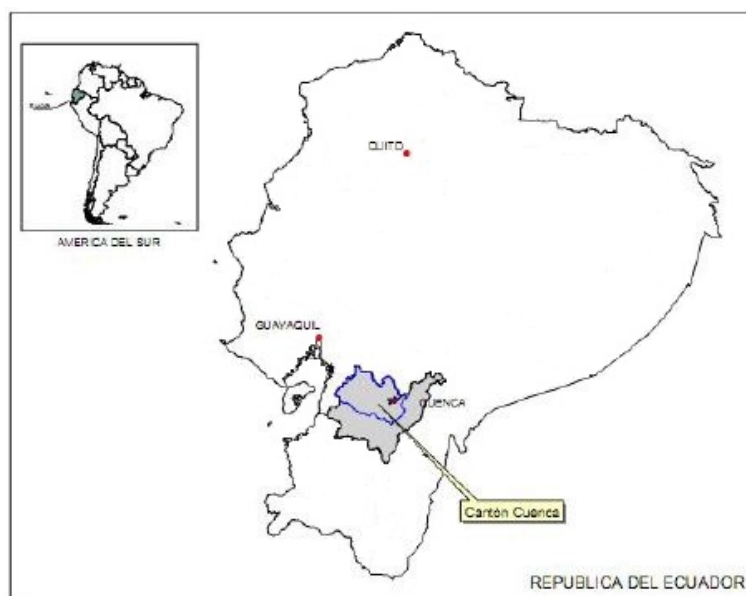
1.4 OBJETIVOS

1.4.1 OBJETIVO GENERAL

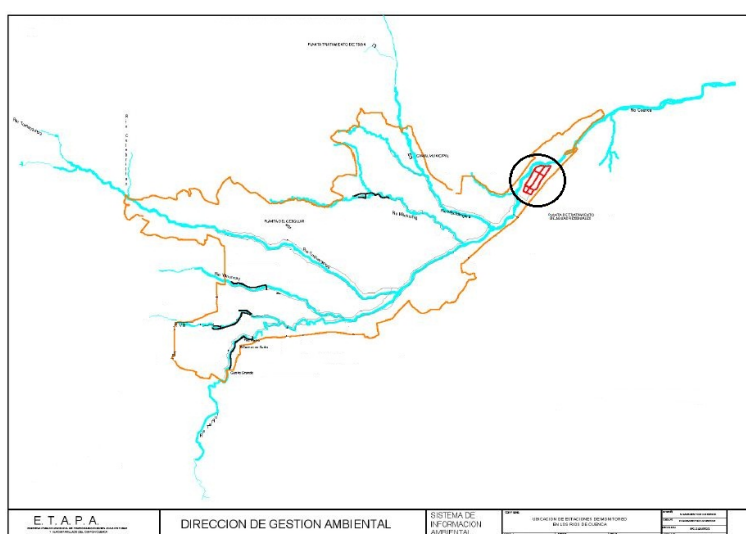
- ✓ Construir y validar modelos computacionales de flujo dinámico en las lagunas facultativas 1 y 2 de la planta de tratamiento de aguas residuales de Ucubamba, a partir de pruebas de trazadores fluorescentes ejecutadas a escala real.

1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 1) Ejecutar pruebas de trazadores mediante el empleo del trazador fluorescente Rodamina WT en las lagunas facultativas 1 y 2 de la planta de tratamiento de aguas residuales de Ucubamba, y conocer su comportamiento hidráulico, a través de la determinación del tiempo de retención real, zonas muertas, cortocircuitos y el número de dispersión.
- 2) Elaborar una metodología para la construcción de un modelo computacional de flujo dinámico para lagunas de gran escala a través de herramientas computacionales.



(a) Ubicación de la PTAR de Ucubamba en el país



(b) Ubicación de la PTAR de Ucubamba en la ciudad

Figura 1.1: Ubicación

- 3) Comparar la respuesta del modelo computacional de flujo dinámico con los datos experimentales a través de un análisis de las curvas de distribución del tiempo de residencia (concentración versus tiempo).
- 4) Realizar una caracterización hidráulica de las lagunas a través de los datos obtenidos de las pruebas de trazadores y de los resultados de la modelación CFD.



1.5 DESCRIPCIÓN GENERAL

El presente documento inicia con una revisión de literatura especializada en los temas de tratamiento de agua residual donde se detalla los procesos físico-químicos y biológicos característicos de un sistema de lagunas de estabilización, así mismo se encuentra detallado una revisión de los modelos computacionales de flujo dinámico. Posteriormente en el siguiente capítulo se detalla los materiales y métodos utilizados en los procesos experimentales y en la construcción y validación de los modelos computacionales así como la metodología de los análisis realizados. Los resultados se muestran en el capítulo siguiente donde también se incluye la discusión de los mismos. Finalmente se encuentra conciso en un capítulo las conclusiones y recomendaciones derivadas del presente estudio. Las referencias que se indican en el curso del documento se encuentran listadas a continuación del capítulo de conclusiones y recomendaciones. Para mayor detalle de los resultados obtenidos se encuentra la sección de anexos en la parte final del presente documento.

Capítulo 2

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

2.1.1 INTRODUCCIÓN

Desde sus inicios la humanidad ha tenido que aplicar medidas para proteger su agua de bebida de la contaminación de aguas residuales, el tratamiento de las aguas residuales como lo conocemos inició a finales de 1800 y comienzos de 1900 (Rojas, 2002) como consecuencia de la contaminación de cuerpos de agua y enfermedades hídricas, ya que históricamente la descarga de aguas residuales se ha realizado sobre cuerpos receptores acuáticos, si estas aguas no son tratadas se contaminan los cuerpos receptores con altas concentraciones de bacterias, virus y parásitos creándose un grave problema de salud pública al provocar enfermedades como: diarrea, tifoidea, paratifoidea, cólera, hepatitis infecciosa, amebiasis, giardiasis (León y Sanhuenza, 1995).

Según el Banco Mundial en Latinoamérica menos del 5% del agua residual recibe tratamiento, las aguas residuales se vierten a los cuerpos superficiales con sus respectivos riesgos. Las personas de escasos recursos son más susceptibles a enfermedades y menos conscientes de cómo mantener condiciones salubres lo que lleva a una mayor propagación de enfermedades en la población general. El 10% de las aguas de alcantarillado recolectadas en América Latina son tratadas y hay la duda acerca de cómo operar estas plantas. La diarrea y la gastroenteritis se encuentran entre las tres principales de la causa de muerte en el mundo, la gran mayoría de estas muertes son causadas por un agua no segura y la contaminación a través del desecho inadecuado de aguas residuales. Se ve la necesidad de implementar mejores prácticas de higiene, saneamiento y desecho de residuos ya que el cólera rara vez alcanza proporciones de epidemia en regiones con agua limpia y con prácticas efectivas de manejo de aguas residuales (Reynolds, 2002).

En un tratamiento de aguas residuales se trata de reproducir los mismos procesos de auto depuración que se dan en cualquier masa de agua en la naturaleza, pero los sistemas se diseñan de tal forma que dichos procesos son acelerados (Piedrola, 2000). El cuerpo receptor acuático posee una limitada capacidad de asimilación, la contaminación aparece cuando se supera dicha capacidad, por eso previo a la descarga de aguas residuales, estas deben recibir algún tratamiento que modifique sus condiciones, de tal forma que el efluente sea descargado de forma segura en el medio y se haga una disposición adecuada de los sólidos obtenidos durante los procesos de purificación.

El ingeniero sanitario tiene el reto de tratar las aguas residuales, las cuales son de composición variable, ya que las industrias por el uso de diferentes productos y la aparición de nuevos producen aguas residuales de diferentes tipos, que requieren tratamientos complejos que han ido apareciendo (Ramalho, 2003), en definitiva aunque sólo se tengan aguas residuales exclusivamente domésticas su composición no será homogénea ya que depende su cantidad del consumo medio de agua y su composición de los hábitos



alimenticios de la población.

Para elegir entre uno u otro método de tratamiento de aguas residuales se debe realizar una evaluación óptima del tratamiento al igual que una evaluación práctica de los métodos que están dentro del presupuesto, a mas de poseer conocimientos técnicos y experiencias prácticas, también depende del uso que se le va a dar al efluente (Rojas, 2002).

En función de todo lo planteado anteriormente se ve la importancia para la salud y la complejidad del tratamiento de las aguas residuales, en el presente capítulo se verán los tres principales métodos de tratamiento de aguas residuales: lodos activados, sistemas anaerobios y lagunas de estabilización, sus principios de funcionamiento, variantes y esquemas de las variantes. De los tres métodos se pondrá énfasis en las lagunas facultativas, en las cuales se realizaron las pruebas de trazadores, por lo que se considera importante entender su funcionamiento.

2.1.2 LODOS ACTIVADOS

Introducción

Es un método de depuración de aguas residuales que fue desarrollado en Inglaterra en 1914 por Adern y Locket, es un proceso ampliamente usado en el mundo del tratamiento del agua residual doméstica e industrial, en situaciones donde el espacio disponible es limitado y se requiere una alta calidad de efluente. Es un sistema más mecanizado que otros sistemas de depuración de aguas residuales y envuelve operaciones más sofisticadas, sin embargo, su desventaja es el alto uso de energía para la aereación (Von~Sperling, 2007a).

Todos los procesos de lodos activados tiene en común el contacto del floc biológico previamente formado en un tanque de aereación con las aguas residuales (Romero, 2004).

El lodo activado consiste en una masa floculenta de microorganismos, materia muerta y materiales inorgánicos; tiene la propiedad de poseer una superficie altamente activa para la adsorción de materiales coloidales y suspendidos, a la cual debe su nombre de activado.

Principales unidades en un sistema de lodos activados

En la Figura 2.1 podemos observar los elementos esenciales que componen cualquier sistema de lodos activados. A continuación se presenta una explicación de los procesos que se desarrollan en cada componente:

Reactor aereado: También llamado reactor biológico, las reacciones bioquímicas relacionadas con la remoción de materia orgánica y en ciertas circunstancias del oxígeno toman lugar aquí.

La biomasa se desarrolla mediante el uso del substrato presente en el afluente.

En el reactor, el cultivo bacteriano lleva a cabo la conversión en concordancia general con las estequiometrias de las ecuaciones 2.1 y 2.2 (Tchobanoglous y otros, 1998a).

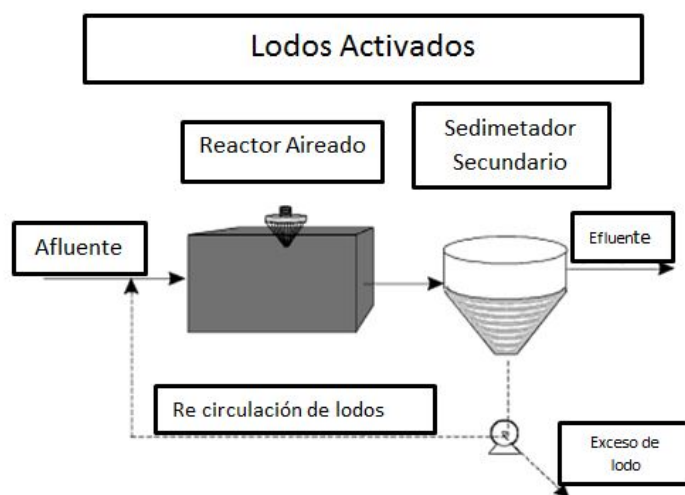
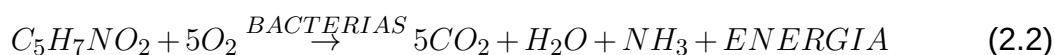
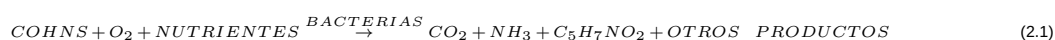


Figura 2.1: Principales componentes de un sistema de lodos activados (Von~Sperling, 2007a)



COHNS es la materia orgánica presente en el agua residual. A partir de la ecuación 2.2 se puede observar que casi todas las células se oxidan por completo.

Sedimentador secundario: Se lleva a cabo la sedimentación de sólidos (biomasa) la cual lleva a la clarificación final del afluente.

Recirculación del lodo y exceso de lodo: Una parte de los sólidos que se sedimentan en el tanque sedimentador secundario es recirculado al reactor, lo cual es responsable por la alta eficiencia del sistema. La otra parte de los sólidos (Exceso de lodo que corresponde al crecimiento de tejido celular) es retirada del sistema y conducido al sistema de tratamiento de lodos.

Como resultado de la recirculación de lodos la concentración de sólidos suspendidos en el tanque aireado es alta.

Microbiología del proceso

Para dar garantías de un buen funcionamiento del sistema de lodos activados es necesario conocer la importancia de los microorganismos dentro del sistema. El papel clave de las bacterias es la de descomponer la materia orgánica producida por otros organismos vivos, lo que las hace los microorganismos más importantes, pero las actividades de otros microorganismos son igualmente importantes en el sistema de lodos activados, por ejemplo los protozoos consumen bacterias dispersas que no han floculado y los rotíferos consumen cualquier partícula biológica pequeña que no haya sedimentado. En la Figura 2.2 se puede ver los microorganismos que actúan en el proceso de lodos activados, para saber la función detallada de cada una de los microorganismos dentro de un sistema de lodos activados se puede referir a Romero (2004).

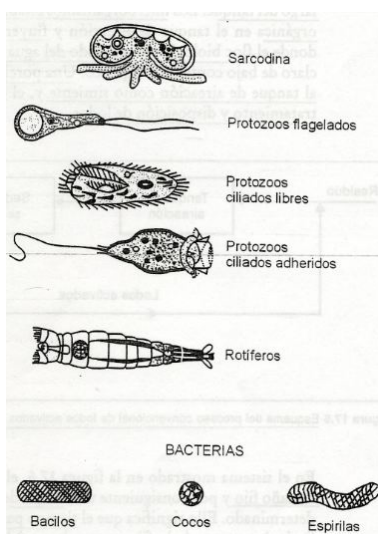


Figura 2.2: Microorganismos comunes del proceso de lodos activados (Romero, 2004)

Floc biológico

La biomasa es separada en el sedimentador secundario debido a la propiedad que tiene para flocular y sedimentar. Esto se da por la producción de una matriz gelatinosa, la cual permite la aglutinación de las bacterias, protozoos y otros microorganismos responsables de la remoción de la materia orgánica y su transformación en flocs macroscópicos. Los flocs son mucho más grandes que los microorganismos, lo cual facilita su sedimentación.

En la Figura 2.3 se puede ver la estructura de un floc.

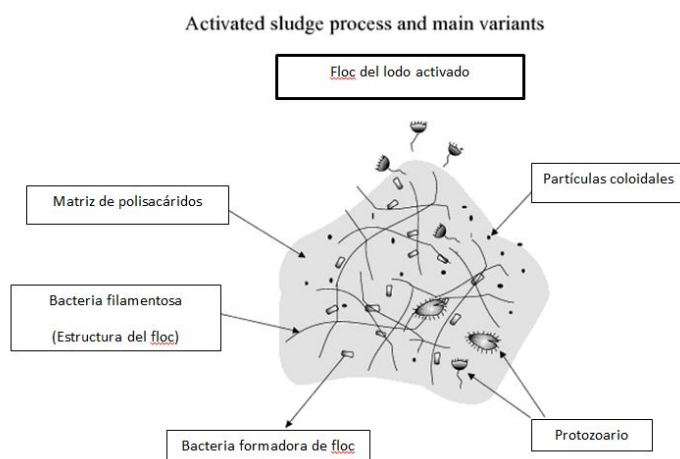


Figura 2.3: Representación esquemática del floc que garantiza una alta eficiencia en el sistema de lodos activados (Von Sperling, 2007a)

Parámetros usados en lodos activados

En los sistemas de lodos activados el tiempo de retención hidráulica es pequeño, del orden de horas lo cual implica un volumen en el tanque de aereación reducido.

Como resultado de la recirculación de los lodos, los sólidos permanecen en el sistema por mucho más tiempo que los líquidos. El tiempo de retención de sólidos en el sistema se denomina tiempo medio de permanencia celular, tiempo de retención de sólidos o edad del lodo (*Solids Retention Time*, SRT) y es definido como la relación entre la masa de lodo biológico presente en el reactor y la masa de lodo biológico removido (o producido) del sistema de lodos activados por día.

La relación $\frac{\text{Comida}}{\text{Microorganismos}} = \frac{F}{M}$ expresado en unidades $\frac{\text{kg} \cdot \text{DBO}}{\text{kg} \cdot \text{MLVSS} \cdot \text{d}}$ (donde MLVS es mezcla de sólidos suspendidos volátiles), es otro parámetro de importancia en los lodos activados, se relaciona como la carga de comida o sustrato que se está dando por día y por unidad de bio masa en el reactor. Es importante ya que los microorganismos tienen una limitada capacidad de consumir sustrato por unidad de tiempo, se puede dar dos casos:

Si $\frac{F}{M}$ es alto: Quiere decir que la oferta de materia biodegradable es mayor a la capacidad de consumo, resultando en un exceso de sustrato en el efluente.

Si $\frac{F}{M}$ es bajo: Quiere decir que la oferta de materia biodegradable es menor a la capacidad de consumo, como consecuencia los microorganismos podrían consumir prácticamente toda la materia orgánica del afluente, así como su propia materia celular.

Principales variantes del sistema de lodos activados

Se presenta en la Tabla 2.1 una descripción de las variantes de lodos activados, la cual ha sido extraída de Tchobanoglous y otros (1998b), por ser una de las clasificaciones más completas encontradas en la bibliografía especializada.

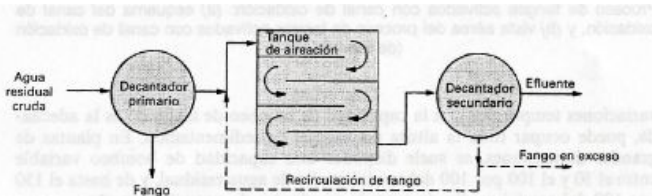
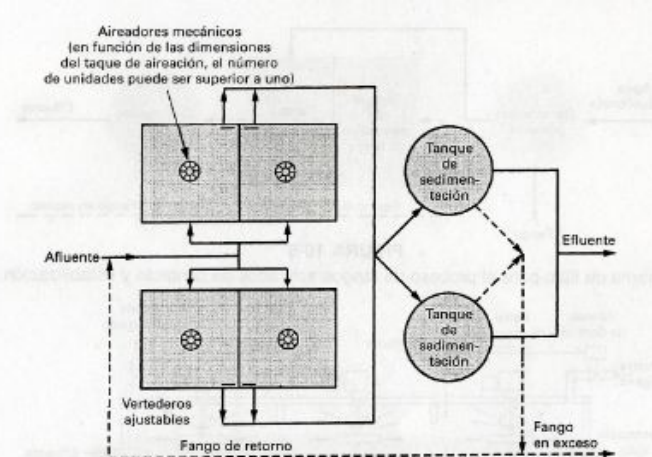
Proceso	Descripción	Figura
Convencional (Flujo de pistón)	El agua decantada y el lodo activado recirculado entran en el tanque de aireación y se mezclan con aire disuelto o con agitadores mecánicos. El suministro de aire suele ser uniforme a lo largo de toda la longitud del canal. Durante el período de aireación, se produce la adsorción, floculación, y oxidación de la materia orgánica. Los sólidos del fango activado se separan en un decantador secundario.	
Reactor de mezcla completa	El proceso es una aplicación del régimen de flujo de un reactor de flujo continuo agitado (<i>Continuous Stirring Tank Reactor</i> , CSTR). El agua residual decantada y el lodo activado recirculado se introducen, normalmente, en varios puntos del tanque de aireación. La carga orgánica y la demanda de oxígeno son uniformes en toda la longitud del tanque.	



Tabla 2.1 – Continuación de la página anterior

Proceso	Descripción	Figura
Aireación Graduada	Este proceso es una modificación del proceso convencional de flujo en pistón. A lo largo de la longitud del canal, en función de la demanda de oxígeno, se aplican caudales de aireación diferentes. La mayor cantidad de oxígeno se suministra a la entrada del tanque, y las cantidades aportadas disminuyen conforme el líquido mezcla se aproxima al extremo de salida. Esta configuración se suele conseguir disponiendo diferentes separaciones entre difusores a lo largo del tanque.	
Aereación con alimentación escalonada	La alimentación escalonada es una modificación del proceso de flujo en pistón convencional en la que el agua residual decantada se introduce en diferentes puntos del canal para conseguir un valor de la relación $\frac{F}{M}$ uniforme, lo cual permite reducir la demanda de oxígeno. Normalmente se suelen emplear tres o más canales paralelos. Una de las ventajas importantes de este proceso es la flexibilidad de operación.	(a) (b)
Aereación modificada	La aereación modificada es similar al proceso de flujo en pistón convencional, con la diferencia de que se emplean menores tiempos de detención y valores de la relación $\frac{F}{M}$ más elevados. El rendimiento de eliminación de la DBO es inferior al de otros procesos de lodos activados.	
Contacto y estabilización	El proceso de contacto y estabilización utiliza dos tanques o compartimientos separados para el tratamiento del agua residual y la estabilización del lodo activado. El fango activado estabilizado se mezcla con el agua residual afluyente (bruta o decantada), en un tanque de contacto. El líquido mezcla y decanta en un decantador secundario y el fango de retorno se airea por separado en un tanque de reaeración para estabilizar la materia orgánica. Los volúmenes de aereación necesarios suelen ser un 50% inferiores a los necesarios en el proceso convencional de flujo en pistón.	
Aereación prolongada	El proceso de aereación prolongada es similar al de lodos activados convencional excepto en que funciona en la fase de respiración endógena de la curva de crecimiento, lo cual precisa una carga orgánica reducida y un largo período de aereación. Este proceso se emplea mucho en plantas prefabricadas para pequeñas comunidades.	
Aereación de alta carga	El proceso de aereación de alta carga es una modificación del proceso en la que se combinan altas concentraciones de SSVLM con elevadas cargas volumétricas. Esta combinación permite una elevada relación $\frac{F}{M}$ y largos tiempos de retención celular con tiempo de detención hidráulica cortos. Es muy importante que el mezclado sea adecuado.	
Proceso Kraus	El proceso Kraus es una modificación del proceso de aereación escalonada que se emplea para tratar aguas residuales con bajo contenido en nitrógeno. En un tanque independiente diseñado para nitrificar, se añade sobrenadante del digestor a una parte del fango de retorno como fuente de nutrientes. El líquido mezclado resultante se añade, entonces, al sistema de aereación de flujo en pistón principal.	

Continúa en la siguiente página


Tabla 2.1 – Continuación de la página anterior

Proceso	Descripción	Figura																		
Sistemas de oxígeno puro	En lugar de aire, en el proceso de fangos activados se utiliza oxígeno de gran pureza. El oxígeno se distribuye mediante difusores en tanques de aereación cubiertos y se recicla. Parte del gas se purga para reducir la concentración de dióxido de carbono. También puede ser necesario realizar ajustes del pH. La cantidad de oxígeno añadida es del orden de cuatro veces superior a la cantidad que se puede añadir con los sistemas de aereación convencionales.	(a) (b) (c)																		
Reactor de flujo discontinuo	El reactor de flujo discontinuo secuencial es un tipo de secuencial reactor que sigue un proceso de llenado-vaciado alternado, en el que todas las etapas del proceso de fangos activados se llevan a cabo en un reactor de mezcla completa, el líquido mezclado permanece en el interior del reactor durante todos los ciclos, lo cual permite, evitar la necesidad de disponer de tanques de sedimentación secundaria.	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Porcentaje de Volumen máximo</th> <th>Duración del ciclo</th> <th>Objetivo/operación</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>25 a 100</td> <td>25</td> <td>LLENADO: Agua a tratar, Aire On/Off, Adición de sustrato</td> </tr> <tr> <td>100</td> <td>35</td> <td>REACCION: Aire On/Ciclo, Tiempo de reacción</td> </tr> <tr> <td>100</td> <td>20</td> <td>SEDIMENTACION: Aire Off, Clarificación</td> </tr> <tr> <td>100 a 35</td> <td>15</td> <td>EVACUACION: Aire Off, Efluente, Evacuación del efluente</td> </tr> <tr> <td>35 a 25</td> <td>5</td> <td>FASE INACTIVA: Aire On/Off, Purga de fango</td> </tr> </tbody> </table>	Porcentaje de Volumen máximo	Duración del ciclo	Objetivo/operación	25 a 100	25	LLENADO: Agua a tratar, Aire On/Off, Adición de sustrato	100	35	REACCION: Aire On/Ciclo, Tiempo de reacción	100	20	SEDIMENTACION: Aire Off, Clarificación	100 a 35	15	EVACUACION: Aire Off, Efluente, Evacuación del efluente	35 a 25	5	FASE INACTIVA: Aire On/Off, Purga de fango
Porcentaje de Volumen máximo	Duración del ciclo	Objetivo/operación																		
25 a 100	25	LLENADO: Agua a tratar, Aire On/Off, Adición de sustrato																		
100	35	REACCION: Aire On/Ciclo, Tiempo de reacción																		
100	20	SEDIMENTACION: Aire Off, Clarificación																		
100 a 35	15	EVACUACION: Aire Off, Efluente, Evacuación del efluente																		
35 a 25	5	FASE INACTIVA: Aire On/Off, Purga de fango																		

Continúa en la siguiente página



Tabla 2.1 – Continuación de la página anterior

Proceso	Descripción	Figura
Reactor Deep Shaft	El reactor Deep Shaft es una forma del proceso de (pozo profundo) lodos activados. Los decantadores primarios y el tanque de aereación se sustituyen por un pozo vertical de entre 100 y 150 m de profundidad. El pozo se recubre con un revestimiento de chapa de acero y se equipa con una tubería concéntrica para formar un reactor de geometría anular. El líquido mezcla y el aire se ven forzados a circular en trayectoria descendente por el centro del pozo y ascienden por la parte exterior.	
Nitrificación de etapa única	En el proceso de nitrificación de etapa única, tanto la eliminación de la DBO como del amoníaco se llevan a cabo en la misma etapa biológica. Los reactores pueden consistir en una serie de reactores de mezcla completa o en un reactor de flujo en pistón.	
Nitrificación en etapas	En el proceso de nitrificación en varias etapas, la nitrificación se lleva a cabo en un reactor independiente, que funciona alimentado por el efluente de una unidad previa de tratamiento biológico. La ventaja de este sistema es que se puede optimizar la explotación, adecuándola a las necesidades de eliminación de nitrógeno.	

Tabla 2.1: Variantes del sistema de lodos activados(Tchobanoglous y otros, 1998a)

2.1.3 PROCESOS ANAEROBIOS

Introducción

La palabra anaerobio hace referencia a diversos sistemas de tratamientos de aguas residuales en los cuales el oxígeno disuelto y nitratos son eliminados. Muchas de las veces se opera para convertir la materia biodegradable tanto soluble como particulada a metano y dióxido de carbono. Ya que el metano es un gas escasamente soluble, la mayoría se desprenderá de la solución y se recuperará removiendo así la materia orgánica de la fase líquida y estabilizando cualquier sólido en el efluente producido en el proceso.

La digestión anaerobia también resulta en desactivación de los patógenos.

Descripción del proceso

En su inicio los digestores anaerobios eran simples tanques de concreto en los cuales, los sólidos eran colocados como compuesto acuoso y se les permitía descomponerse de forma anaerobia, se empleaban períodos de retención de 60 días o más, gradualmente



se descubrió que la descomposición podía ser acelerada calentando el digestor a 35 °C y mediante mezcla se proveía una reacción uniforme.

Debido a las altas temperaturas que se mantienen, la inactivación de patógenos es relativamente eficiente en los digestores.

Descripción general: Aunque la química, bioquímica y microbiología de la descomposición anaerobia son un poco complejas, según Romero (2004) se puede entender el proceso en tres pasos:

Paso 1: Hidrólisis de las partículas de materia orgánica a substratos solubles.

Paso 2: Fermentación de estos substratos solubles para producir ácido acético, dióxido de carbono y H_2 .

Paso 3: Conversión del ácido acético, H_2 , y parte del dióxido de carbono a metano.

La evolución del metano reduce la materia orgánica expresada en términos de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) del desecho y provee mecanismos para estabilizar la materia orgánica biodegradable contenida en esta, la reducción de DQO es mínima sin la producción del metano y además está asociado con la formación y evolución del H_2 .

Se busca en el diseño de reactores biológicos dar ambientes uniformes de reacción, tiempos de retención de sólidos (SRT) suficientemente largos para asegurar el crecimiento de todos los organismos necesarios.

En la Figura 2.4 se ven los elementos que constituyen un reactor anaerobio, el cual tiene 4 partes principales:

Recipiente cerrado: Se usa para evitar al oxígeno disuelto y asegurar condiciones anaerobias, es generalmente aislado para evitar la pérdida de calor.

Sistema de mezcla: Sirve para homogenizar el ambiente de mezcla y reducir la resistencia a la transferencia de masa, las condiciones uniformes en el bio-reactor minimiza el impacto de materiales inhibitorios producidos como intermediarios metabólicos, conservando los parámetros físicos-químicos del reactor dentro de los rangos y minimizar la variación de flujo y composición del afluente.

Sistema de calentamiento: Sirve para acelerar la descomposición.

Mecanismos de separación líquido-sólido-gas: Es un mecanismo crítico en el desempeño de los sistemas ya que su eficiencia determina la medida a la cual la bio masa activa puede ser acumulada.

Tipos de procesos anaerobios

Los tipos y descripción de procesos anaerobios se presentan en la Tabla 2.2:

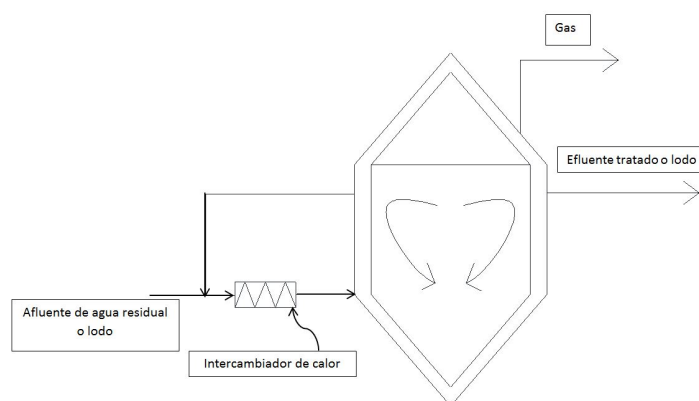


Figura 2.4: Esquema general de un bio-reactor anaerobio (Romero, 2004)

Proceso	Descripción	Figura
Digestión Anaerobia	Se usa para la estabilización de las partículas de materia orgánica. En este método se realiza una buena mezcla con separadores de líquido-sólidos, por lo que el reactor se trata como un tanque reactor continuo agitado. El tiempo de retención hidráulico (HRT) y el tiempo de retención de sólidos (SRT) son idénticos, un valor típico es de 15 a 20 días. El mezclado es realizado mediante mezcladores mecánicos internos y externos que recirculan el contenido del tanque, recirculan el gas o recirculan mediante bombeo el contenido del tanque. El metano producido se quema, se usa para calentar el flujo de alimentación y el contenido del digestor. En el bio reactor se mantiene la temperatura alrededor de 35 °C. Para prever las variaciones en la producción de gas se construyen almacenadores de gas.	
Anaerobio de baja tasa	Son bio reactores que usan una combinación de acumulación y sedimentación de sólidos para incrementar el SRT relativo al HRT. Usualmente se usan cuencas de tierras, aunque envases rectangulares de hormigón han sido también usados. El mezclado se realiza ya sea mediante el afluente de aguas residuales o por evolución del gas, lo cual no provee una buena mezcla, por lo que los sólidos suspendidos se sedimentan y acumulan en el bio reactor. Se usan membranas o materiales similares para atrapar y coleccionar el gas. En este tipo de sistemas no es usual proporcionar calentamiento lo que causa que sea usado para tratar agua residual o asignar un SRT que permita el tratamiento a temperatura ambiente..	

Continúa en la siguiente página



Tabla 2.2 – Continuación de la página anterior

Proceso	Descripción	Figura
Proceso anaerobio de alta tasa	Utiliza una configuración de bio-reactor que provee una significativa retención de biomasa, lo cual resulta en amplias diferencias entre el SRT y HRT. Para retener la bio masa son usados tres mecanismos: 1) Formación de partículas sedimentables que son retenidas mediante sedimentación. 2) El uso de configuraciones de reactor que retengan sólidos suspendidos. 3) Crecimiento de bio películas en la superficie dentro del reactor. En muchos casos, más de un mecanismo está operando en el bio-reactor, en consecuencia los procesos anaerobios de alta tasa contienen mecanismos que van desde crecimiento suspendido a crecimiento adherido. Seis procesos cubren este rango: 1) Contacto anaerobio. 2) Manta anaerobia de lodo con flujo ascendente (<i>Upflow Anaerobic Sludge Blanket, UASB</i>). 3) Filtros anaerobios. 4) Híbrido entre UASB y filtros anaerobios. 5) Película fija estacionaria de flujo ascendente. 6) Lecho fluidizado, lecho expandido.	
Proceso de fermentación de sólidos	Usados para solubilizar la materia orgánica particulada en los sólidos y fermentar los ácidos grasos volátiles, particularmente acético y propiónico. Son usados en procesos de remoción biológica de nutrientes.	

Tabla 2.2: Variantes de los sistemas anaerobios adaptado de Romero (2004)



2.1.4 LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN

Introducción

Al abordar este tema, en primer lugar se establece la diferencia existente entre los términos lagunas de estabilización y lagunas de oxidación. El primero describe la función real del proceso y al mismo tiempo incluye tanto lagunas aerobias y anaerobias. El término lagunas de oxidación fue empleado en el pasado para implicar la oxidación de la materia orgánica, con el oxígeno producido por las algas a través de la fotosíntesis. Este aspecto es sin duda muy importante pero existen otros procesos que intervienen en la degradación de la materia orgánica, como la estabilización por digestión que presenta en lagunas facultativas y es predominante en lagunas anaerobias. El término laguna de estabilización describe a reactores o estanques construidos con tierra, de profundidad reducida, diseñado para el tratamiento de aguas residuales, por medio de la interacción de la biomasa, la materia orgánica del afluente y otros procesos naturales.

La primera laguna de estabilización diseñada para tratar aguas residuales domésticas estuvo localizada en Dakota del Norte, Estados Unidos y fue construida en 1948 desde entonces una gran cantidad de instalaciones han sido construidas en muchos países del mundo (Yanez, 1993).

Existen varios aspectos importantes que no han sido investigados, se considera que este proceso de tratamiento ha sido objeto de suficiente estudio y se han introducido desarrollos en tal forma que el tratamiento de aguas residuales por lagunas de estabilización puede considerarse como uno de los sistemas de tratamiento más importantes sobre todo para países en vías de desarrollo.

En cuanto a condiciones de aplicación, este proceso de tratamiento puede ser utilizado económicamente en sitios en donde el costo de terreno es reducido, en donde las condiciones climáticas, iluminación y la temperatura son favorables, en condiciones de alta carga orgánica con variaciones considerables y, muy en particular en donde se requiera una alta reducción de organismos patógenos (Yanez, 1993). Dentro de los sistemas de tratamiento natural, las lagunas de estabilización son más sustentables que los sistemas electromecánicos, la elección entre uno y otro es la elección entre invertir el dinero en tierra o en electricidad, el cual es un dinero que se va para siempre (Mara, 2009a).

En el pasado las lagunas de estabilización se diseñaban de acuerdo a la experiencia, a los códigos de diseño y a investigaciones realizadas por dos pioneros que fueron Oswald en Estado Unidos y en Marais en Sur Africa. Desde la segunda mitad de los 70 se inició con el uso de lagunas de estabilización en Francia y Alemania, en la actualidad se realizan amplios programas de investigación en algunas universidades entre los que tenemos:

- ✓ Universidad de California en Estados Unidos
- ✓ Universidades en Paraíba y Minas Gerais en Brazil
- ✓ Univalle en Colombia
- ✓ Universidad Flinders en Australia



- ✓ AIT en Tailandia
- ✓ Universidad Massey en Nueva Zelanda
- ✓ Universidad de Montpellier I y II en Francia
- ✓ Universidades en Leeds en Inglaterra
- ✓ Así como también se han realizado conferencias internacionales y varias guías de diseño, manuales y libros.

Por tanto se ha mejorado la comprensión del funcionamiento de las lagunas facultativas en climas templados, así como un amplio entendimiento de la hidráulica de las lagunas (Mara, 2009b).

Según Mara (2009a), el futuro de las lagunas de estabilización es bueno, ya que es necesario implementar estos sistemas a una escala más amplia, sugerida por la opinión pública que la natural es mejor que lo electromecánico. Debido a la escasez del agua el uso de almacenaje de agua residual y de reservorios de tratamientos de aguas residuales deben ser usados a una escala más amplia. El reuso sería importante para dar de beber a los 2.5 billones de personas que vendrán en los próximos 25 a 30 años y es una camino extremadamente fiable para asegurar el futuro de la producción de comida.

En el presente existen en Francia más de 2500 lagunas de estabilización, en Alemania aproximadamente 3000 y en Estados Unidos alrededor de 7000 (constituyendo éstas un tercio de la totalidad de plantas de tratamiento de aguas residuales(Mara, 2009b)).

Clasificación de lagunas

Existen varias formas de clasificar lagunas:

De acuerdo con el contenido de oxígeno

- ✓ Anaerobias:
 - Utilizadas preferentemente para pre tratamiento de desechos industriales y domésticos con un elevado aporte industrial, reduciendo las concentraciones de compuestos tóxicos o inhibitorios presentes.
 - Son estanques de mayor profundidad, 2.5 a 5 m y reciben cargas orgánicas más elevadas de modo que la actividad fotosintéticas de las algas es suprimida, encontrándose ausencia de oxígeno en todos sus niveles.
 - La laguna actúa como un digestor anaerobio abierto o cerrado y sin mezcla.
 - Debido a las altas cargas orgánicas que soporta, el efluente contiene un alto porcentaje de materia orgánica y requiere de otro proceso complementario de tratamiento.
- ✓ Aerobias o de alta producción de biomasa: también son referidas como fotosintéticas
 - Son estanques de profundidad reducida (0.3 a 0.45 m) lo que permite la penetración de la luz hasta el fondo.



- Diseñadas para una máxima producción de algas con cortos períodos de retención
 - Se mantienen condiciones aerobias a todo nivel y tiempo.
 - La reducción de materia orgánica es provocada por la acción de organismo aerobios.
- ✓ Facultativas:
- Existe comensalismo entre algas y bacterias en el estrato superior.
 - Descomposición anaerobia de los sólidos sedimentados en el fondo.
 - Su ubicación como unidad de tratamiento en un sistema de lagunas puede ser: como laguna primaria única o como unidad secundaria después de lagunas anaerobias o aereadas.
- ✓ Si el oxígeno es suministrado artificialmente con aereación mecánica o aire comprimido se denominan lagunas aereadas. Existen cuatro tipos de unidades explicadas a continuación, todos ellos con el propósito fundamental de reducción de compuestos orgánicos.
- La laguna aereada de mezcla completa o biomasa en suspensión tiene una alta densidad de energía y la presencia de alga no es aparente.
 - Laguna aereada facultativa es frecuente en climas cálidos y consiste en un estanque con aereación y una densidad de energía más baja que la anterior para suspender la biomasa en suspensión parcial. En este tipo de unidad la producción de oxígeno por fotosíntesis juega un papel muy reducido y todo el oxígeno necesario es abastecido por aereadores.
 - Laguna facultativa con agitación mecánica es un estanque del tipo facultativo en el que se ha instalado un mecanismo de mezcla con baja densidad de energía, en esa situación el oxígeno necesario para la estabilización de la materia orgánica es abastecido vía fotosíntesis. Este tipo de laguna es aplicable en climas cálidos, con muy poco viento, en donde el mecanismo de agitación sirve para destruir la estratificación termal.
 - Laguna de estabilización aereada, en la cual la oxigenación es principalmente vía fotosíntesis, suplementada por la difusión de aire comprimida desde el fondo a través de tuberías y difusores de varios tipos. Estas lagunas se emplean generalmente en climas de cuatro estaciones y la aereación artificial es de mayor utilidad en invierno. Al estar las tuberías de conducción de aire colocados en el fondo no es recomendable permitir la acumulación de lodos, por lo cual se diseñan con cargas bajas, la cual no es atractiva para países en vías de desarrollo.

De acuerdo al lugar que ocupan con relación a otros procesos

- ✓ Primaria o de aguas residuales crudas.
- ✓ Secundarias que reciben efluente de otros procesos de tratamiento.
- ✓ Maduración si su propósito fundamental es reducir el número de microorganismos indicadores. Son unidades netamente aerobias con la función básica de reducir el contenido bacteriano, puesto que la mayor proporción de sólidos, DBO y parásitos ha sido removido en las lagunas primarias o de tipo anaerobio o facultativo.



De acuerdo con la secuencia de las unidades

- ✓ Lagunas en serie: El número de unidades tiene relación primordial con la topografía del terreno y en menor grado con el nivel de calidad requerido en el efluente del sistema. Un ejemplo de laguna en serie se puede ver en la Figura 2.5.

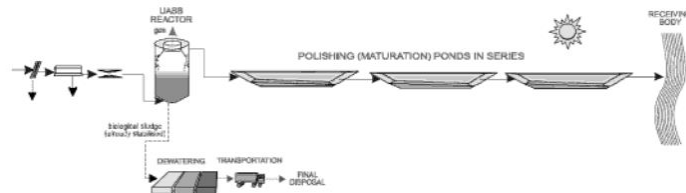


Figura 2.5: Lagunas en serie (Von~Sperling, 2007b)

- ✓ Lagunas en paralelo: El número de unidades tiene relación con otros factores como las etapas de implementación de las unidades, la topografía del terreno y las condiciones de operación y mantenimiento de la instalación (Figura 2.6 A, B y C)

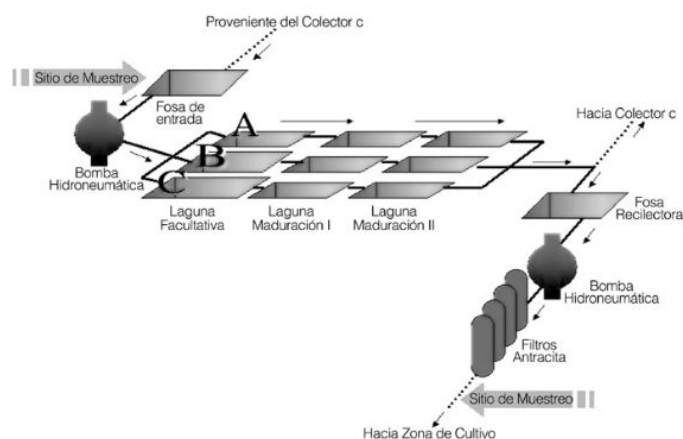


Figura 2.6: Lagunas en paralelo adaptado de Von~Sperling (2007b)

- ✓ Combinaciones de varios tipos.

De acuerdo a las condiciones de descarga

- ✓ Lagunas de descarga continua.
- ✓ Lagunas de retención completa: Llamadas también lagunas terminales, no tiene efluente y el líquido se dispone a través de percolación y evaporación.
- ✓ Lagunas de regulación y descarga controlada: Conocidas también como de flujo intermitente, de regulación o almacenamiento, son diseñadas con propósitos específicos como:
 - Almacenamiento total del líquido durante el invierno.
 - Regulación del caudal previo al re uso agrícola.



- Reducción de microorganismos.

Estas lagunas son en resumen, las últimas unidades de una serie y su función básica es la de almacenar agua residual tratada antes del re uso agrícola.

Durante los períodos de llenado, almacenamiento y vaciado, estas unidades reducen el contenido bacteriano con una tasa de mortalidad neta similar a la presente en lagunas de maduración.

De acuerdo con la función específica

- ✓ Lagunas para la reducción de compuestos orgánicos: El término lagunas para la reducción de organismos patógenos es más amplio y completo que el término lagunas de maduración puesto que la reducción de organismos patógenos ocurre en todas las unidades de una secuencia de lagunas.
- ✓ Lagunas para la reducción de organismos patógenos.
- ✓ Lagunas para criterio múltiples de calidad del efluente.



2.2 LAGUNAS FACULTATIVAS

2.2.1 INTRODUCCIÓN

Las lagunas facultativas son las variantes más simples del sistema de lagunas de estabilización. Básicamente, el proceso consiste en la retención de agua residual por un período de tiempo suficientemente largo para que se den los procesos naturales de estabilización de materia orgánica. Por la tanto, las principales ventajas y desventajas de las lagunas facultativas son las relacionadas principalmente a los fenómenos naturales.

El proceso de las lagunas facultativas es necesariamente natural y no necesita ningún equipo. Por esta razón, la estabilización de la materia orgánica se realiza a un ritmo lento, implicando la necesidad de un tiempo de retención alto (usualmente mayor a 20 días); sin embargo, existen experiencias exitosas en lagunas de estabilización secundarias con periodos de retención de pocos días.

Ventajas de las lagunas facultativas:

- ✓ Tienen una alta simplicidad operacional y confiabilidad.
- ✓ Los procesos naturales son por esencia confiables en el sentido que no hay equipos en riesgo de fallar o que requieran régimen especial de operación.
- ✓ La construcción es simple e involucra principalmente trabajos con el terreno y el costo operacional es mucho menor que en otros métodos de tratamiento.

Desventajas:

- ✓ La naturaleza es lenta y necesita grandes tiempos de retención para que las reacciones sean completadas lo cual implica grandes requerimiento de terreno.
- ✓ La actividad biológica es en gran parte afectada por la temperatura. Esto podría ser considerado una ventaja en lugares de clima cálido.
- ✓ La eficiencia de remoción de materia orgánica es menor en comparación con otras tecnologías de tratamiento.
- ✓ En comparación con otras tecnología, las lagunas facultativas son menos eficientes para la remoción de nutrientes.

2.2.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

Durante el tiempo de permanencia del agua residual, el cual toma varios días, una serie de mecanismos contribuyen a la purificación del agua. Estos mecanismos ocurren en tres zonas de las lagunas, denominadas:

- ✓ Zona anaerobia: La materia orgánica suspendida (partículas DBO) tiende a sedimentar, constituyendo los lodos en el fondo de la laguna (zona anaerobia). Este lodo es sometido



a un proceso de descomposición por organismos anaerobios, siendo lentamente convertido en dióxido de carbono, metano y otros. Después de un cierto período, prácticamente sólo la fracción inerte (no biodegradable) permanece en la capa de fondo. El sulfuro de hidrógeno generado no causa problemas de mal olor ya que se oxida por procesos químicos y bioquímicos en la capa aerobia superior.

- ✓ Zona aerobia: La materia orgánica disuelta (DBO soluble), junto con una pequeña cantidad de materia orgánica suspendida (partículas finas de DBO) no se sedimentan y permanecen dispersadas en la masa del líquido. En la capa superior una zona aerobia está presente. En esta zona, la materia orgánica es oxidada por respiración aerobia. Se requiere oxígeno, el cual es suministrado al medio por la fotosíntesis realizada por las algas, hay un balance entre el consumo y producción de oxígeno y dióxido de carbono (Figura 2.7).

Bacterias	Algas
Respiración	Fotosíntesis
Consumo de oxígeno	Producción de oxígeno
Producción de CO_2	Consumo de dióxido de carbono

Tabla 2.3: Respiración y Fotosíntesis (Von Sperling, 2007b)

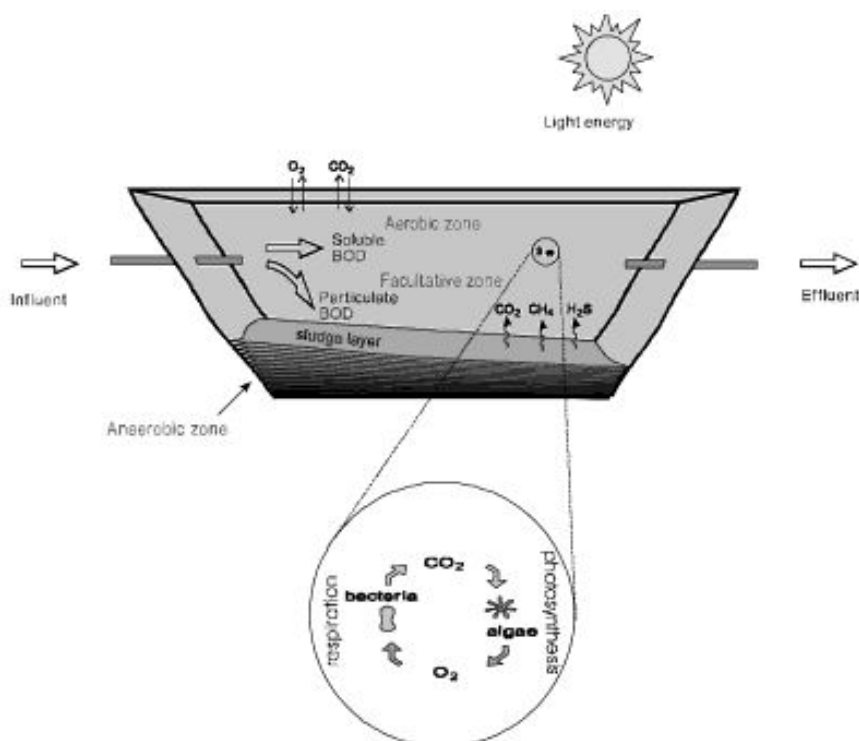


Figura 2.7: Principio simplificado de trabajo de una laguna facultativa (Von Sperling, 2007b)

Cabe destacar que las reacciones de la fotosíntesis (producción de la materia orgánica (Ecuación 2.3)) y respiración (oxidación de la materia orgánica (Ecuación 2.4)) son similares, pero con reacciones contrarias.



Fotosíntesis:



Respiración:



- ✓ Zona facultativa: Para la aparición de la fotosíntesis, es necesario una fuente de luz, en este caso representado por el sol, por esta razón, localidades con alta radiación solar y bajos niveles de nubosidad son favorables para las lagunas facultativas, ya que la fotosíntesis depende de la energía solar, la cual alcanza niveles altos cerca de la superficie de la laguna. En las partes profundas de la laguna la irradiación de la luz es pequeña lo que hace que el consumo de oxígeno (respiración) sea mayor que la producción (fotosíntesis) con la ocasional ausencia de oxígeno disuelto a cierta profundidad. Además que la fotosíntesis ocurre únicamente durante el día, y durante la noche la ausencia de oxígeno puede prevalecer, debido a esto, es esencial que existan varios grupos de bacterias responsables de la estabilización de la materia orgánica, las cuales puedan sobrevivir y proliferar frente a la ausencia de oxígeno. Esta zona donde la presencia o la ausencia de oxígeno puede ocurrir es llamada zona facultativa, esta condición también da el nombre a la laguna (laguna facultativa).

La fotosíntesis, para ser efectiva, requiere una gran área de exposición para el mejor uso de la energía solar por las algas, justificando la necesidad de unidades con grandes áreas superficiales. En consecuencia, el área requerida para las lagunas facultativas es la más grande entre todos los procesos de aguas residuales.

2.2.3 PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DEL EFLUENTE

- ✓ Color verde debido a las algas.
- ✓ Alta concentración de oxígeno disuelto.
- ✓ Alta concentración de sólidos suspendidos.

2.2.4 INFLUENCIA DE LAS ALGAS

Las algas juegan un papel fundamental en las lagunas facultativas. Su concentración es mucho mayor que otra bacteria, dando una apariencia verdosa al líquido en la superficie de la laguna. En términos de sólidos suspendidos secos, su concentración es comúnmente menor a $200 \text{ mg } l^{-1}$, aunque en términos de números puede llegar al rango de 10^4 a 10^6 organismos por ml. La presencia de algas se mide usualmente en forma de clorofila "a", un pigmento presente en todas las plantas, y el principal parámetro para la cuantificación de biomasa de algas. La concentración de clorofila en las lagunas facultativas depende de la carga aplicada y de la temperatura, usualmente esta en el rango de 500 a $2000 \mu g \text{ } l^{-1}$.

Los principales tipos de algas encontrados en lagunas de estabilización son:



- ✓ **Alga verde (Chlorophyta) y Euglenophyta:** Estas algas son las que dan el color verdoso a la laguna. Los principales géneros son: Chlamydomonas, Chlorella y Euglena. Chlamydomonas y Chlorella son usualmente las que aparecen primero, tendiendo a ser dominantes en periodos fríos y poseen flagelos, los cuales les da motilidad (Figura 2.8a).
- ✓ **Cyanobacteria (anteriormente llamada Cyanophyta o alga azul-verde):** Presenta características de bacterias y algas, pero son clasificadas como bacterias. No tienen órganos de locomoción, pero son capaces de moverse por deslizamiento. Los nutrientes requeridos son pocos, pueden proliferar en cualquier ambiente que tenga al menos CO_2 , N_2 , agua, algunos minerales y luz. Estos organismos son típicos en condiciones de bajos valores de pH y baja disponibilidad de nutrientes en aguas residuales. Este ambiente es desfavorable para las algas verdes, las cuales también puede servir como alimento para otros organismos. Entre los principales géneros que pueden ser mencionadas están: Oscillatoria, Phormidium, Anacystis y Anabaena (Figura 2.8b).



(a) Alga Verde



(b) Cyanobacteria

Figura 2.8: Algas presentes en lagunas facultativas

Otros tipos de algas pueden ser encontrados. Las especies predominantes varían de lugar a lugar e incluso con la posición en la serie de laguna. Durante la fotosíntesis, las algas producen la materia orgánica necesaria para su supervivencia, convirtiendo la energía de la luz en energía química condensada en forma de comida. Durante las 24 horas del día, ellas respiran, y oxidan la materia orgánica producida y liberan la energía para crecimiento, reproducción, movimiento y otros. El balance entre la producción de oxígeno (fotosíntesis) y el consumo (respiración) favorecen enormemente al primero. De hecho, el alga puede producir alrededor de 15 veces más oxígeno del que consume, conduciendo a un balance positivo de un oxígeno disuelto en el sistema.

Debido al requerimiento de la energía de la luz, muchas de las algas están situadas cerca de la superficie de la laguna, un lugar de alta producción de oxígeno. A medida que desciende la profundidad, la energía de la luz decrece, por lo tanto se reduce la concentración de algas.

La capa superficial es el rango de mayor intensidad de luz. El resto de la laguna es prácticamente oscura. Existe una posición en la profundidad de la laguna, en la cual la producción y el consumo de oxígeno están en equilibrio debido a la acción de las algas y por la descomposición de microorganismos, este punto es llamado oxypausa (Figura 2.9).

Por encima de la oxypausa, las condiciones aerobias predominan, mientras que debajo de esta las condiciones anaerobias predominan. El nivel de la oxypausa varía durante las 24 horas del día, como función de la variación de la fotosíntesis durante este período.

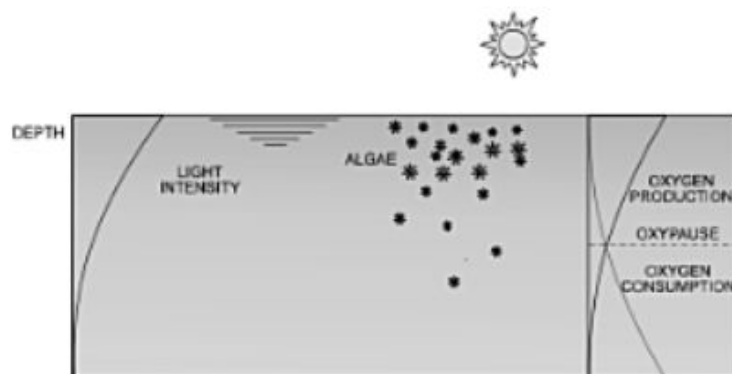


Figura 2.9: Algas, energía de la luz y oxígeno en una laguna facultativa (sección transversal) (Von Sperling, 2007b)

El espesor de la zona aerobia, además de variar durante el día, también varía con las condiciones de carga durante el día. Lagunas con grandes cargas de DBO tienen a tener una capa anaerobia más grande, la cual prácticamente ocupa toda la profundidad de la laguna durante la noche. En la Figura 2.9 esquemáticamente se ilustra la influencia de las condiciones de carga en los espesores de la capa anaerobia.

El pH en la laguna también varía con la profundidad a lo largo del día. El pH depende de la fotosíntesis y de la respiración, de acuerdo a la siguiente lógica (Von Sperling, 2007b):

✓ Fotosíntesis:

- Consumo de CO_2 .
- El ion Bicarbonato (HCO_3^-) del agua residual es convertido a OH^- .
- El pH se incrementa.

✓ Respiración:

- Producción de CO_2 .
- El ion Bicarbonato (HCO_3^-) del agua residual es convertido a H^+ .
- Decrece el pH.

2.2.5 INFLUENCIA DE LAS CONDICIONES AMBIENTALES

Las principales condiciones ambientales en la laguna de estabilización son: *la radiación solar, temperatura y viento*. En la Tabla 2.4 podemos ver estos factores junto con su influencia sobre el sistema.

Mezcla y estratificación termal

El mezclado en una laguna de estabilización ocurre principalmente a través de los siguientes mecanismos: viento y diferencia de temperatura.

El mezclado es importante para el funcionamiento de la laguna debido a los diferentes beneficios:



Factor	Influencia
Radiación Solar	Velocidad de la fotosíntesis
Temperatura	Velocidad de la fotosíntesis Tasa de descomposición bacterial Solubilidad y transferencia de gases Condiciones de mezclado
Viento	Condiciones de mezclado Re aereación atmosférica

Tabla 2.4: Factores ambientales y su influencia en las lagunas Von Sperl (2007b)

- ✓ Minimización de la ocurrencia de cortocircuitos hidráulicos.
- ✓ Minimización de las zonas muertas.
- ✓ Homogenización de la distribución vertical del DBO, algas y oxígeno.
- ✓ Transporte del oxígeno a las capas profundas producidas por la fotosíntesis, en la zona fótica.

Para maximizar la influencia del viento, la laguna no debe estar rodeada por obstáculos naturales o artificiales que puede interrumpir el acceso del viento. Adicionalmente, la laguna no debe tener una forma muy irregular, la cual puede dificultar la homogenización de las áreas periféricas con el cuerpo principal de la laguna.

La laguna también está sujeta a la estratificación termal, en la cual la capa superior (caliente) no se mezcla con la capa inferior (fría). Al ir profundizando en la laguna, hay un punto con una gran disminución de la temperatura acompañada por un alto incremento en la densidad y viscosidad. Este punto es llamado termoclina, así dos capas distintas son formadas, la superficial (baja densidad) y la que se encuentra en el fondo (alta densidad) (Figura 2.10).

El comportamiento de las algas es influenciado por la estratificación de acuerdo a:

- ✓ Las algas no móviles se asientan y llegan a la zona oscura de la laguna, donde ya no producen oxígeno, únicamente consumiéndolo.
- ✓ Las algas móviles tienden a escapar de la capa superior (30 a 50 cm) de una alta temperatura, y forman una densa capa de algas, la cual impide la penetración de la energía solar.

Debido a estos aspectos, en las lagunas estratificadas hay baja presencia de algas en la zona afótica (zona donde no hay procesos fotosintéticos), la cual reduce la producción del oxígeno del sistema y consecuentemente su capacidad de estabilizar la materia orgánica en lugares con poco o ausencia de viento, en la superficie de la laguna puede permanecer estratificada.

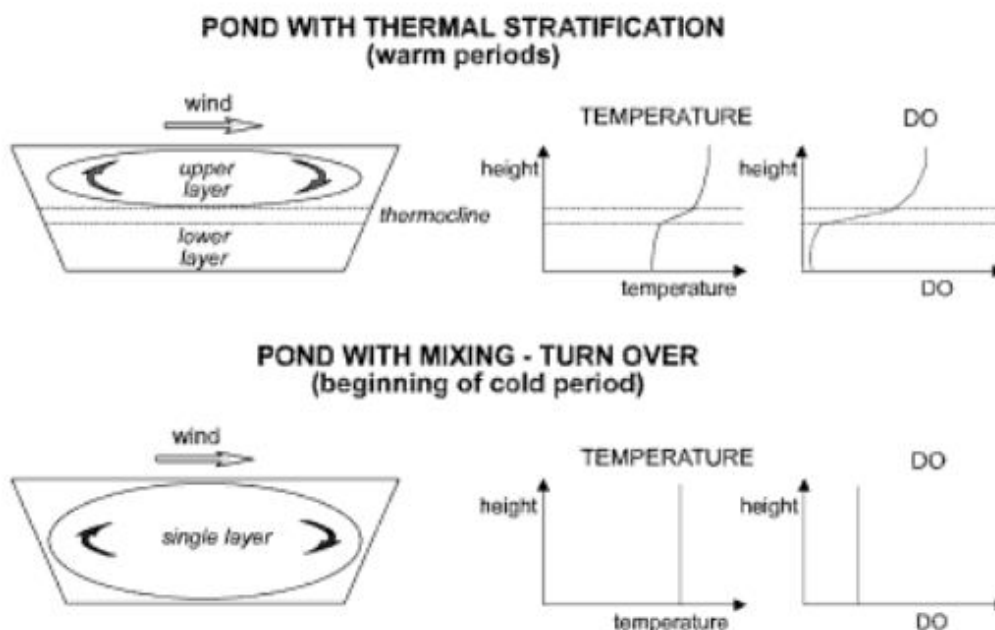


Figura 2.10: Estratificación y mezclado en lagunas Von~Sperling (2007b)

La estratificación puede ser interrumpida por mecanismo de mezcla natural denominados vuelco o inversión termal, en lagos poco profundo como las lagunas de estabilización la mezcla puede ocurrir una vez al día, de acuerdo a la siguiente frecuencia:

Al inicio de la mañana con viento: Mezcla completa. La temperatura es uniforme a través de la profundidad.

Media mañana, con sol, sin viento: Incremento de la temperatura en la capa superficial, por encima de la termoclina. Pequeña variación de temperatura en el fondo (debajo del termo clima), lo cual es influenciado por la temperatura de la tierra, estratificación.

Inicio de la noche, sin viento: La capa encima de la termoclina pierde calor más rápido que la capa del fondo. Si las temperaturas de las capas llegan a ser iguales ocurre la mezcla.

Noche con viento: El viento ayuda en la mezcla de la capas. La capa superior se sumerge y la capa del fondo emerge.



2.3 HIDRÁULICA DE LAGUNAS

2.3.1 INTRODUCCIÓN

El origen natural de los fenómenos que causan la depuración del agua residual en una laguna de estabilización no son fáciles de comprender sobre todo si dichos fenómenos son usados para el diseño de las mismas (Torres y otros, 1999), ya que el diseño de lagunas de estabilización requiere del conocimiento de múltiples disciplinas (Persson y Wittgren, 2003), las cuales son:

- ✓ Ciencias biológicas y ecológicas.
- ✓ Química acuática.
- ✓ Arquitectura del paisaje.
- ✓ Ingeniería hidráulica y de flujo hidráulico.

El grado de eficiencia del sistema es obtenido mediante la interacción compleja de muchos fenómenos físicos y ambientales, característica y calidad de los residuos, pH, viento, cantidad de luz solar, geometría, carga orgánica y patrones de flujo (Dorego y Leduc, 1996). Entre los fenómenos más complejos está la hidrodinámica de la laguna, la cual está influenciada por:

- ✓ Ubicación de la entrada y salida.
- ✓ Climatología y dirección de los vientos.

Además de ser uno de los fenómenos más complejos el entendimiento de la hidrodinámica de la laguna es importante ya que tiene el potencial de mejorar el rendimiento de estos sistemas (Shilton y otros, 2000), debido a que la eficiencia hidráulica y el tiempo de retención son factores fundamentales que controlan el desempeño de las lagunas (Lloyd y otros, 2003).

2.3.2 PATRONES DE CAUDAL Y MEZCLA EN LAGUNAS

Las lagunas constituyen un sistema muy complejo que comprende la existencia de diversas especies microbianas vivientes así como de fenómenos hidráulicos (Polprasert y Bhattarai, 1985). Los tanques o lagunas usados para la depuración del agua residual pueden llamarse reactores. Sus patrones de caudal dependen de las condiciones de mezcla, las cuales a su vez dependen de la forma del reactor, energía de la entrada por unidad de volumen, además de otros factores. Los patrones de caudal afectan el tiempo de exposición para el tratamiento y distribución del sustrato en el reactor.

Los patrones típicos de caudal y mezcla incluyen los reactores discontinuos y los reactores con caudal continuo. Los reactores con caudal continuo pueden clasificarse en:



- ✓ Flujo de pistón.
- ✓ Mezcla completa.
- ✓ Mezcla completa en serie.
- ✓ Flujo disperso.
- ✓ Combinación en serie o paralelo de los anteriores reactores.

Flujo de pistón

Las partículas del fluido entran en el tanque continuamente por un extremo, pasan a través del reactor, para posteriormente ser descargados en el otro extremo, en la misma secuencia que entraron al reactor. Las partículas se mueven como un pistón sin mezcla longitudinal. Las partículas mantienen su identidad y permanecen en el reactor por un período igual al tiempo de retención teórico.

Se produce en tanques con una relación largo/ancho grande, en los cuales la dispersión longitudinal es mínima (Von~Sperling, 2007b).

De una forma simplificada, flujo de pistón es aquel en el cual todo elemento de caudal deja el reactor en el mismo orden en que entró (Mendoza, 2000).

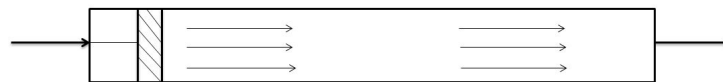


Figura 2.11: Flujo de pistón adaptado de Mendoza (2000)

Mezcla completa

El fundamento teórico supone la existencia ideal de mezcla completa y ello sucede cuando el reactor está expuesto a condiciones muy favorables de viento y ninguna estratificación termal. Las partículas que entran en el reactor son inmediatamente dispersadas por todo el reactor, las partículas de fluido abandonan el tanque en proporción a su población estadística. En términos prácticos la concentración del efluente es igual a la concentración en el reactor (Mendoza, 2000). Los reactores de mezcla completa también son conocidos como CSTR (*Continuos-flow stirred tank reactor*). Como se mencionó anteriormente son reactores idealizados, ya que una dispersión total es difícil de obtener en la práctica (Von~Sperling, 2007b).

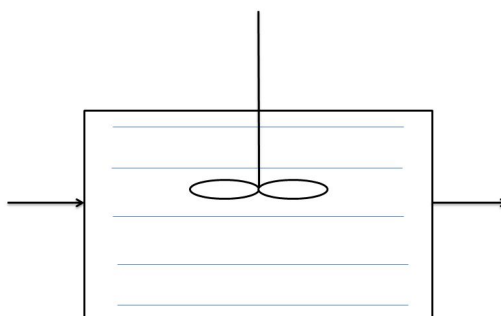


Figura 2.12: Mezcla Completa

Reactor de mezcla completa en serie

Se usa para modelar el régimen hidráulico de lagunas que se encuentran entre el flujo de pistón y el de mezcla completa. Si el sistema está compuesto por un sólo tanque entonces es de mezcla completa, y si el sistema tiene infinito número de reactores en serie, el flujo de pistón es reproducido. Son comúnmente aplicadas en lagunas de maduración (Von~Sperling, 2007b).

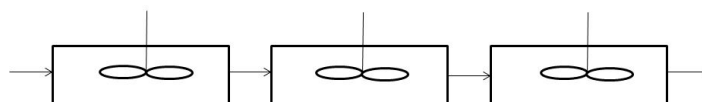


Figura 2.13: Reactor de mezcla completa en serie

Flujo disperso

Flujo disperso o flujo arbitrario es obtenido en cualquier reactor con un grado intermedio de mezcla entre los dos flujos extremos flujo de pistón y el de mezcla completa. Debido a la dificultad de modelar los patrones de flujo, son representados por uno de los dos modelos de flujo hidráulico (pistón o mezcla completa) (Von~Sperling, 2007b).

Se define como aquel en que cada elemento de caudal tiene un tiempo de detención diferente para cada período (Mendoza, 2000).

El factor de dispersión mencionado por Yanez (1993) o número de dispersión (d) en Von~Sperling (2007b), caracteriza las condiciones de mezcla en un reactor, se profundizará más a continuación acerca de este importante concepto.

Dispersión

Es una medida del grado de mezcla, a mayor dispersión menor es la eficiencia de remoción y una gran variación de la misma implica que algunos “paquetes” de agua se moverán rápidamente a través de la laguna mientras otros viajan más lentamente.

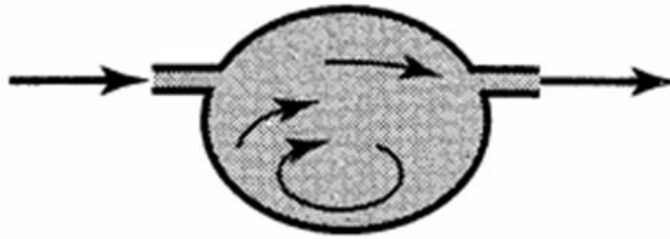


Figura 2.14: Flujo disperso (Levenspiel, 1999)

La segunda ley de Fick (Persson y Wittgren, 2003) define a la dispersión (Ecuación 2.5). Consiste tanto en la difusión molecular y turbulenta, también incluye movimientos de agua en el espacio.

$$\frac{\partial c}{\partial t} = d \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (2.5)$$

El flujo de fluidos no ideal puede ser estudiado mediante la información sobre la distribución por edades de las moléculas de líquido a la salida o por distribución del tiempo de residencia dentro de la laguna. El concepto que fue inicialmente introducido por Dankwerts y posteriormente discutido por Levenspiel, Magelson y Watters, es un método popular para determinar la dispersión ya que toma un enfoque estadístico en la que la moléculas de líquido se “etiquetan” mediante la técnica de estímulo-respuesta (trazadores) (Dorego y Leduc, 1996). Información detallada sobre las pruebas de trazadores se encuentran en la sección 3.3.3.

La inclusión de las características de dispersión en las ecuaciones del diseño podrían producir mejores resultados en la predicción porque describen los fenómenos hidráulicos que ocurren en la laguna, por ejemplo forma del estanque, velocidad del flujo, cortocircuito y dispositivos de entrada y salida. Sin embargo, el uso del modelo de flujo disperso no explica la existencia de zonas muertas o estancadas las cuales reducen el volumen efectivo (o activo) de estanques que tienen bajas relaciones de $\frac{Longitud}{Ancho}$ (por ejemplo estanques sin deflectores) (Polprasert y Bhattacharai, 1985).

El factor de dispersión o número de dispersión d , es igual a la inversa del número de Peclet, que describe la relación entre el transporte por convección y dispersión.

$$Pe = \frac{1}{d} = \frac{U \cdot L}{D} \quad (2.6)$$

$$d = \frac{D}{U \cdot L} = \frac{D \cdot t}{L^2} = \frac{2881 \cdot PR}{L^2} \quad (2.7)$$

Donde:

t_n : Tiempo de residencia teórica o nominal = $\frac{V}{Q}$ [h]

L: Distancia entre dispositivos de entrada y salida [m]



2881: Cortante con unidades $m^2 h^{-1}$

El coeficiente de dispersión (D) está relacionado con los datos geométricos como la longitud y ancho de la laguna, por lo tanto la geometría y el caudal son los principales factores que condicionan la distribución del tiempo de retención (Badrot-Nico y otros, 2009). Se requiere conocer el coeficiente de dispersión "D" para la evaluación del factor de dispersión "d".

D grande: Implica una rápida dispersión de la curva del trazador.

D pequeño: Implica una baja dispersión de la curva del trazador.

D=0: Significa que no hay dispersión, por lo tanto, el flujo es de pistón (Levenspiel, 1999).

Existen una serie de ecuaciones en la literatura para la determinación de el número de dispersión (d) en cuerpos lagunares. A continuación se muestra un resumen de estas ecuaciones adaptadas de Von Sperling (2007b):

Polprasert and Batharai 1993

$$d = \frac{(0.184 \cdot t \cdot v \cdot (B + 2 \cdot H)^{0.489} \cdot B^{1.511})}{(L \cdot H)^{1.489}} \quad (2.8)$$

Agunwamba 1992

$$d = 0.102 \cdot \left(\frac{3 \cdot (B + 2 \cdot H) \cdot t_n \cdot v}{4 \cdot L \cdot B \cdot H} \right)^{-0.410} \cdot \frac{H}{L} \cdot \left(\frac{H}{B} \right)^{-(0.981 + 1.385 \cdot \frac{H}{B})} \quad (2.9)$$

Yanez 1993

$$d = \frac{\left(\frac{L}{B} \right)}{-0.261 + 0.254 \cdot \left(\frac{L}{B} \right) + 1.014 \cdot \left(\frac{L}{B} \right)^2} \quad (2.10)$$

Von Sperling

$$d = \frac{1}{\frac{L}{B}} \quad (2.11)$$

Donde:

L: Largo de la laguna [m]

B: Ancho de la laguna [m]

H: Profundidad de la laguna [m]

t_n : Tiempo de retención nominal [d]

v : Viscosidad cinemática del agua [$m^2 d^{-1}$]

Von Sperling (2007b) propone la siguiente correlación para la viscosidad cinética en función de la temperatura (T) en °C:

$$v = 0.325 \cdot T^{-0.45} \quad (2.12)$$



Cuando d tiende a infinito, el reactor tiende a un régimen de mezcla completa, por otro lado cuando d tiende a cero el reactor tiende a un régimen de flujo de pistón.

Según Levenspiel (1999), se tiene la siguiente descripción de los resultados del número de dispersión:

$d \leq 0.01$: Para valores pequeños de " d ", la dispersión de la curva no cambia significativamente en su forma cuando pasa por el punto de medida, por lo que no altera la varianza de la curva.

$d \geq 0.01$: Para d mayores o iguales a 0.01 la respuesta del pulso es amplia y pasa por el punto de medida suficientemente despacio que cambia la forma (se dispersa) cuando ha sido medida. Para un amplio " d " lo que sucede en la entrada o salida del reactor afecta ampliamente la forma de la curva del trazador.

Volumen efectivo

Hasta ahora el tiempo de residencia bajo flujo estacionario ha sido igual al tiempo de residencia nominal $\frac{V}{Q}$, pero en la realidad esto no sucede, incluso bajo condiciones de flujo estacionario.

El tiempo medio de residencia t_m es siempre inferior que el tiempo de residencia nominal t_n .

Para un mejor entendimiento y discusión entre el tiempo de residencia medio y el tiempo de residencia nominal, se puede multiplicar a los dos por el caudal lo que nos da la relación entre dos volúmenes:

$$e = \frac{\text{Volumen efectivo}}{\text{Volumen Total}} = \frac{t_m \cdot Q}{t_n \cdot Q} \quad (2.13)$$

" e " es la relación de volumen efectivo y está ligada al ancho y largo de la laguna pero también es afectada por factores como el viento (Persson y Wittgren, 2003).

" e " se puede calcular mediante la ecuación 2.14 (Persson y Wittgren, 2003):

$$e = 0.84 \cdot (1 - \exp^{-0.59 \cdot (\frac{L}{B})}) \quad (2.14)$$

Donde:

L: Largo de la laguna [m]

B: Ancho de la laguna [m]

Problemas con el diseño de lagunas

En el campo de la ingeniería sanitaria, la importancia de las características de mezclado, es decir, del cortocircuito, la estabilidad y la dispersión, en términos de eficiencia para el tratamiento de aguas residuales, fue reconocida por Camp hace casi 40 años cuando trabajaba en el diseño de un estanque (Polprasert y Bhattarai, 1985).



Varios autores concuerdan que los patrones de flujo en el interior de una laguna, no son ni de pistón ni de mezcla completa si no intermedio (Dorego y Leduc, 1996; Lloyd y otros, 2003; Persson y Wittgren, 2003), y resultados en campo sugieren una dispersión considerable pero no perfecta como se suele asumir en los diseños o evaluación de las lagunas, ya que al tomar uno u otro flujo no se está tomando en cuenta factores que actúan en la laguna como por ejemplo sedimentación y acumulación de lodos, burbujas de biogas (Peña y otros, 2000). Se puede desviar de los flujos ideales por canalización de fluido, reciclaje de fluido o por la creación de zonas muertas en el reactor, en reactores deben evitar estos procesos ya que bajan la eficiencia de la unidad (Levenspiel, 1999).

La ocurrencia de cortocircuitos en lagunas es la causa de varios problemas tales como la aparición de zonas muertas o estancadas que reducen el volumen efectivo y el área superficial de la laguna, con la posibilidad de problemas de olor en las áreas sobrecargadas (Figura 2.15) (Levenspiel, 1999).

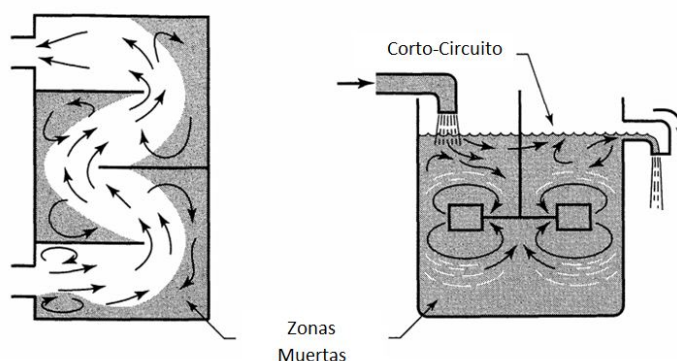


Figura 2.15: Cortocircuitos tomado de Levenspiel (1999)

La reducción de la eficiencia de la laguna es una consecuencia inevitable.

Las corrientes de aguas inducidas por los vientos son las más propensas a la formación de cortocircuitos de lo que propiamente son las posiciones relativas a la entrada y salida. Lagunas con formas irregulares, también contribuyen para la formación de cortocircuitos (Mendoza, 2000).

También existen otros problemas con respecto a que se siguen diseñando sistemas con tiempo de retención nominal ($t_n = \frac{V}{Q}$) en lugar de una estimación del tiempo de retención hidráulico de un modelo físico o matemático, ya que el tiempo de retención nominal no tiene en cuenta cortocircuitos y la consecuente insuficiencia hidráulica (Persson y Wittgren, 2003), lo cual es un factor causal de un mal desempeño en cuanto a su capacidad de tratamiento, debido a que la parte hidráulica está íntimamente relacionada con la eficiencia para tratar las aguas residuales en las lagunas.

En la literatura técnica de Peña y otros (2000); Herrera y Castillo (2000); Lloyd y otros (2003), se presentan varias opciones que pueden servir para mejorar los patrones de flujo en una laguna y disminuir la presencia de cortocircuitos y zonas muertas:

- ✓ Con la remoción de lodos y mejora del régimen de entrada y salida se incrementa la eficiencia de remoción de DBO y SST.



- ✓ Para el diseño hay que tener en cuenta posición de entradas y salidas, y también en general la geometría de la laguna.
- ✓ La colocación de deflectores puede mejorar el funcionamiento de la laguna, no siempre, su uso requiere cuidado y evaluación. Los modelos computacionales de dinámica de fluidos son en este punto de suma utilidad.

También existe aspectos que deben ser tomados al realizar un diseño:

- ✓ Para el diseño hay que tener en cuenta posición de entradas y salidas, también en general la geometría de la laguna.
- ✓ El diseño de un reactor según Wood y otros (1998) depende de:
 - Descripción adecuada de mezcla.
 - Estimación adecuada de la tasa de degradación biológica.
- ✓ La distribución del tiempo de retención real depende de las condiciones meteorológicas locales, si estos son inestables, los regímenes hidrodinámicos son inestables y por ende varios regímenes pueden ocurrir durante el día.
- ✓ El rendimiento de una laguna depende de:
 - Velocidad de reacción de los mecanismos de estabilización en el entorno de la laguna.
 - Del paso del agua residual por el ambiente de la laguna.
- ✓ Las limitaciones en el diseño son el presupuesto y la disponibilidad de terreno, lo que resulta en diseños sub óptimos.
- ✓ Desde el punto de vista hidrológico tres aspectos tienen lugar:
 - Reducir el efecto de re suspensión de sedimentos y erosión.
 - Captar y retener los picos de flujo lo que exige un volumen de retención.
 - Necesidad de un gran volumen lo que incrementa el tiempo de retención.

Como consecuencia es que no hay un tiempo de residencia sino un conjunto de tiempos de residencia.

- ✓ El tiempo de residencia real gastado debe conciliarse con el necesario para alcanzar el grado de tratamiento necesario.

2.3.3 PRUEBA DE TRAZADORES

Introducción

Los estudios de trazadores han sido el método más común para realizar investigaciones sobre el sistema hidráulico en lagunas que podemos encontrar en la literatura de Shilton y Harrison (2002).



La información bibliográfica sobre el uso de trazadores en sistema de agua es muy extensa. A continuación se trata sobre el uso de trazadores colorantes, no se recomienda el uso de trazadores radioactivos por razones de costo y complicación en los métodos de concentración. De los colorantes fluorescentes la Rodamina WT está siendo utilizada con preferencia por sus características no biodegradables y no absorbente en sólidos (Shilton y otros, 2008). A más de existir varios tipos de trazadores, se cuenta con varias formas de aplicación del trazador en la entrada del reactor que se los describe a continuación (Figura 2.16) (Levenspiel, 1999):

Pulso: Cuando se ingresa instantáneamente "Münidades de trazador en el reactor (Figura 2.16a).

Continuo: Se ingresa continuamente la cantidad de trazador en el reactor (Figura 2.16b).

Periódico: El ingreso del trazador en el reactor se lo realiza periódicamente (Figura 2.16c).

Aleatorio: Se ingresa continuamente masa de trazador en la entrada, pero esta varía a lo largo del tiempo (Figura 2.16d).

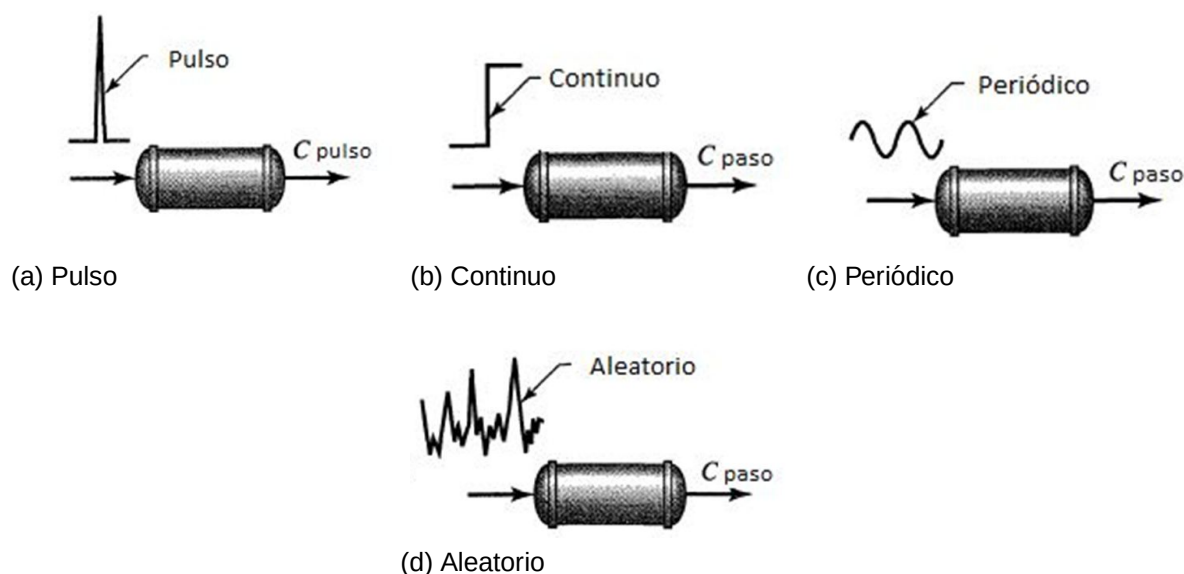


Figura 2.16: Tipos de estímulos en trazadores tomado de Levenspiel (1999)

Definición de trazador

El trazador fluorescente Rodamina WT es susceptible de ser medido con precisión, a bajas concentraciones, permitiendo así el uso de pequeñas con la técnica de estímulo-repuesta (Shilton y otros, 2008). Entre sus propiedades esenciales se encuentran:

- ✓ Solubilidad en agua.
- ✓ Es altamente detectables por su alta fluorescencia.



- ✓ Fluorescentes en una parte del espectro que no es común para materiales generalmente encontrados en el agua lo que reduce el problema de fluorescencia base.
- ✓ Inofensiva en bajas concentraciones.
- ✓ Razonablemente estable en un medio normal de agua natural.

Además de la Rodamina WT ($C_{29}H_{29}N_2O_5Cl_2Na$) existe una serie de variantes, incluyendo Rodamina B ($C_{28}H_{31}ClN_2O_3$) que es considerablemente más barata que la Rodamina WT, pero tiene la desventaja de una mayor tendencia a adsorber los sedimentos transportados por el agua y otras partículas que no pueden comportarse de la misma manera hidráulica que el agua en estudio (Shilton y otros, 2008).

La Rodamina WT ha sido producido específicamente para el ensayo de trazadores, aunque todavía tiene una ligera tendencia a ser adsorbida y su fluorescencia varía con la temperatura y con la conductividad. Su núcleo de xanteno es fuertemente fluorescente en el espectro visible y las longitudes de onda que corresponden al estímulo máximo y a la intensidad de emisión, esto hace que la Rodamina WT sea fácilmente detectable con equipos fluorométricos de costo relativamente bajo.

Generalidades

Un estudio de trazadores consiste en añadir el trazador a la entrada de la laguna y luego medir su concentración a la salida de la misma durante un período de tiempo.

Graficando la concentración del trazador a la salida del sistema de la laguna contra el tiempo transcurrido desde el momento en que fue añadido; crea una curva de distribución de tiempo de retención hidráulica. Un ejemplo del resultado de un estudio de trazadores realizado en una laguna de laboratorio se muestra en la Figura 2.17 (Shilton y Harrison, 2002).

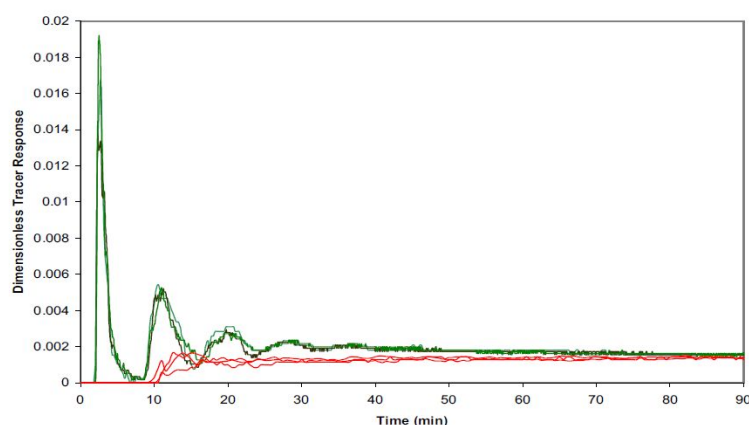


Figura 2.17: Ejemplo de las curvas de tiempo de retención hidráulica en pruebas de laboratorio (Shilton y Harrison, 2002)

La forma de las curvas da una idea del funcionamiento de la laguna. En la Figura 2.17 que corresponde a un experimento de laboratorio, las curvas verdes muestran un pico del trazador al llegar a la salida muy rápidamente. El tamaño y la posición de este pico indican que una gran parte del trazador llegó a la salida en un corto periodo de tiempo. Esto



representaría un caso grave de cortocircuito. Las curvas rojas, que son de un experimento con una configuración de entrada vertical, no presentan el mismo patrón. En particular, el gran pico del inicio no aparece. Esto es claramente una mejora e implica una mayor eficiencia de la laguna (Shilton y Harrison, 2002).

Del ensayo de trazadores se puede determinar los siguientes parámetros:

- ✓ Tiempo medio de retención (t_m).
- ✓ Factor de dispersión adimensional (d).
- ✓ Tiempo para el inicio de un cortocircuito.
- ✓ Método de dos fases.
- ✓ Tiempo del 10% y 90% (fracciones t_{10} y t_{90}) de la descarga de los trazadores (Shilton y Harrison, 2002).

En las Tablas 2.5 y en 3.3 tomadas de CEPIS (1994), se indica las clases de trazadores existente con sus características y métodos de detección.

Procedimiento

Paso 1: Cálculo la cantidad requerida de trazador

El mejor punto de partida de este proceso consiste en adquirir experiencia en la medición del trazador. Luego dar una idea de las concentraciones más bajas que pueden medirse con precisión. Si se asume que el trazador añadido a la laguna se mezcla totalmente, puede volverse a calcular la cantidad de trazador que se debe agregar al volumen total de la laguna para garantizar que la concentración de trazador en el efluente se encuentra dentro del rango que se puede medirse con precisión.

La cantidad de trazador a dosificarse tiene relación con los siguientes factores:

Nivel mínimo del método de detección: El nivel de detección mínimo es una característica del aparato de detección. El análisis de Rodamina es efectuado por fluorómetros. El nivel mínimo de detección de fluorómetros simples utilizados en las décadas de los 70 y 80 están en el orden de 2 a 3 $\frac{\mu g}{l}$. En la actualidad es factible conseguir a un costo relativamente bajo, fluorómetros con niveles de detección por debajo de 0.5 $\frac{\mu g}{l}$.

Dosificación continua o instantánea: En general se emplea dosificación continua para calibración de mecanismos de medición como canaletas Palmer-Bowlus y vertederos. La dosificación instantánea, en cambio, es usada para el estudio de las características hidráulicas de reactores.

Tipo de reactor y grado de mezcla

Duración de la prueba: Lo que se busca es:



Trazador	Sistema	Método de detección
Cloruro de Sodio	Lagunas (escala laboratorio)	Titulación
Rodamina WT (20%)	Lagunas (piloto y campo)	Fluorómetro
Rodamina WT (20%)	Lagunas (escala campo)	Fluorómetro
Rodamina WT	Lagunas aereadas	Fluorómetro
Pontacyl pink B	Agua	Colorímetro
Fluoresceína	Agua	Colorímetro
Rodamina B	Agua	Colorímetro
Fluoresceína	Tanques de sedimentación	Colorímetro
Rodamina B	Tanques de cloración	Fluorométrico
Rodamina WT	Ríos-lagunas aereadas	Fluorómetro
Rodamina B	Ríos	Fluorómetro
Rodamina WT	Ríos (reaereación)	Fluorómetro
Tritio (3H)	Ríos (reaereación)	Contador
Kriptón-85	Ríos (reaereación)	Contador
Tritio (3H)	Ríos -mar-aguas subterráneas	Contador
Bromo (82Br)	Filtros biológicos	Contador
Bromo (82Br)	Emisario submarino	Contador
Tintura orgánica azul	Canales de laboratorio	Fotográfico
Hierro (59Fe)	Lodo de sedimentador	Contador
Rodamina WT	Reservorios	Fluorómetro
Bromo (82Br)	Aforos de ríos	Contador
K Br (82Br)	Calibración de Parshall	Contador
Na I (131I)	Dinámica de lagos	Contador
Bromo (82Br)	Conecciones ilícitas en alcantarillados	Contador
K Br/NH4Br (82 Br)	Difusión en emisario submarino	Contador
Kriptón-85	Estudio de capacidad asimilativa de ríos	Contador
Na Br (82Br)	Estudio de capacidad asimilativa de ríos	Contador
Tritio (3H)	Estudio de capacidad asimilativa de ríos	Contador
Bromo (82Br)	Lagunas (macala campo)	Contador
Varios radioactivos	Varios usos	
Varios colorantes	Varios usos	Fluorómetro
Varios colorantes	Varios usos	Fluorómetro

Tabla 2.5: Información sobre trazadores en sistemas de agua (CEPIS, 1994)



Tipo de colorante	Gravedad específica	Longitud de onda m		Concentración %	Costo Relativo de la Rodamina WT
	a 20 °C	Absorción Máxima	Emisión Máxima		
Rhodamina WT	1.19	559	582	20	100
Rhodamina BA	1.03	556	579	40	60
Rhodamina BA	1.03	556	579	30	60
Rhodamina B	1.12	556	579	40	60
Pontacyl Rosado	polvo	566	590	polvo	400
Rhodamina		553	575	20	40

Tabla 2.6: Características de los trazadores colorantes más comunes (CEPIS, 1994)

- ✓ El tiempo necesario para alcanzar condiciones de equilibrio en dosificación continua de 10 a 15 minutos.
- ✓ Por lo menos el período de retención teórico de la laguna.

El cálculo de la cantidad de Rodamina WT necesaria para una dosificación puntual en una laguna de estabilización de aguas residuales puede aproximarse partiendo de un nivel mínimo de detección al final de la prueba y una relación entre la concentración mínima de detección del fluorómetro C_{min} y la concentración idealizada C_o de alrededor 8, de acuerdo con los datos de Mangleson y Reynolds (Yanez, 1993) .

La concentración idealizada de Rodamina (C_o) en el reactor al inicio de la prueba se define con las siguientes fórmulas:

$$C_o = Kr \cdot C_{min} \quad (2.15)$$

La densidad δ de la solución es:

$$\delta = \frac{M}{v} \quad (2.16)$$

Tenemos que la masa de trazador en la laguna tiene que ser igual a la masa de trazador que tenemos en la solución, en ambos casos son masas puras de trazador.

$$\text{Masa de trazador en la laguna (pura)} = C_o \cdot V \quad (2.17)$$

De la Ecuación 2.16, obtenemos la masa de solución de trazador:

$$M = \delta \cdot v \quad (2.18)$$

La masa de trazador puro es:

$$\text{Masa de trazador en la solución (pura)} = P \cdot v \cdot \delta \quad (2.19)$$



Igualando las ecuaciones (2.17) (2.19) y despejando v obtenemos:

$$v = \frac{Kr \cdot C_{min} \cdot V}{1000 \cdot P \cdot \delta} \quad (2.20)$$

En donde:

C_o : Concentración idealizada de Rodamina, en el reactor al inicio de la prueba [$\mu g \ l^{-1}$]

M : Peso de la Rodamina en la solución al P (%) [g]

C_{min} : Nivel mínimo de detección del trazador, al final de la prueba [$\mu g \ l^{-1}$]

V : Volumen de la laguna [m^3]

Kr : Relación $\frac{C_o}{C_{min}} = 8$ para Rodamina WT en lagunas

P : Porcentaje de Rodamina en la solución líquida, fracción decimal (usualmente 0.2)

δ : Densidad de la solución de Rodamina [$g \ ml^{-1}$]

v : Volumen de la solución de Rodamina usada [ml] (Yanez, 1993)

El valor e Kr puede variar dependiendo de la forma de la laguna. Para lagunas alargadas que pueden presentar un comportamiento tendiente a flujo a pistón el valor puede ser reducido a 5.

Paso 2: Adición de trazador y toma de muestras

En lugar de añadir directamente la solución es mejor mezclarla en contenedores de 10-20 litros con agua de la laguna. Esto reduce al mínimo cualquier pequeña variación de temperatura o densidad entre el trazador y el agua la laguna. La molécula del trazador es mayor que la molécula de agua y, si bien seguirá siendo así en suspensión en un flujo razonable puede tender a hundirse lentamente si se añade una alta concentración en un flujo lento.

El trazador se debe agregar de manera que sea representativo del flujo de entrada a la laguna.

Simplemente verter el trazador cerca de la entrada no es realmente exacto. Para tuberías horizontales sumergidas entre lagunas se ha añadido el trazador a través de un tubo flexible pequeño insertado en el interior de la entrada de la tubería más grande.

En lagunas que cuentan con una zona de mezcla antes de la tubería de entrada, esta zona es ideal para el vertido del trazador.

La toma de muestras puede hacer uso de un fluorómetro de campo con muestreo automático y registro de datos (sin embargo, estos instrumentos son relativamente caros en torno a \$ US 25,000) o, sencillamente mediante el uso de un muestreador automático para recoger muestras que sean llevadas continuación, analizadas posteriormente. Un monitoreo manual no es recomendable en vista del riesgo de perder muestras especialmente durante los primeros instantes de la prueba (antes de presentarse el primer pico de la curva de concentración del trazador). Los muestreadores automáticos en este sentido son altamente recomendables.

Normalmente se toman muestras por lo menos durante un tiempo igual a tres tiempos teóricos de retención “para que la mayor parte del trazador sea recuperado”.



Nota: Es importante asegurarse de que todo el equipo sea fiable. Una vez que se añade el trazador se tendrá que esperar mucho tiempo hasta que el trazador sea lavado del medio y una nueva prueba puede ser ejecutada.

Paso 3: Análisis de muestras

Normalmente los fluorómetros tiene que ser calibrado para una longitud de onda de 540nm y una longitud de onda de emisión de 585nm.

Se recomienda hacer una curva estándar (utilizando una serie de diluciones conocidas) para verificar la técnica y los instrumentos, sin embargo, para un análisis cualitativo de la respuesta hidráulica de la laguna, la medición de la concentración real no es verdaderamente necesaria. En este caso, la respuesta relativa es la importante.

La lectura obtenida a partir de un fluorómetro es sensible a la temperatura.

Existen fluorómetros de campo con que realizan medición de temperatura automática y ajuste. En el laboratorio, el control de la temperatura se logra fácilmente, asegurando brindar el tiempo suficiente a las muestras para equalizar la temperatura.

El trazador también ha reportado tener cierta sensibilidad a la luz como precaución se recomienda que las muestras se almacenan en recipientes tapados y, en particular, mantenerse fuera de la luz directa del sol (Shilton y Harrison, 2002).

También se ha visto que a través de la experiencia local y de los estudios realizados por Camargo y Mara (2009) que la materia orgánica tiene influencia sobre los resultados en la prueba de trazadores. Para el efecto se recomienda siempre evaluar la fluorescencia natural del medio antes de iniciar la prueba de trazadores.

Paso 4: Análisis de Datos

Como se mencionó anteriormente, hay varios parámetros que se pueden derivar de los resultados de un estudio de trazadores.

Tiempo de retención: Un parámetro muy común es el tiempo medio de retención, t_m , que se determina como se muestra en la Ecuación 2.21, en donde t es el tiempo desde que se añade el trazador. Además, C es la medida en el tiempo t (las unidades no son importantes) y dt es el tiempo de intervalo entre las muestras.

Para una comparación de los datos de pruebas de trazadores en la escala real, la práctica habitual consiste en calcular t_m y luego dividir todas las mediciones de tiempo por este valor. Esto hace que el tiempo sea adimensional, lo cual es útil cuando los estudios se comparan con diferentes caudales (y por lo tanto los períodos de retención)(Shilton y Harrison, 2002).

El tiempo de retención es representado por el primer momento de la curva C vs t , con respecto al origen, conceptualmente es el centro de gravedad de la curva (Figura 2.18), y está representada por la ecuación 2.21:

$$t_m = \frac{\int t \cdot C \cdot dt}{\int C \cdot dt} \approx \frac{\sum t_{mi} \cdot A_i}{\sum A_i} \quad (2.21)$$

En donde:

A_i : Área de cada forma geométrica, se halla con la ecuación 2.22:

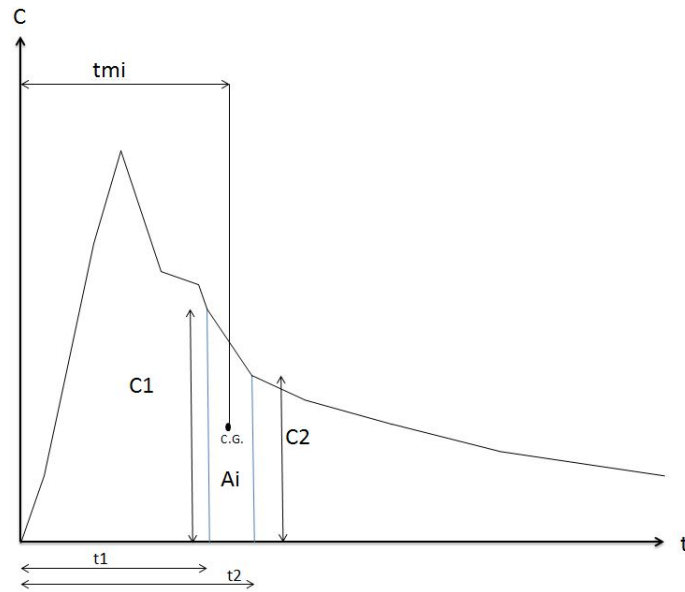


Figura 2.18: Representación geométrica de t_m adaptado de (Yanez, 1993)

$$Ai = \frac{t_2 - t_1}{2} \cdot (C_1 + C_2) \quad (2.22)$$

La Ecuación 2.23 es válida para intervalos de tiempo no constantes. t_{mi} : Brazo de palanca para la curva ascendente o descendente se halla con la ecuación 2.23:

$$t_{mi} = t_1 + \frac{t_2 - t_1}{3 \cdot (C_2 + C_1)} \cdot (C_1 + 2 \cdot C_2) \quad (2.23)$$

Tipos de curvas C vs t

En la Figura 2.19 se observa los tipos de curvas que se pueden presentar en una prueba de trazadores Yanez (2003).



Figura 2.19: Curvas típicas de trazadores (Yanez, 2003)



Curva cuadrada En esta curva se observa que existe una gran concentración de rodamina que sale de la laguna en un corto período de tiempo, este se presenta como un pico pronunciado el cual asciende bruscamente descendiendo posteriormente para ya no volver a subir. Este es una curva característica de una laguna ampliamente cortocircuitada, por lo que no existe un buen régimen de mezcla.

Curva alargada Esta a diferencia de la curva cuadrada, no presenta un único pico, sino más bien, múltiples picos que van apareciendo a lo largo del tiempo, lo que indica que cantidades más o menos constantes de rodamina están saliendo de la laguna. Este tipo de curva nos indica que existe un buen régimen de mezcla en el interior de la laguna.

Factor de dispersión: Se halla a partir de la varianza es su forma adimensional $\sigma\tau^2$. La cual está definida a través del siguiente concepto estadístico (Ecuación 2.24):

$$\sigma\tau^2 = \frac{\sigma^2}{t_m^2} = 2 \cdot d - 2 \cdot d^2 \cdot (1 - \exp^{-\frac{1}{d}}) \quad (2.24)$$

$$\sigma^2 = \frac{\sum t_{mi}^2 \cdot A_i}{\sum A_i} - t_m^2 \quad (2.25)$$

En donde:

$\sigma\tau^2$: Varianza [—]

σ^2 : Varianza de la curva C vs t

d: Factor adimensional ($\frac{D}{U \cdot L}$)

t_m : Período de retención promedio, el mismo que corresponde a la abscisa del centro de gravedad de la curva C vs t

La varianza representa el cuadrado de la dispersión de la curva C vs t, midiendo la concentración del trazador a la salida del reactor, cuya unidad es $tiempo^2$ como lo observamos en la Figura 2.20 (Levenspiel, 1999).

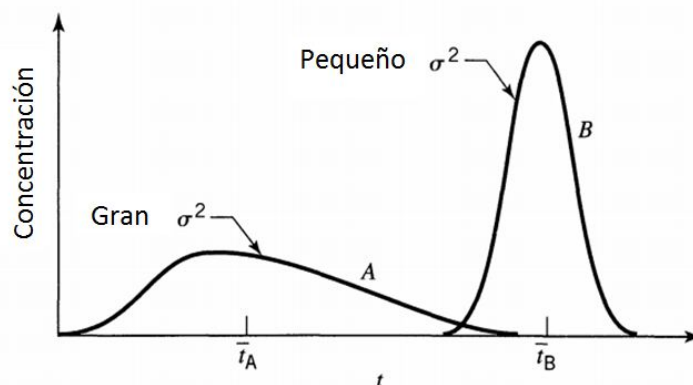


Figura 2.20: Dispersión (Levenspiel, 1999)



% de Rodamina recuperado: De la cantidad total del colorante colocado se requiere recuperar un 80% como mínimo para dar por finalizada la prueba. Para hallar el porcentaje de rodamina recuperada se dedujo de la siguiente forma:

M: Peso de la solución de Rodamina usada [g]

Ws: Peso de la Rodamina en la solución al 20% (g) = $0.2 \cdot M$

La masa recuperada en un intervalo de tiempo (dt), siendo C la concentración a la salida y Q el caudal, tenemos que es igual a $C \cdot Q \cdot dt$.

El porcentaje de rodamina recuperada se calcula como se indica en la Ecuación 2.26:

$$\%recuperado = \frac{C \cdot Q \cdot dt \cdot 100}{0.2 \cdot M} \quad (2.26)$$

Problemas con los estudios de trazadores

Si bien los estudios de trazadores son una herramienta importante de investigación, es importante que las limitaciones y los inconvenientes de esta técnica se expongan claramente, así tenemos:

Recursos: Para hacer un estudio de trazadores correctamente, se requiere un tiempo considerable, gastos y equipos especiales en función del tipo de trazador utilizado.

Tiempo-Repetitividad: Las lagunas tienen flujo de entrada cambiantes. Además, tienen grandes superficies que están expuestas a los cambios de viento constante y las condiciones de temperatura. Los estudios de campo son por lo tanto sólo indicadores del comportamiento hidráulico y de las condiciones que existen durante el período de estudio.

Es muy probable que varias pruebas de trazadores en una laguna tengan alguna variación en los resultados.

Necesidad de una evaluación comparativa: Una vez que un estudio de trazadores se lleva a cabo y se tiene sus resultados ¿Qué realmente nos dice?. Hay una serie de resultados de los estudios de trazadores presentados en la literatura, pero ¿Se está realmente preparado para la investigación de todos estos para una situación particular y si es así para tratar de determinar si está funcionando bien o mal?

Caja Negra de resultados: Los resultados del método de trazadores se pueden representar y se caracterizan de diferentes maneras. Sin embargo, su limitación es que sólo proporcionan una *Caja negra* de resultados. Esta técnica en realidad no muestra el modelo de flujo y mezcla que se está produciendo dentro de la laguna. Esta es sin duda la diferencia categórica entre una prueba de trazadores con un estudio completo con un modelo de dinámica de fluidos.



Influencia de la materia orgánica

En la investigación realizada por Camargo y Mara (2009), en una laguna piloto de maduración fue utilizada Rodamina WT, a fin de determinar la forma en que la materia orgánica en suspensión interfiere en la actuación de la sustancia trazador. Los resultados muestran que la biomasa de algas tiene una fuerte influencia en el comportamiento de Rodamina WT como trazador y por lo tanto las características hidráulicas calculadas de las curvas del trazador puede ser afectada por adsorción del trazador sobre la materia orgánica suspendida. En este sentido se hace necesario la investigación de la fluorescencia natural de un sistema previo a la prueba de trazadores, muy especialmente si el contenido orgánico del medio es alto.

Formación de estándares para calibración de fluorómetro

Solución estándar?

Una estándar es una concentración conocida del trazador que se inyecta. Se utiliza para calibrar el fluorómetro a la sensibilidad deseada. La lectura del estándar en el fluorómetro será comparado con las lecturas de las muestras desconocidas para obtener su concentración. Una concentración conocida se realiza mediante pesaje o medición de una muestra de trazador y diluyéndolo .

En muchos casos, el estándar será una dilución de colorante conocido, no una concentración conocida. Por ejemplo, en las mediciones de caudal sólo interesa cuanto diluye la corriente el trazador, si no cual es su concentración actual. Por lo tanto, no es necesario conocer la concentración del colorante (en partes por billón o de otro tipo) al calibrar el fluorómetro. Se necesita sólo saber el factor de dilución para el estándar y la lectura fluorómetro, que luego se compara con las lecturas de fluorómetro para muestras desconocidas recogidas después de que el trazador ha sido inyectado en la corriente. Esto le permitirá calcular el grado en que se diluye el trazador en la corriente (Design, 1995).

Unidades de medida

Usualmente las concentraciones vienen dadas en microgramos por litro.

Otros estudios se describen en miligramos por metro cúbico mgm^{-3} o partes por billón (ppb).

Cuando se realizan diluciones en cuerpos acuáticos de gran tamaño, se puede asumir una concentración gramos por gramo, equivalente a gramos por mililitro.

La forma más fácil de manejar estas unidades es en notación exponencial:

1.3 gramos disueltos en 100 ml, hace un $0.013\text{ }gg^{-1}$ de solución. En notación exponencial es de $1.3 \cdot 10^{-2}$. Si se diluye 1 ml a 100 ml (100 ml es de 10^2 ml), entonces la nueva concentración es de $1.3 \cdot 10^{-4}$.

Así, los factores de conversión más usados son:

$$1 \frac{\text{gramo}}{\text{litro}} = 1 \text{ parte por mil (ppt)} 10^{-3}$$

$$1 \frac{\text{ml}}{\text{litro}} = 1 \text{ parte por mil (ppt)} 10^{-3}$$



$$1 \frac{\text{miligramo}}{\text{litro}} = 1 \text{ parte por millón (ppm)} 10^{-6}$$

$$1 \frac{\text{microgramo}}{\text{litro}} = 1 \text{ parte por billón (ppb)} 10^{-9}$$

$$1 \frac{\text{miligramo}}{\text{m}^3} = 1 \text{ parte por billón (ppb)} 10^{-9}$$

Linealidad Las lecturas del instrumento para colorantes fluorescentes son proporcionales a la concentración (lineal) desde el más bajo nivel detectable hasta una determinada concentración. Por encima de esta concentración, una curva de calibración multipunto pueden utilizarse para obtener las concentraciones. Luego, en una cierta concentración la curva se aplana y eventualmente baja drásticamente tiene una picada. Esta concentración crítica es una función del compuesto y de la longitud del camino de la celda de flujo o cubeta.

Para efectos prácticos, Rodamina WT es lineal hasta 0,5 ppm (500 ppb, $5 \cdot 10^{-7}$, o $500 \mu\text{g l}^{-1}$). En términos de ingrediente activo (la solución al 20% de Rodamina WT), es lineal hasta 0.1 ppm (100 ppb, $1 \cdot 10^{-7}$, o $100 \mu\text{g l}^{-1}$) (Design, 1995).

Realización de estándares en laboratorio

Para un estándar, se necesita cualquier concentración no supere el rango lineal de su trazador.

Se recomienda preparar una concentración más alta, es decir, alrededor de 0.1 ppm (100 ppb o 10^{-7}) ingrediente activo. A estos altos niveles (altos de fluorescencia), la contaminación es menos problemática.

No debe usarse el agua limpia en la última dilución, siempre debe hacerse dos veces, una en agua destilada, y una en el agua del sistema donde se realizará la medición. Esto debido a que existen sustancias en el agua del sistema que interfieren con la lectura. Esto no sucede a menudo, pero puede invalidar las lecturas si no se toma en cuenta esta fluorescencia natural.



2.4 MODELOS CFD

2.4.1 INTRODUCCIÓN

Como se ha mencionado en el presente documento, el método de las lagunas de estabilización para depuración de las aguas residuales es ampliamente usado, especialmente donde el terreno es barato, ya que es un sistema que requiere un mínimo mantenimiento y control operacional, pero esta simplicidad ha llevado a que muchas de estas instalaciones funcionen a niveles sub óptimos debido a problemas en la hidrodinámica como cortocircuitos y estratificación termal, ya que como se vio en la hidráulica de lagunas el comportamiento hidrodinámico esta íntimamente relacionado con la eficiencia de un reactor (Wood y otros, 1998).

Los métodos antiguos de diseño no toman en cuenta problemas hidrodinámicos (como los cortocircuitos) ni mejoras como deflectores, reposicionamiento de entradas y salidas, esto debido a que las micro interacciones entre fluidos y sólidos, así como las reacciones biológicas son ignoradas. El fracaso de estas técnicas para no tener en cuenta estos procesos ha puesto en riesgo la continuidad del uso de las lagunas de estabilización, esto debido a que el complejo comportamiento dinámico de las lagunas ha desafiado su descripción hidrodinámica mediante procedimientos matemáticos de diseño.

La simulación de la hidrodinámica, en un bio reactor es un factor complejo ya que la laguna esta sometida estocásticamente a diferentes factores ambientales de diferentes tipos como temperatura, pH, precipitación, evaporación, velocidad, dirección del viento y la intensidad de la energía solar, por ende el CFD es una herramienta importante para la comprensión del funcionamiento del proceso y su rendimiento de los sistemas.

El CFD tiene sus inicios a principios del siglo XX, gracias a Richardson, Courant, Friedrichs & Lewy, South Well, Voun Mewman, Lax, Goduna. El uso de los CFD desde finales de los 60 ha crecido constantemente lo que lo ha hecho una parte integral de la ingeniería de diseño y análisis ambiental de muchas empresas por la capacidad de predecir el rendimiento de los nuevos diseños o proceso de operación antes de ser manufacturados o implementados; convirtiéndose en una poderosa herramienta dentro del sector industrial, llegándose a usar tanto como los tradicionales métodos didácticos experimentales de análisis de fenómenos, como para resolver flujos de fluidos (Ojeda y otros, 2009), inclusive a la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) se la considera como una rama de la Mecánica de Fluidos (Mancho, 2007).

Los CFD, se basa en aproximaciones numéricas de las ecuaciones diferenciales que son los más habituales en la física, permitiéndonos obtener aproximaciones numéricas en lugar de tener que desarrollar soluciones analíticas, lo que también es muy importante puesto que permite integrar esta solución en el tiempo, pudiendo obtener una secuencia temporal del estado de las variables que rigen el sistema. En el caso de la simulación física de los fluidos se implementa las ecuaciones de Navier - Stokes, por lo tanto, el objetivo en este sentido, será determinar la velocidad y presión de fluido y su variación a lo largo del tiempo (Perez y Garre del Olmo, 1995).

Los modelos CFD se han empleado en la dinámica de fluidos y se han empleado para modelar la hidrodinámica de las lagunas desde principios de la década pasada en Australia



donde fue propuesta por primera vez. Posteriormente investigaciones en Inglaterra y Nueva Zelanda llegaron a la conclusión que los CFD pueden conducir a resultados muy precisos siempre y cuando se usen modelos calibrados y validados con datos provenientes de lagunas a escala real (Aldana y Bracho, 2005). En conclusión el CFD es una forma alternativa de estudiar y predecir el rendimiento de la lagunas de estabilización basándose en sus características hidrodinámicas, es una poderosa herramienta que permite ayudar en el diseño y en la evaluación de nuevas y existentes lagunas de estabilización (Abbas y otros, 2006; Vega y otros, 2003).

Los modelos computacionales disponibles en el mercado se los indica en el Apéndice A.1 y son comúnmente usados en áreas como se menciona en Abbas y otros (2006):

- ✓ Dinámica de flujos.
- ✓ Hidrología de aguas superficiales.
- ✓ Hidrología de aguas subterráneas.
- ✓ Procesos de sedimentación.
- ✓ Velocidades de flujo en lagos.

En los Apéndices A.2 y A.3, se muestra los problemas de fluidos que los códigos CFD pueden resolver, así como una tabla más detallada sobre las aplicaciones de los CFD en las áreas industrial, ambiental y fisiológico, adicionalmente se han usados CFD para la resolución de problemas en la arquitectura.

2.4.2 GENERALIDADES

Las ecuaciones que rigen el movimiento de fluidos son ecuaciones diferenciales parciales (EPD), el CFD transforma dichas EDP en ecuaciones algebraicas las cuales pueden ser resueltas mediante el uso de las computadoras. Dichas ecuaciones algebraicas se caracterizan por ser no lineales, lo cual hace que sean resueltas mediante procesos iterativos (Kuzmin, 2003) .

Componentes de un ciclo CFD

Los componentes de un ciclo CFD según Kuzmin (2003) son:

Ser humano: Quien plantea el problema.

Conocimiento científico: Modelamiento matemático (Ecuaciones diferenciales) y métodos expresado matemáticamente (Técnicas de discretización y solución).

Código computacional: Encarna este conocimiento y provee instrucciones detalladas (algoritmos)



Hardware: El cual realiza los cálculos.

Herramientas de software: (Solvers, herramientas para el post proceso)

El ser humano: Quien inspecciona los resultados de la simulación.

De este ciclo podemos ver que el ser humano tiene una participación altamente activa en el ciclo de un CFD, participa en la base que es el planteamiento del problema y en la cúspide que es la interpretación de los datos, ambos pasos son cruciales para el modelamiento y para su posterior validación.

Esquema de análisis de un CFD

El esquema de análisis de los CFD se presenta en la Figura 2.21 .

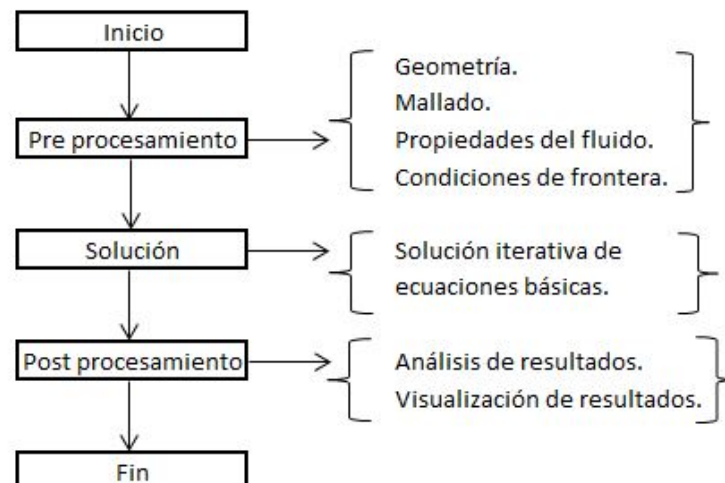


Figura 2.21: Esquema de análisis de los CFD (Moncada y Morales, 2003)

A continuación se describen los pasos del esquema:

Pre-proceso: Es la definición de la geometría que involucra el análisis después de haber definido una zona o volumen de control. Es de importancia vital ya que define los tiempos de cálculo requeridos en zonas de interés particular. Incluye el trazado de malla, separación o grilla (grid).

Solución: Resuelve la ecuaciones básicas en los nodos de la malla establecida para las condiciones de frontera y características del fluido definido. Al ser un proceso iterativo el usuario define el nivel de precisión y la cantidad de iteraciones para una solución confiable.

Post-proceso: Permite “leer” los datos de salida de formas diferentes: matricial o gráficamente (Moncada y Morales, 2003).



Ecuaciones de Navier-Stokes

Las ecuaciones de Navier-Stokes describen y cuantifican el comportamiento de los fluidos (Mancho, 2007). Aunque fueron escritas al principio del siglo XIX nuestro entendimiento de las mismas todavía no ha logrado niveles avanzados, siendo el reto lograr progresos sustanciales hacia una teoría matemática la cual desbloquee los secretos escondidos de estas ecuaciones, debido a que su existencia y regularidad es uno de los más importantes problemas abiertos de la ciencia matemática al comienzo del nuevo siglo (Vázquez, 2004).

Las ecuaciones de Navier-Stokes son (Ashgriz y Mostaghimi, 2002):

Continuidad:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \nabla \cdot (\rho \cdot \vec{V}) \quad (2.27)$$

Momento:

$$\rho \cdot \frac{D\vec{V}}{Dt} = \nabla \tau_{ij} - \nabla p + \rho F \quad (2.28)$$

Energía:

$$\rho \cdot \frac{DE}{Dt} + p \cdot (\nabla \cdot \vec{V}) = \frac{\partial q}{\partial t} - \nabla q + \Phi \quad (2.29)$$

Donde:

ρ : Densidad del fluido

p : Presión

$\vec{V}$: Vector de velocidad del fluido

τ_{ij} : Tensor de esfuerzo de viscosidad

∇ : Operador diferencial= $\nabla = \frac{\partial}{\partial x}i + \frac{\partial}{\partial y}j + \frac{\partial}{\partial z}k$

E : Energía interna

F : Fuerza

q : Término de fuente de calor

Φ : Término de disipación

∇q : Pérdida de calor por conducción

t : Tiempo

En multitud de ocasiones su tratamiento exacto no es factible (Mancho, 2007), por lo se requiere una herramienta con las características del CFD, el cual convierte estas ecuaciones diferenciales en algebraicas utilizando esquemas numéricos adecuados. Se pasa de tener un conjunto de ecuaciones en derivadas parciales sobre un espacio continuo (x, y, z, t) a un sistema finito de ecuaciones algebraicas con variables independientes discretas, las cuales se resuelven en cada uno de los elementos de la malla.



En los pasos intermedios aparecen errores numéricos, además de los de redondeo, debido al uso de un finito número de decimales, que deben tender a cero si se quiere que la solución numérica se asemeje a la real (Ojeda y otros, 2009).

Ecuaciones de Transporte de Especies

A continuación se presentan las ecuaciones que describen el paso del trazador a lo largo del sistema en estudio. En términos generales, el paquete de software utilizados, Fluent (ANSYS, USA) puede modelar el mezclado y transporte de especies químicas mediante la resolución de las ecuaciones de conservación, describiendo fuentes de convección, difusión y reacción para cada especie componente.

Cuando se selecciona resolver las ecuaciones de conservación para especies químicas, Fluent predice la fracción de masa (mass fraction) local de cada especie Y_i , mediante la solución de una ecuación de convección - difusión para la i -ésima especie. La ecuación general de conservación toma la siguiente forma:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \cdot Y_i) + \nabla \cdot (\rho \cdot \vec{V} \cdot Y_i) = -\nabla \cdot \vec{J}_i + r_i + s_i \quad (2.30)$$

Donde:

s_i : Razón neta de producción de la especie i por la reacción química

r_i : Razón de creación por adición de la fase dispersa más cualquier fuente que haya definido el usuario

Y_i : Especie i

$\vec{V}$: Vector de velocidad del fluido

ρ : Densidad

∇ : Operador diferencial nabra= $\nabla = \frac{\partial}{\partial x}i + \frac{\partial}{\partial y}j + \frac{\partial}{\partial z}k$

$\vec{J}_i$: Difusión de la masa, su formulación varía según el flujo sea laminar o turbulento.

En el caso de flujo laminar:

$$J_i = \rho \cdot D_{i,m} \cdot \nabla Y_i \quad (2.31)$$

Donde:

$D_{i,m}$: Coeficiente de difusión para la especie i en la mezcla

En el caso de flujo turbulento:

$$J_i = \left(\rho \cdot D_{i,m} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \cdot \nabla Y_i \quad (2.32)$$

Donde:

Sc_t : Número turbulento de Smith



μ_t : Viscosidad turbulenta

2.4.3 IMPORTANCIA DEL CFD EN LA MODELACION DE LAGUNAS DE TRATAMIENTO

Investigaciones en la literatura técnica como Shilton (2000); Abbas y otros (2006); Salter y otros (2000); Wood y otros (1998, 1995); Shilton y otros (2008) demuestran el gran potencial que poseen los modelos CFD para predecir el régimen hidráulico y ser considerados dignos de estudio, al ser una herramienta que nos permite predecir con fiabilidad los patrones de flujo en una laguna de estabilización y relacionarlos con los resultados del tratamiento, y así entender sus procesos e interacciones. Muchos estudios han reportado problemas hidrodinámicos como causa de la pobre remoción de las lagunas de estabilización en cuanto a contaminantes, especialmente sólidos en suspensión, los patógenos humanos y nutrientes, debido a una insuficiente atención a la optimización del régimen hidráulico en las lagunas (Wood y otros, 1998).

El potencial del CFD, ha permitido reducciones en el costo de la potencia de cálculo, algoritmos mejorados tanto para la solución como para la turbulencia, un desarrollo versátil y fácil de usar, esto ha hecho posible el empleo de los CFD en una cantidad mayor de situaciones de flujo de fluidos además del desarrollo de módulos de reacción biológica de tal forma que se represente ambas facetas del funcionamiento de la laguna (hidrodinámica, biológica). Así el CFD ha dejado de ser de uso exclusivo de laboratorios de investigación para pasar al área comercial, dando a los diseñadores el potencial de explorar el funcionamiento hidráulico de una amplia gama de configuraciones.

El diseño de las lagunas como ya se mencionó requiere de conocimientos multidisciplinarios ya que intervienen diferentes variables físicas, hidrológicas, geométricas y dinámicas para darle una alta eficiencia, el CFD permite la combinación de estos factores para predecir el comportamiento de las lagunas.

Las razones por las cuales se ha incrementado el uso de los CFD en la predicción de los flujos de fluidos son principalmente (Ojeda y otros, 2009; Fletcher, 2006):

- ✓ Los modelos analíticos han reducido su empleo debido a suposiciones, generalizaciones y aproximaciones.
- ✓ Últimos logros en el desarrollo de soluciones numéricas de las ecuaciones Navier-Stokes.
- ✓ Mejora de eficiencia y potencialidad.
- ✓ El tiempo de desarrollo y de entrega del modelo es significativamente reducido.
- ✓ Simulación de condiciones de flujo no reproducibles en pruebas experimentales.
- ✓ Provee mayor detalle e información.
- ✓ Bajo consumo de energía.

Además el uso de los CFD se prefiere a las técnicas tradicionales por las razones que se resumen en la Tabla 2.7:



Experiencia	Simulación
Usa mediciones	Usa software
Se limita el número de experimentos y a un espacio de tiempo.	Alta resolución en el espacio y en el tiempo.
Necesita un modelo a escala en laboratorio.	Se lo realiza para un modelo de flujo real.
Para un número limitado de problemas y condiciones de funcionamiento.	Para cualquier problema y condiciones reales de funcionamiento.
Las fuentes de error se encuentran en la medición y en las perturbaciones en el flujo debido a la sonda.	Los errores se dan por el modelamiento, discretización, iteración y ejecución.
Caro.	Barato.
Lento.	Rápido.
Secuencial.	Paralelo.
Simple propósito.	Multipropósito.
Se dificulta por el transporte del equipo y del material.	Es portable y fácil de usar.

Tabla 2.7: Técnicas tradicionales vs Experimentación (Kuzmin, 2003)

2.4.4 APLICACIÓN

Mediante el modelaje se puede ver la influencia que tienen en la hidráulica de lagunas cambios como la colocación de difusores, cambios en la geometría, acumulación de lodos y cambio en la posición de la entrada y salida y así comparar las eficiencias entre los diferentes sistemas (Shilton, 2000).

El CFD tiene la capacidad de generar la respuesta en las lagunas de una prueba de trazadores, con lo cual se puede saber los tiempos de retención hidráulica mediante el registro de la concentración a la salida de la laguna. Mediante la curva Concentración vs tiempo (C vs t) y aplicando las ecuaciones 2.21 y 2.24 se calcula el tiempo de retención y el número de dispersión, con lo cual se dejaría atrás la suposición de un flujo ideal (piston o mezcla completa) para ir a un flujo real, es decir, "intermedio" como se reporta en la bibliografía técnica.

Los CFD tienen dos funciones en cuanto a situaciones de modelaje (Wood y otros, 1998):

- ✓ Simulación de situaciones experimentales para investigar fenómenos subyacentes.
- ✓ Se basa en la solución de ecuaciones fundamentales (masa, momento y balance de energía), lo que nos sirve para usarlo en situaciones donde son desconocidos los datos, a diferencia de las correlaciones empíricas.

Un ejemplo de aplicación de los modelos CFD a lagunas se presenta en las figuras 2.22, que representan la simulación de una laguna que se encuentra en la localidad de Manawatu en Nueva Zelanda (Shilton, 2000), en la Figura 2.22a se observa el campo de velocidades



resultante de la simulación, así como un cortocircuito en el centro de la laguna, en la Figura A.1b se aprecia la misma laguna pero con un difusor, el cual es una solución para los cortocircuitos. Utilizando el difusor se forma un cortocircuito en la zona de la entrada de la laguna y en la zona de salida se forma una zona muerta, la Figura 2.22c muestra la curva resultado de realizar una prueba de trazadores en la laguna, el pico de la curva C vs t de la laguna con el difusor es menor que la que carece del mismo. Se concluye para este ejemplo que el uso del difusor, ha disminuido la magnitud del cortocircuito, y por lo tanto se ha mejorado el régimen de mezcla mejorando la eficiencia del sistema.

2.4.5 VALIDACIÓN

Como en un cálculo cualquiera los CFD están ligados a supuestos, por lo cual debemos reflexionar acerca de la siguiente expresión en el campo de la computación **“El propósito de la computación no es una visión de números”**, lo que quiere decir que no hay que solo ver los resultados numéricos si no también entender los fenómenos que estamos modelando. Como cita Shilton (2000) debemos asegurarnos de que cualquier aplicación que se realice con el CFD mejore. La comprensión del comportamiento del sistema. Ya que no existe garantía alguna de los resultados que se obtienen en un CFD, los resultados de toda simulación debe ser validados mediante datos experimentales recogidos mediante experimentación, para que así el modelo sea “ajustado”.

Para la validación existen dos métodos:

Método 1: *Medición de velocidades*: (Mediante el uso de una sonda 3-D) en un momento y lugar específico de la laguna. A pensar de ser muy útil para validar el CFD, resulta difícil y demorada conseguir datos representativos es difícil y lleva mucho tiempo.

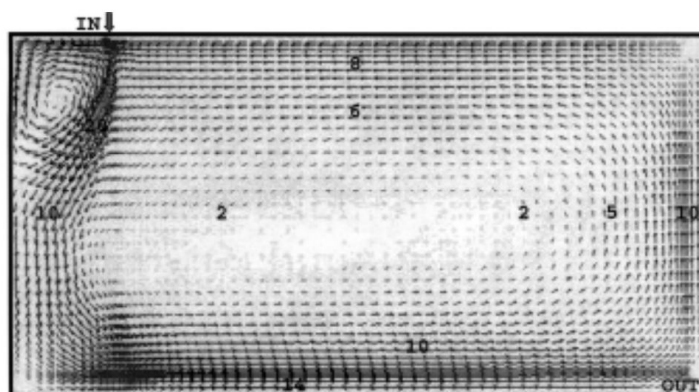
Método 2: *Estudios de trazadores*: Proporciona datos a través de toda la laguna para un intervalo de tiempo. Estos estudios ofrecen una buena indicación del comportamiento del fluido en la laguna, pero no proporciona directamente toda la información a nivel de micro escala.

Existe una gran brecha en la literatura en cuanto a lo referido a la validación de los modelos CFD vs datos experimentales. En la literatura que ha tratado sobre este tema (Shilton y otros, 2008), ha resultado que los datos que predice el CFD con respecto a los modelos a escala son excelentes mientras los resultados con los datos experimentales en campo tiene discrepancias, la diferencia no es debido a una escasa habilidad del CFD para resolver el problema si no a la precisión con la que se definen las condiciones físicas en campo como:

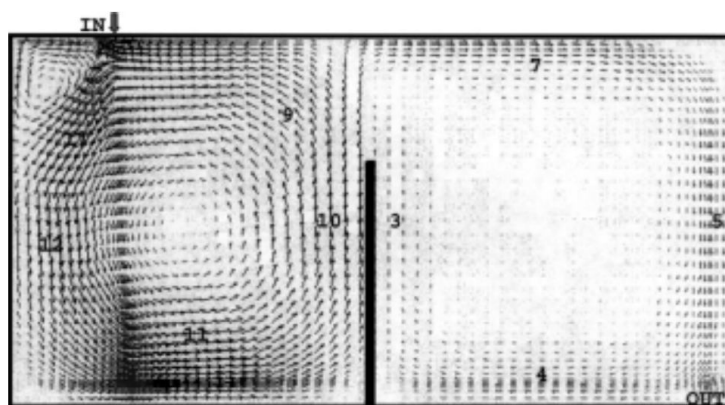
Caudal: La lluvia puede afectar al caudal que circula por la laguna.

Viento: El cual cambia las condiciones de mezcla e influye en el campo de las velocidades.

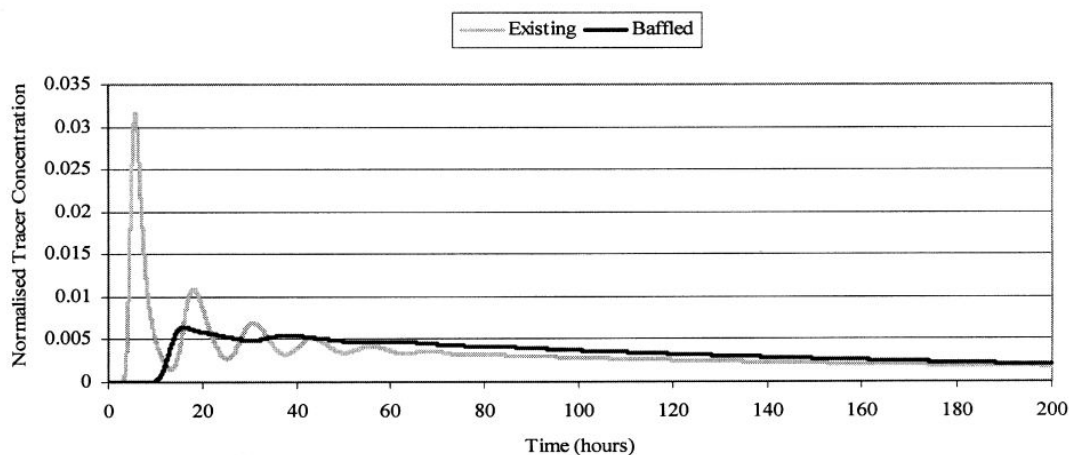
Acumulación de lodos: La cual disminuye el volumen efectivo de la laguna y por ende el tiempo de retención.



(a) Modelo sin difusor



(b) Modelo con difusor



(c) Curva Concentración vs Tiempo para ambos casos

Figura 2.22: Ejemplo de la aplicación práctica de los modelos de CFD a lagunas de tratamiento (Shilton y otros, 2000)

A pesar de que el modelo CFD tiene discrepancias con el modelo a escala real, hay que recordar que el objetivo práctico de un CFD es el de evaluar alternativas. Al respecto existen varios aportes en la literatura especializada como:

Rongonea Llegó a la conclusión de que las incongruencias tuvieron un impacto relativamente limitado en la capacidad del modelo para predecir el rendimiento de la laguna



con razonable exactitud (Shilton y otros, 2008).

Salter Llegó a la conclusión de que al hacer un modelo sencillo sin tomar en cuenta el efecto de la densidad térmica el resultado neto obtenido variaba muy poco (Shilton y otros, 2008).

En conclusión, un aporte detallado de condiciones como acumulación de lodos y entradas transitorias, velocidad de viento y temperatura se conseguirá acercar más al CFD a los datos de campo; sin embargo, si se pretende realizar modificaciones que dan grandes cambios de eficiencia, un estudio comparativo con un modelo simple puede resultar suficiente.

En conclusión, el uso del modelo CFD es una inversión considerable de tiempo, dinero y experiencia y solo se justifica cuando los otros métodos fallan (Wood y otros, 1998).

2.4.6 DISCRETIZACIÓN DEL MODELO CFD EN UNA LAGUNA

Mediante la discretización las ecuaciones diferenciales parciales son transformadas en ecuaciones algebraicas que son resueltas iterativamente. Dentro de la discretización tenemos: Generación de la grilla, Discretización espacial y Discretización del tiempo (Kuzmin, 2003).

Generación de grilla: Mediante la generación de la grilla se descompone el dominio de la laguna en celdas-elementos, se caracteriza por ser el proceso más incómodo y el que consume gran parte del tiempo en el proceso de un CFD.

Antes de generar la grilla se debe tener algún conocimiento sobre el flujo, esto implica tener una idea del lugar donde se generarán zonas especiales como vórtices, zonas muertas y zonas de mayor gradiente de velocidad, etc.

Para la generación de la grilla debemos tomar en cuenta (Ashgriz y Mostaghimi, 2002):

- Forma de los elementos: Se tiene diferentes tipos de elementos que pueden ser usados en la generación de la grilla que son: tetraedrales, prismas y elementos hexaedrales (Figura 2.23).

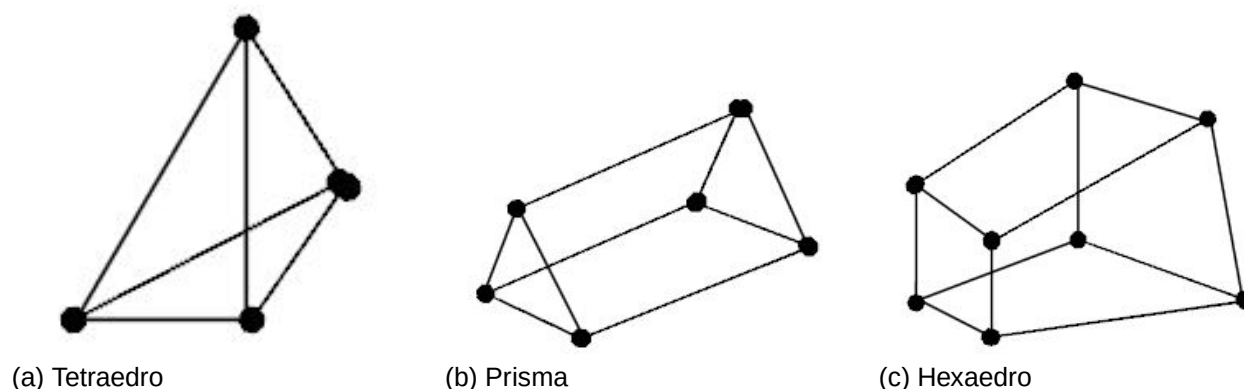


Figura 2.23: Elementos comunes usados en discretización (Ashgriz y Mostaghimi, 2002)



- Refinamiento: Se requiere refinar la grilla en zonas con alta turbulencia, en zonas muertas, el refinamiento se lo realiza mediante el aumento de elementos en estas zonas de la laguna.
- Grilla estructurada: La grilla estructurada se lleva a cabo mediante diferentes métodos, en los cuales se determina las coordenadas de transformación para transformar el espacio no ortogonal y no físico en un espacio computacional ortogonal.
- Grilla no estructurada: Tiene la ventaja de adaptarse a cualquier geometría, el proceso de generación no es completamente automático lo que produce que el usuario mediante una interfaz genere las grillas. Un tipo de común de grilla no estructurada es la que se basa en tetraedros, son fáciles de generar, sin embargo, no tienen mucha exactitud.

Discretización espacial: Se realiza la aproximación de las derivadas parciales para lo cual se emplean métodos como: diferencias finitas, elementos finitos y volúmenes finitos.

Discretización en el tiempo: Aproximación de las derivadas temporales, se realiza un control adaptativo del tiempo de paso o *time-step*.

2.4.7 TURBULENCIA

La turbulencia se caracteriza por un ritmo mayor de transferencia de momento, masa y calor, caracterizada por remolinos o inestabilidades (Macrossan, 2008), es decir, por un movimiento caótico de los fluidos. Para su modelación desafortunadamente no existe un modelo que sea universalmente aceptado para toda clase de problemas, la selección de modelo de turbulencia depende de:

- ✓ Abarcamiento físico.
- ✓ Práctica establecida.
- ✓ Nivel de exactitud.
- ✓ Disponibilidad de recursos.
- ✓ Cantidad de tiempo disponible para la simulación.

Para hacer la selección del método se debe entender las capacidades y limitaciones de cada método. Existen varios modelos de turbulencia, sin embargo el modelo de turbulencia k-eps estándar es sin duda el más utilizado en estudios de hidrodinámica de lagunas.

Modelo de Turbulencia k-E estándar: La familia de modelos de turbulencia k-E son modelos robustos de dos ecuaciones de transporte para la energía cinética (k) y para la tasa de disipación (E) (Blum~Velasco, 2009).

El modelo k-E pertenece a este tipo de modelos de turbulencia y a llegado a ser el "Caballo de batalla" del cálculo práctico de flujo ingenieril, desde que fue propuesto por Launder y



Spalding. Se caracteriza por su robustez, economía y exactitud razonable para una amplia explicación de flujos turbulentos, popular en los flujos industriales y en simulaciones de transferencia de calor.

Es un modelo semi empírico, y su derivación se basa en consideraciones fenomenológicas y empíricas, además en ecuaciones del modelo de transporte para la energía cinética (k) y su tasa de disipación (E), donde k se deriva de la ecuación exacta y E se obtiene de razonamiento físico y tiene poco parecido con su contraparte matemática exacta.

En la derivación del modelo k - E , se asume que el flujo es totalmente turbulento y los efectos de la viscosidad molecular son insignificantes, por lo tanto el modelo es válido en flujo totalmente turbulento.

2.5 DESCRIPCIÓN DE LOS PAQUETES DE SOFTWARE UTILIZADOS

2.5.1 GAMBIT v.2.4

GAMBIT es un paquete de software que permite crear la geometría y la discretización de los modelos de dinámica de fluidos computacional (CFD). Recibe la entrada del usuario por medio de su interfaz gráfica de usuario (GUI). La interfaz gráfica de usuario GAMBIT realiza los pasos básicos de la construcción, discretización, y la asignación de los tipos de zona a un modelo simple e intuitivo, adaptándose a una amplia gama de aplicaciones de modelado. Se elaboró en el presente estudio una descripción detallada de la implementación y análisis de un modelo CFD, para lo cual se incluye en la sección Apéndices A.4. a manera de manual del usuario una descripción detallada del paquete de software GAMBIT.

Para la descripción de esta sección se tomó como referencia el manual de GAMBIT (Fluent Inc., 2004), a más de la experiencia adquirida en la construcción de la geometría y discretización de las lagunas.

2.5.2 FLUENT v.6.3

FLUENT es el programa de mayor preferencia de Dinámica de Fluidos Computacional para una gran variedad de flujos, incompresibles (subsónico), medianamente compresibles (transónico) y altamente compresibles (supersónicos e hipersónicos). En la descripción de las herramienta de este programa se utilizó el manual del FLUENT (Fluent Inc., 2006).

Mediante éste programa podemos obtener soluciones para varios regímenes de flujo, dando un excelente resultado los modelos físicos con flujos laminares y turbulentos, los de transferencia de calor, reacciones químicas y otros fenómenos. La simulación en el FLUENT tiene los siguientes beneficios:

- ✓ Simulaciones en 2D y 3D.



- ✓ Mallado no estructurado (triángulos y cuadriláteros en 2D; tetraedros, prismas y pirámides en 3D).
- ✓ Simulaciones de flujo estacionario o transitorio.
- ✓ Cualquier régimen de velocidad (subsónico, transónico, supersónico e hipersónico).
- ✓ Flujos laminares, turbulentos, no viscosos.
- ✓ Flujos newtonianos y no newtonianos.
- ✓ Amplia variedad de modelos de turbulencia, incluyendo k-epsilon, k-omega, RSM, DES, y LES.
- ✓ Transferencia de calor incluyendo convección natural, forzada o mezclada; transferencia de calor conjugada sólido/fluido; radiación incluyendo radiación solar.
- ✓ Mezclado y reacción de especies químicas, incluyendo modelos de combustión homogénea y heterogénea y modelos de reacción/deposición en superficies.
- ✓ Modelos multifase y de superficie libre, incluyendo transferencia de calor y reacciones químicas.
- ✓ Cálculos de trayectorias Lagrangianas para fase dispersa (partículas, gotas, burbujas), incluyendo modelos para sprays y películas delgadas.
- ✓ Modelos de cambio de fase para aplicaciones de solidificación y fundición, modelo de cavitación y modelo de vapor húmedo.
- ✓ Medio poroso con permeabilidad no isotrópica, resistencia inercial, conducción de calor en sólidos, y opción para calcular velocidades intersticiales.
- ✓ Modelos para ventiladores, radiadores e intercambiadores de calor.
- ✓ Capacidad de mallado dinámico para modelar flujo alrededor de objetos que se mueven durante la simulación.
- ✓ Marcos de referencia inercial (estacionario) o no inerciales (rotación o aceleración).
- ✓ Múltiples marcos de referencia y opciones de malla deslizable.
- ✓ Modelo de mezclado en planos para interacciones rotor-estator.
- ✓ Conjunto de herramientas para modelaciones aeroacústicas.
- ✓ Términos fuente volumétricos para masa, momentum, calor y especies químicas.
- ✓ Base de datos de propiedades de materiales.
- ✓ Módulos adicionales para celdas de combustible, magnetohidrodinámica y modelamiento continuo de fibra.
- ✓ Amplia capacidad de personalización a través de funciones definidas por el usuario (programación).



De la misma manera que para el software GAMBIT, para efectos didácticos, se elaboro en el marco de la presente tesis, una descripción detallada del paquete de software FLUENT que será un aporte para futuros estudios de modelos CFD. Al respecto se encuentra en el Apéndice A.5, la descripción detallada del mismo.

Incertidumbre y Error

Para que los resultados del CFD sean confiables se debe tomar cuenta el grado de incertidumbre y el grado de repercusión de los errores (Kuzmin, 2003). Se requiere realizar un reconocimiento de errores, identificarlos y reducirlos, así pueden existir errores que no se los pueda identificar trayendo consigo complicaciones. Así tenemos los errores locales que se dan en los nudos y los globales que se dan en todo el dominio, sin embargo, los errores locales contribuyen a los globales (Kuzmin, 2003).

Clasificación de errores (Kuzmin, 2003):

Errores conocidos:

- ✓ Error en el modelamiento físico debido a la incertidumbre y a las simplificaciones realizadas.
- ✓ Error de discretización que se da por la aproximación del las EDP a ecuaciones algebraicas.
- ✓ Error por la convergencia iterativa, en esta tiene que ver el tiempo de simulación.
- ✓ Error por redondeo debido a la limitada aritmética computacional.

Errores no conocidos:

- ✓ Errores en codificación y lógica.
- ✓ Errores por el uso de parámetros erróneos.

Juzgando la convergencia

No existe un método universal para juzgar la convergencia. Definiciones de los residuales que son útiles para una clase de problema no lo son para otros. Por lo tanto es buena idea juzgar la convergencia no examinando únicamente los niveles residuales, sino monitorear también otros valores como arrastre o transferencia de calor.

Para la mayoría de problemas el criterio utilizado por FLUENT es suficiente. Se recomienda que las ecuaciones decrezcan a 10^{-3} , excepto la de la energía cuyo criterio es 10^{-6} .

Capítulo 3

MATERIALES Y METODOLOGÍA

3.1 PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES UCUBAMBA

3.1.1 INTRODUCCIÓN

Desde 1983 ETAPA (Empresa Municipal de Telecomunicaciones, Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento), con la visión de brindar a la ciudad de Cuenca un saneamiento ambiental integral, efectuó actividades tendientes a la recuperación de la calidad de las aguas de los ríos que atraviesan la ciudad, para la cual construyó 42 km de interceptores en las orilla de los ríos y dos quebradas, así como la construcción de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Ucubamba (Figura 3.1). En la presente sección se describe en detalle las características más importantes de la planta.

Toda la información presente en esta sección se la encuentra en ETAPA (2007).

3.1.2 UBICACIÓN

La PTAR de Ucubamba se encuentra ubicada al noreste de la ciudad, en el sector de Ucubamba, en el km 8.5 de la Autopista Cuenca-Azogues.



Figura 3.1: Vista en planta de la PTAR de Ucubamba (ETAPA, 2007)



3.1.3 OBJETIVOS DEL PLAN DE SANEAMIENTO DE LA CIUDAD DE CUENCA

- ✓ Interceptar y conducir las aguas residuales anteriormente descargadas en ríos de la ciudad hacia la PTAR de Ucubamba, para su posterior depuración.
- ✓ Tratar las aguas residuales generadas en el área metropolitana de la ciudad de Cuenca, para evitar que sean fuente de proliferación de enfermedades que puede afectar tanto a la población de la ciudad como a poblaciones localizadas aguas abajo.
- ✓ Devolver al ambiente aguas libres de contaminantes.

3.1.4 CARACTERÍSTICAS DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

La PTAR se encuentra constituida por:

- ✓ Estructuras de tratamiento preliminar.
- ✓ Dos módulos de tratamiento independientes compuestas por lagunas de estabilización.

Estructuras de tratamiento preliminar

Se encuentran formados por:

Cajón de llegada, canal de paso directo By-pass, compuerta de admisión: Sirve como cajón rompe presión al final del emisario principal y permite un rebose de las aguas residuales por el by-pass mediante su cierre parcial o total en épocas de lluvia o períodos de limpieza, asegura que en condiciones de lluvia no entre a la PTAR un caudal mayor al de diseño (Figura 3.2).

En el cajón de llegada se tiene construida una pantalla tranquilizadora, con el fin de disipar la energía con el que llega el agua por el emisario final. El caudal de diseño del cajón de entrada es de $3.64 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, con un tiempo de residencia de 15 s.

El caudal máximo de aguas residuales en tiempo seco es de $2.27 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, caudal máximo admitido para el tratamiento.

La compuerta de admisión garantiza que no ingrese un caudal mayor al establecido y todo exceso se desviará por el canal de paso directo.

Cribas mecánicas autolimpiantes: Ubicadas aguas abajo del cajón de llegada (Figura 3.3), antes de llegar a las cribas el agua es conducida por un canal de transición y se dividen en tres partes iguales. Su objetivo es retener y evacuar desechos sólidos cuyo tamaño sea mayor a 20 mm, además evitan que desechos sólidos por sus características y tamaños interfieran con los procesos biológicos, se conviertan en habitat o alimento para roedores. Los desechos cribados son continuamente cubiertos de cal para evitar inconvenientes causados por la propia composición de los mismos.



Figura 3.2: Cajón de llegada, By-pass y compuerta de admisión (ETAPA, 2007)



Figura 3.3: Cribas mecánicas autolimpiantes (ETAPA, 2007)

Deflectores de caudal, desarenadores y transportadores de arena: Localizados aguas abajo de las cribas. Su objetivo es retener y evacuar materiales o partículas de arena cuya diámetro sea mayor a 0.2 mm y con un peso específico mayor o igual a 2.65. Son diseñados para que en las condiciones más desfavorables operen con todo el caudal de diseño en una sola unidad. Protege a los aereadores de la abrasión y del desgaste (Figura 3.4).

Los deflectores son chapas de acero y están soldados a un eje de maniobra, están compuesto por una palanca de maniobra que opera en 11 posiciones diferentes en arco de 180° .

El mecanismo para el retirado, transporte y lavado de arena en el fondo de la estructura está constituido por:

- ✓ Raspador de fondo circular de 10 m de diámetro.
- ✓ Mecanismo para el lavado de transporte de arena tipo tornillo.



Figura 3.4: Deflectores de caudal, desarenadores y transportadores de arena (ETAPA, 2007)

Son dos desarenadores con una profundidad de 1.45 m.

Lagunas: Las características generales de las lagunas de estabilización en Ucubamba son las siguientes:

- ✓ Taludes recubiertos de hormigón lanzado con armadura metálica, con mezcla asfáltica en la junta de las losetas para así evitar infiltraciones y crecimiento de la vegetación.
- ✓ La base de la laguna es impermeable mediante arcilla compactada.
- ✓ El ingreso a las lagunas es una tubería sumergida de 0.9 m de diámetro, y dispone de una estructura para la disipación de la energía de 5.3 m x 5.3 m.
- ✓ La salida está constituida por un vertedero rectangular de 10 m, disponiéndose de una compuerta giratoria, así como de una galería recolectora y un cajón de carga para la descarga mediante una tubería.

Lagunas aereadas: Su objetivo es asimilar la materia orgánica soluble en un período de retención relativamente corto pero suficiente como para reducir la DBO en un orden del 90%. También reduce el conteo bacteriano en medida de su capacidad (Figura 3.5).

Área (ha)	6 (3 c/u)
Profundidad (m)	4.5
Número de unidades	2 (Paralelo)
Inclinación de taludes	2:1
Volúmenes (m ³)	135000 (c/u)
Número de aereadores	10 (c/u)

Tabla 3.1: Características de las lagunas aereadas (ETAPA, 2007)



Figura 3.5: Lagunas aereadas (ETAPA, 2007)

Lagunas facultativas: En ellas se almacenan y asimilan los sólidos biológicamente producidos en las lagunas aereadas, presentando adecuadas condiciones de carga orgánica y balance de oxígeno para sustentar una adecuada biomasa de algas unicelulares en su parte superior. Además deben presentar condiciones adecuadas de mortalidad bacteriana y asegurar una adecuada remoción de los nematodos intestinales (Figura 3.6).

Área (ha)	13 (c/u)
Profundidad (m)	2
Número de unidades	2 (Paralelo)
Inclinación de taludes	2:1
Volúmenes (m ³)	260000 (c/u)

Tabla 3.2: Características de las lagunas facultativas (ETAPA, 2007)

Lagunas de maduración: Tienen características similares a la lagunas facultativas con diferencia que no tienen la capacidad de almacenar lodos (Figura 3.7).

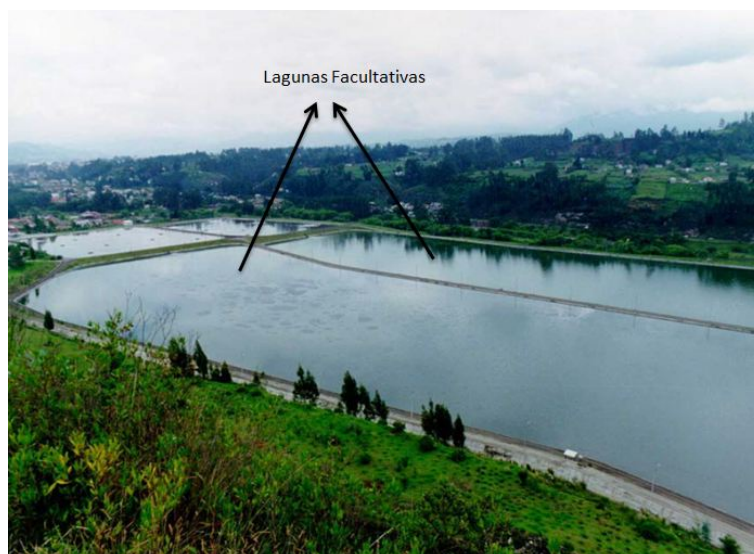


Figura 3.6: Lagunas facultativas (ETAPA, 2007)

Área (ha)	7.4 (c/u)
Profundidad (m)	2
Número de unidades	2 (Paralelo)
Inclinación de taludes	2:1
Volúmenes (m3)	148000 (superior) 112000 (inferior)

Tabla 3.3: Características de las lagunas de maduración (ETAPA, 2007)



Figura 3.7: Laguna de maduración (ETAPA, 2007)



3.2 MATERIALES

3.2.1 INTRODUCCIÓN

Las pruebas con trazadores fluorescentes implican la utilización de sustancias químicas inertes que son adicionadas para su completa dispersión, mezcla y/o paso a través del medio o sistema en estudio, en nuestro caso particular se utilizó como trazador la Rodamina WT que es un colorante fluorescente rojo comúnmente usado. Dichas pruebas sirvieron para realizar una caracterización de la hidráulica de las lagunas, de las cuales se obtuvieron: número de dispersión (d) y tiempo de retención (t_m), estos datos fueron confrontados con los datos de diseño para comprobar si las suposiciones de diseño fueron correctas. En este sentido, en un sistema a escala real y de gran tamaño como son las lagunas de estabilización de Ucubamba, estas pruebas requieren un cuidadoso balance y utilización tanto de la sustancia trazador como de la tecnología para detectarla. Así, a continuación se describe la metodología, materiales, equipos, herramientas computacionales, etc., utilizadas tanto en las pruebas de trazadores como en la posterior construcción de los modelos computacionales de flujo dinámico (CFD) que fueron validados en función de las pruebas mencionadas.

3.2.2 MATERIALES UTILIZADOS

Los materiales empleados en las pruebas de trazadores en la lagunas facultativas de la PTAR de Ucubamba fueron:

Rodamina WT al 20 %: Es un trazador fluorescente que no reacciona con el agua, ampliamente utilizado en el mundo, creada específicamente para el ensayo de trazadores, ligera tendencia a adsorber sedimentos transportados por el agua (Figura 3.8a).

Muestreador automático ISCO 6712: Es una herramienta empleada en la toma de muestras, fácilmente programable, en este estudio en la prueba de trazadores en las lagunas facultativas, se utilizó un muestreador de configuración de 24 botellas con una capacidad cada una de 1 l. Las muestras se tomaron inicialmente cada 5 minutos, posteriormente cada 10, 15, 30 y 60 minutos, según la concentración de rodamina disminuía en la laguna. La ventaja de la utilización de los muestreadores automáticos es que permite la toma de muestras asignando el intervalo de tiempo y la hora de inicio, lo cual permite que la persona que realiza la prueba tenga disponibilidad de tiempo entre las lecturas de la muestra, evitando que estas se tengan que realizar continuamente mientras se realiza la prueba (Figura 3.8b).

Fluorómetro Aquafluor 8000-010: Es un instrumento portable cuyo peso es de 0.4 kg y sus medidas son 4.45 cm x 8.90 cm x 18.40 cm que permite tomar lecturas de diferentes parámetros del agua como son: la clorofila, el amonio, las cyanobacterias, la fluorescencia, la concentración de la rodamina, turbiedad entre otros. Funciona con 4 pilas AAA, lo cual nos da un aproximado de 1000 lecturas por conjunto. El límite de detección para la rodamina es de 0.4 partes por billón (ppb) y su rango lineal es de 0 a



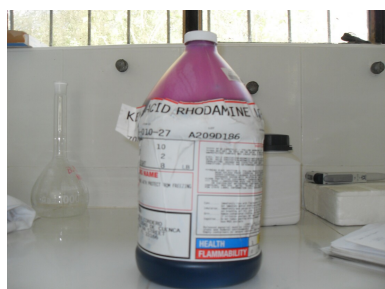
400 ppb. En las pruebas de trazadores realizadas en las lagunas facultativas en cada muestra se tomó 2 lecturas, las cuales debían diferenciarse en un rango de ± 0.1 ppb, caso contrario se tomaba una tercera lectura. Para la toma de lecturas se colocaba el agua en cubetas de plástico, se secaba el exterior de la cubeta, se colocaba en la celda y se tomaba la lectura (Figura 3.8c).

Pipetas de 1000 μg (BRAND): Este instrumento se empleó para la elaboración de los estándares que sirvieron para la calibración del fluorómetro, ya que con su uso se obtienen cantidades exactas de concentraciones de trazador para formar distintas diluciones (Figura 3.8d).

Probetas de vidrio: Fueron empleadas para la elaboración de distintas diluciones (Figura 3.8f).

Envase de plástico (NALGENE): Se utilizó para mezclar el trazador con agua de la laguna con el fin de homogenizar la temperatura del trazador antes de ser colocado en el cajón de mezcla. Su volumen es de 10 litros (Figura 3.8e).

Balanza de precisión: Debido a la sensibilidad del fluorómetro se utilizó una balanza que permita obtener pesos con una precisión de ± 0.0001 gramos para preparación de los estándares (Figura 3.8g) y de ± 0.1 gramos para pesar la rodamina a ser colocada en la laguna (Figura 3.8h).



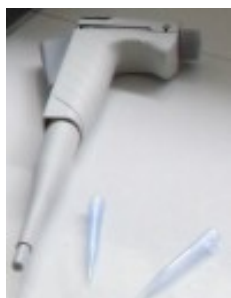
(a) Rodamina WT



(b) Muestreador



(c) Fluorómetro



(d) Pipetas



(e) Envase de plástico



(f) Probetas

(g) Balanza de precisión ± 0.0001 gr(h) Balanza de precisión ± 0.1 gr

Figura 3.8: Materiales

3.3 METODOLOGÍA

3.3.1 INTRODUCCIÓN

Para llevar a cabo correctamente una prueba de trazadores, se deben seguir algunos pasos, con el fin de garantizar medidas exactas por parte del fluorómetro y la veracidad del ensayo.

En la presente sección, en primer lugar se explica cómo se lleva a cabo la calibración del fluorómetro, cuya exactitud es crucial en la prueba, este proceso se realiza mediante preparación de estándares, con el cual se calibra el instrumento en un rango de 100 ppb a 0 ppb, para comprobar la calibración se hacen diluciones conocidas, para posteriormente compararlas con las medidas del instrumento.

Debido a que la rodamina es un trazador fluorescente de un costo elevado, se debe determinar su cantidad de tal forma que no se desperdicie la sustancia al colocar una cantidad excesiva, pero que tampoco se coloque una cantidad que al tratar de leer las muestras en el ensayo resulten estas con concentraciones inferiores a la mínima capacidad



de detección del fluorómetro, básicamente la cantidad depende del volumen del reactor y de la mínima capacidad de detección del instrumento como veremos más adelante.

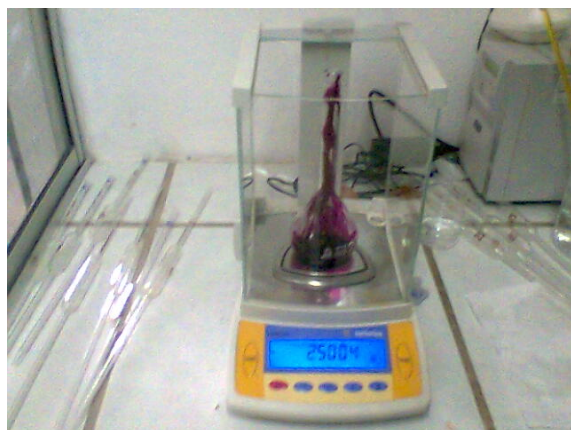
Finalmente, se describen las pruebas de trazadores de una forma general para posteriormente realizar una descripción de las particularidades que se presentaron en cada laguna al realizar los ensayos.

3.3.2 PREPARACIÓN DE LA SOLUCIÓN TRAZADOR

Preparación una dilución 100 ppb (ingrediente activo) Estándar de Rodamina WT (20 % ingrediente activo en la solución)

- 1) **Preparación de una dilución 100 veces en peso:** Utilizando una balanza de laboratorio de precisión de 0.0001 g, se pesa 2.5 g de colorante directamente en un matraz aforado de 250 ml. El colorante se coloca en el matraz con la pipeta. A continuación se procede a llenar con agua destilada.

Como resultado se obtiene una sustancia trazador con una concentración $10 \text{ } g g^{-1}$ (10 ppt (parte por mil) o 10^{-2}) (Trazador).



(a) Pesaje de 2.5 g de Rodamina en un matraz de 250ml (b) Llenado con agua destilada

Figura 3.9: Disolución 100 ppb

- 2) **Preparación de una dilución 100 ppm (partes por millon) en peso:** En la pipeta se toma 2.5 ml (o un peso de 1 gramo) de la dilución en 1 (10^{-2} o 10 ppt) y se la coloca en un matraz aforado limpio de 250 ml y se completa su volumen con agua destilada. Se mezcla bien y se obtiene una dilución de 100 ppm o 10^{-4} (Trazador).
- 3) **Preparación de una dilución 100 ppb (partes por billón) de ingrediente activo:** Se toma en la pipeta 5 ml (5 gramos) de la dilución en 2 (10^{-4} o 100 ppm) en un matraz aforado limpio de 1000 ml y se completa su volumen con agua del sistema a ser estudiado. Mezclar a fondo y se obtiene como resultado una dilución 10^{-7} (100 ppb de 0.1 ppm) estándar de ingrediente activo.



Figura 3.10: Diluciones 100 veces, 100 ppm, 100 ppb

3.3.3 CALIBRACIÓN DEL FLUORÓMETRO

Una vez obtenidos los estándares se calibra el fluorómetro de la siguiente forma:

- ✓ En el fluorómetro se presiona la tecla CAL.

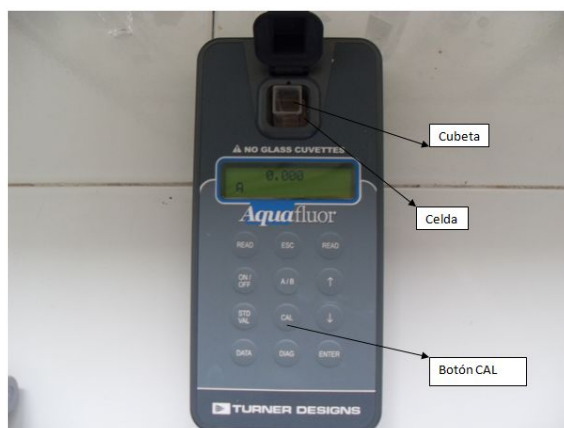


Figura 3.11: Fluorómetro

- ✓ Siguiendo las instrucciones en pantalla se coloca inicialmente la cubeta con la muestra de 100 ppb y se procede a leer la fluorescencia.
 - ✓ Luego se coloca en el fluorómetro la cubeta con la muestra sin trazador (blanco) y de igual manera se procede a leer la fluorescencia.
 - ✓ Se comprueba la calibración del fluorómetro mediante la elaboración y medición de otras diluciones que en este caso fueron: 5, 10, 20, 40 y 80 ppb de ingrediente activo.
- Para ilustrar la elaboración de las diluciones, se incluye a continuación los cálculos realizados:

- Se define la dilución que se quiere obtener (C).
- Se define el volumen del matraz a utilizar de acuerdo a la cantidad de dilución requerida (C_m).



- Se calcula la relación de dilución, que es la relación entre la dilución que se quiere obtener y la que se tiene actualmente, es decir $\frac{C_m}{C}$.
- Se multiplica la relación de dilución por el volumen del matraz en el que se va a hacer la disolución y así se obtiene el volumen de solución actual que hay que colocar en el matraz para posteriormente completar su volumen con agua destilada.
- Ejemplo: Se tiene una dilución 100 ppm y se quiere una de 30 ppm, la relación de dilución sería igual a $\frac{30}{100}$, se supone que se quiere 30 ppm en un matraz de 25 ml, entonces el volumen a extraer con una pipeta de la dilución de 100 ppm sería igual a $\frac{30 \cdot 25}{100} = 7.5 \text{ ml}$, se completa el volumen colocando 17.5 ml de agua destilada.

3.3.4 DETERMINACIÓN DE LA CANTIDAD DE RODAMINA UTILIZADA

Para determinar la cantidad de rodamina, en la laguna facultativa 2, se determina inicialmente la densidad de la rodamina, para lo cual se llena un matraz de 2000 ml y posteriormente se pesa:

$$\delta = \frac{\text{Peso}}{\text{Volumen}} = \frac{2224.6 \text{ gr}}{2 \text{ l}} = 1112.3 \text{ gr l}^{-1}$$

Posteriormente usando la fórmula 2.20 en Yanez (1993) se tiene:

$$v = \frac{Kr \cdot C_{min} \cdot V}{1000 \cdot P \cdot D} \quad (2.20)$$

Donde:

C_{min} : Nivel mínimo de detección del trazador, al final de la prueba, en nuestro caso = 0.4 $[\mu\text{g l}^{-1}]$.

V: Volumen de la laguna en (m^3)

Kr: Relación $\frac{C_o}{C_{min}} = 8$ para Rodamina WT en lagunas, esta cantidad se considera excesiva de acuerdo a prácticas anteriores por esta razón se toma 4

P: Porcentaje de rodamina en solución líquida, fracción decimal (usualmente 0.2)

δ : Densidad de la rodamina [g ml^{-1}]

v: Volumen de la solución de rodamina usada [ml]

Se toma $Kr=4$, $V=228982 \text{ m}^3$, $P=0.2$, $C_{min}=0.4 \mu\text{g l}^{-1}$, $\delta=1.1123 \text{ g ml}^{-1}$

Reemplazando:

$$v = \frac{4 \cdot 0.4 \cdot 228982}{1000 \cdot 0.2 \cdot 1.1123} = 1647 \text{ ml} \quad (2.20)$$

Se colocó en la laguna facultativa 2 la cantidad de 2000 ml de colorante trazador, para el caso de la laguna facultativa 1 se subió la cantidad a 4389.5 ml con el fin de que el pico resultante de la curva C vs t sea más pronunciado. Esta cantidad equivale a un Kr alrededor de 8.

3.3.5 DESCRIPCIÓN DE LA PRUEBA DE TRAZADORES EN LAS LAGUNAS FACULTATIVAS

Descripción General

Se utilizaron en forma simultánea 3 muestreadores automáticos ISCOs (Figura 3.12a) para el ensayo, el primer muestreador se programó para recolectar muestras antes de iniciar la prueba de trazadores, esto con el fin de obtener la fluorescencia natural de la laguna, para posteriormente restar este valor a las lecturas tomadas durante la prueba. Las otras dos ISCOs se programaron para el muestreo normal una vez iniciada la prueba. Las veinticuatro botellas en donde los muestreadores automáticos recogen las muestras se pueden ver en la Figura 3.12b



(a) Muestreadores automáticos ISCO usados en las pruebas (b) Botellas en las que se colocan las muestras

Figura 3.12: Muestreador automatico ISCO 6712

Se colocó la rodamina pesada en el envase de plástico de 10 litros (Figura 3.13), se tomó agua de la laguna aerada, y se procedió a colocar en el envase hasta completar su volumen, con el fin de homogenizar la temperatura. Posteriormente la mezcla se vertió en el cajón de salida de la laguna aerada, debido a que es una zona donde se da una buena mezcla y el trazador ingresa en la laguna de manera natural con el ingreso del afluente normal.

Una vez colocado el trazador se procedió a la toma de lecturas del primer muestreador automático para determinar la fluorescencia inicial y a continuación se realizó las lecturas de los demás muestreadores según iban siendo llenados con muestras.

Facultativa 2

La laguna facultativa 2 tiene un volumen de 228982 m^3 , en la cual se inició la prueba de trazadores el día jueves 9 de septiembre de 2010 a las 11:00 horas con una cantidad de rodamina de 2224.6 gr (Figuras 3.16a y 3.16b).

El día de inicio de la prueba se caracterizó por tener una temperatura $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ y un cielo despejado.



Figura 3.13: Mezcla del trazador con agua de la laguna para homogenizar la temperatura

Una vez colocada la rodamina en la laguna esta tendía a dirigirse en gran cantidad hacia el lado izquierdo de la laguna y lentamente hacia el lado derecho (Figuras 3.15). Una cierta cantidad de rodamina se concentró en la esquina izquierda de la laguna permaneciendo en ese lugar alrededor de unos 30 minutos. Cuarenta y cinco minutos después de haber colocado la rodamina en la laguna, esta se había mezclado con el agua, y no era perceptible a la vista.



(a) Pesaje de la rodamina



(b) Colocación de la rodamina en la laguna

Figura 3.14: Prueba de trazadores en la laguna Facultativa 2

En la Tabla 3.4 se pueden ver el tiempo transcurrido de la prueba y el tiempo en el cual el muestreador tomaba las muestras.

Facultativa 1

La laguna facultativa 1 tiene un volumen de 231234 m^3 , en la cual se realizó la prueba de trazadores el día lunes 27 de diciembre de 2010 a las 11:00 horas con una cantidad de rodamina de 4389.5 ml.

El día de inicio de la prueba se caracterizó por tener una temperatura $18.7 \text{ }^{\circ}\text{C}$ y un cielo nublado despejándose parcialmente a las 11:30.



Tiempo de la prueba (horas)	Intervalo de la toma de muestras (min)
0 - 8	5
8 - 32	10
32 - 80	15
80 - 152	30
152 - 261	60

Tabla 3.4: Intervalo de toma de muestras (Facultativa 2)

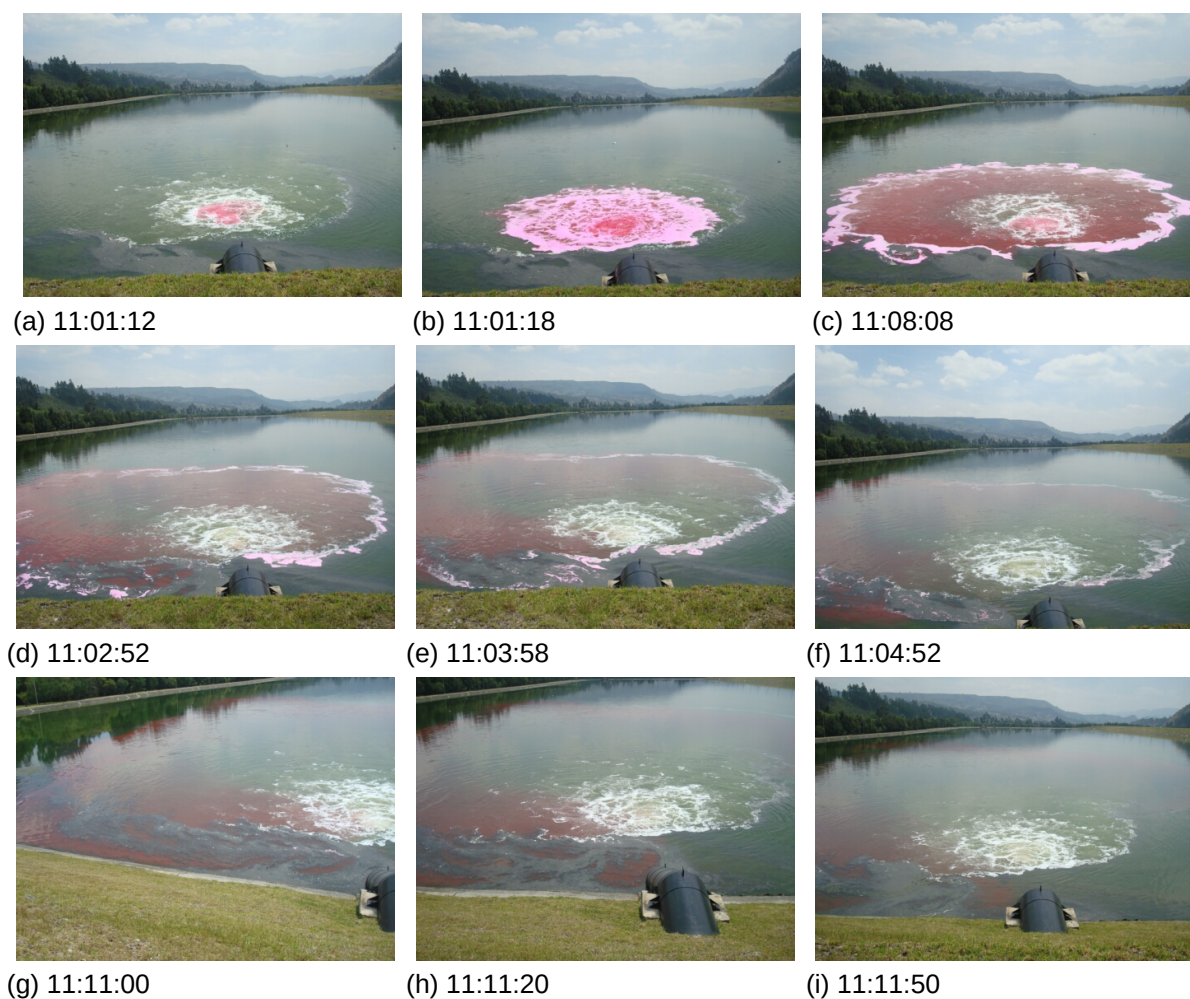


Figura 3.15: Secuencia de fotos de la prueba en la laguna facultativa 2

La cantidad que se pesó para colocar en la laguna fue de 4916.3 gramos.

Iniciada la prueba se visualizó que la rodamina se difundía hacia el lado izquierdo de la laguna, posteriormente se fue esparciendo por toda su área. Pasado 40 minutos de haber iniciado la prueba el trazador ya no era perceptible a la vista (Figura 3.17).

Se tomó muestras desde las 8:00 horas cada 15 minutos, 4 muestras de 200 ml en una misma botella. Desde las 11:00 se tomaron las muestras como se indica en la Tabla 3.5.



(a) Pesaje de la rodamina



(b) Colocación de la rodamina en la laguna

Figura 3.16: Prueba de trazadores en la laguna Facultativa 1

Tiempo de la prueba (horas)	Intervalo de la toma de muestras (min)
0 - 8	5
8 - 32	10
32 - 76	15
76 - 148	30
148 - 316	60
316 - 388	90

Tabla 3.5: Intervalo de toma de muestras (Facultativa 1)

3.4 MODELAMIENTO DINÁMICA DE FLUJO EN LAS LAGUNAS

3.4.1 INTRODUCCIÓN

A continuación se detallan los pasos a seguir para la implementación de modelos computacionales de Flujo Dinámico (CFD) en las lagunas de la PTAR Ucubamba.

3.4.2 GAMBIT 2.4

El paquete de software utilizado para la definición de la geometría de las lagunas así como la discretización espacial (grilla) fue GAMBIT (ANSYS). La construcción del modelo se basó en la topografía de la PTAR Ucubamba, para la cual se trabajó en las lagunas facultativas 1 y 2 de la siguiente manera:

Consideraciones:

- ✓ Las lagunas tienen una pendiente por lo que se tomó los puntos en la sección intermedia.

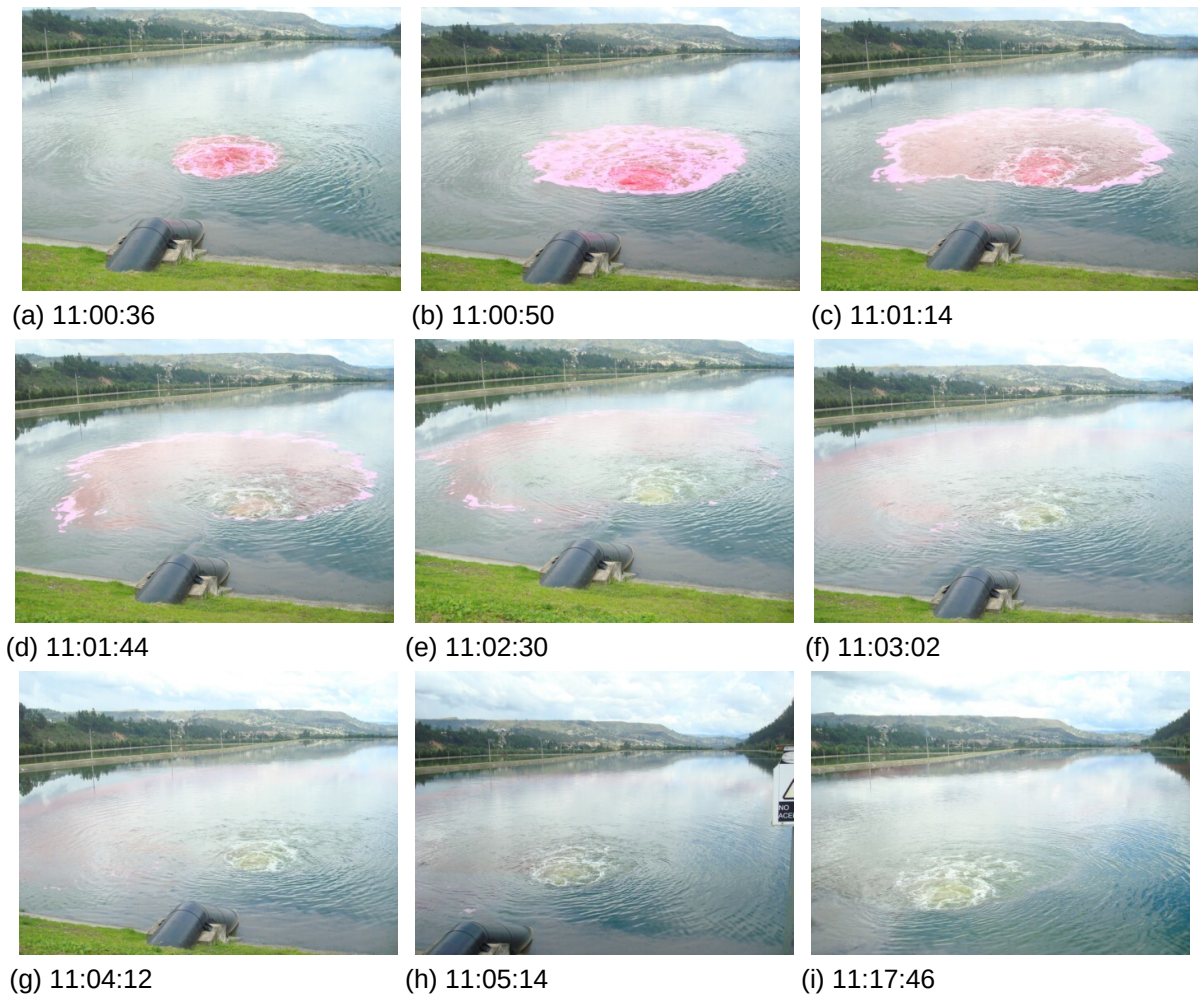


Figura 3.17: Secuencia de fotos de la prueba en la laguna facultativa 1

- ✓ Se simplificó la geometría tratando de hacerla lo más recta posible, para esto no se consideró pequeñas curvas (imperceptibles en campo) existentes en la laguna.
- ✓ La entrada como la salida se tomó como paralelas.

Para las dos lagunas se realizó el siguiente procedimiento:

Obtención de las coordenadas: Se dibujó la geometría de la laguna en el AutoCad (AUTODESK), tomando como centro del plano la esquina inferior izquierda de cada laguna. Se obtuvieron las coordenadas de los puntos que componen las lagunas. Para formar las esquinas redondeadas se midieron en el Auto Cad los radios de giro.

Creación de la geometría: Utilizando las herramientas de GAMBIT se creó la geometría respetando las coordenadas obtenidas previamente en AutoCAD.

A continuación se presenta dos cuadros, el primero contiene las coordenadas de los puntos de cada laguna (Tabla 3.6) y el segundo los radios que se utilizaron en las esquinas (Tabla 3.7).

Colocación de las condiciones frontera: Entre las condiciones de borde se presenta la entrada de agua que se la realiza a través de una tubería. La salida del agua que se lo hace



Facultativa 1		Facultativa 2	
X	Z	X	Z
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
-276.6446	653.8939	-125.0535	0.0000
-254.8927	153.4848	-173.6885	1.2870
-251.3525	89.3398	-213.1998	170.8465
-231.6948	444.4799	-241.6736	639.8320
-165.1858	0.0000	-199.9297	654.5081
-67.8985	653.8939	-110.2704	646.4328
-44.9721	180.6477	-35.6046	646.4328
		-17.8452	643.3966
		-17.8531	239.2018

Tabla 3.6: Coordenadas de las lagunas

	Radio de la circunferencia (m)	
	Facultativa 1	Facultativa 2
Esquina inferior izquierda	9.26	8.92
Esquina inferior derecha	28.08	25.12
Esquina superior izquierda	5.91	10.60
Esquina superior derecha	9.71	5.66

Tabla 3.7: Radios utilizados en las esquinas de las lagunas

por un vertedero, ambas zonas son de alta turbulencia en comparación al resto de la laguna.

Para la modelación, el área de la tubería circular por la que ingresa el agua, se reemplazó por un cuadrado con área equivalente a la sección circular. A ésta sección se le asignó la condición de frontera velocity-inlet. El vertedero de salida se tomó de un largo de 10 m por una altura de 10 cm y se le asignó la condición de frontera outflow.

Como se mencionó anteriormente, las zonas de entrada y salida son las de mayor turbulencia por lo que la discretización en ellas es diferente que el del resto del volumen de la laguna.

Las zonas que representan a la superficie y paredes de la laguna son representadas con la condición de frontera "wall", mientras que para la superficie se analizó dos tipos de frontera: "wall" y "symmetry". El análisis de estas condiciones de frontera se realizará más adelante en el presente documento.

Discretización de las lagunas: Este proceso consiste en dividir el volumen de la laguna en elementos tridimensionales para resolver las ecuaciones de flujo en todo el dominio. Para discretizar las lagunas se tomó en cuenta varios criterios y de acuerdo a la geometría de



la laguna se la realizó hasta completar todo el conjunto. Se describirá el procedimiento de la colocación de la grilla en cada laguna, mediante la explicación de que herramientas del paquete de software GAMBIT se utilizó.

Se consideró que en las zonas de mayor turbulencia se debe buscar una mayor precisión al momento de resolver las ecuaciones del fluido en el modelo por lo que la grilla en estas zonas es más estrecha y por ende en estas zonas se colocó una mayor cantidad de elementos. En la zonas que se consideran de baja velocidad, es decir, donde la turbulencia es menor, se realizó elementos espaciados cada 5 m, y en las esquinas de hasta 2m.

En la discretización se consideró un balance entre dos factores: la demanda computacional del modelo (a mayor número de elementos mayor demanda) y la precisión de los resultados. Experiencias previas en modelación de lagunas (Alvarado y otros, 2011) ayudaron a determinar el número de elementos tridimensionales alrededor de 100 000, guardando un factor de forma en cada uno de los elementos no mayor a 0.7 y menor a 0.5 en la gran mayoría de elementos (En GAMBIT, este factor nos indica la calidad geométrica de los elementos, siendo los valores cercanos a 0 los mejores y los cercanos a 1 los de menor calidad) Cualquier elemento con un factor de forma mayor a 0.95 se considera inaceptable..

Conocer el número ideal de elementos para discretizar un sistema depende mucho de la experiencia del modelador; sin embargo, para conocer si la solución que obtenemos con una determinada discretización es válida se recomienda estudiar la confiabilidad de la grilla (grid dependency analysis) corriendo modelos con una mayor densidad de elementos tridimensionales y comparando los resultados obtenidos. Este análisis fue ejecutado y sus resultados se muestran más adelante en el presente documento.

En el Anexo A.6 se puede consultar el procedimiento empleado para discretizar las lagunas. **Asignación de condiciones de frontera:** Se verificó anteriormente que el solver se encuentre en FLUENT 5/6. Se asignó en la cara de entrada la condición de velocity inlet, y en la cara de salida la condición outflow.

En unas simulaciones, en la superficie se colocó la condición symmetry mientras que en otras se colocó la condición wall.

Exportación a FLUENT: Se envió el modelo generado en GAMBIT y se asignó el nombre de facultativa1 y facultativa2 a los archivos.

3.4.3 FLUENT 6.3

Una vez que se ha exportado la grilla desde GAMBIT, se comenzó la simulación en el FLUENT, la opción que se escoge para la resolución es 3d, es decir, el modelo que se va simular está en tres dimensiones.

Se abrió el documento en FLUENT, con la opción **file > read > case** y se procedió a verificar la grilla tomando la opción default interior.

Definición de parámetros

Para la simulación en FLUENT existen varios parámetros que se deben definir para correr el modelo, las diversas opciones que se toman dependen del tipo de problema. Para el presente caso de estudio se realizó una aproximación inicial empleando el tipo de



solución "Steady", (estado estacionario) la misma que realiza iteraciones hasta encontrar una solución.

La solución obtenida mediante la solución en estado estacionario, se emplea como valor inicial para la solución "Unsteady" (estado no estacionario).

El modelo de turbulencia para la resolución fue el k-epsilon estándar.

Para obtener la velocidad en la laguna se basó en el caudal de entrada, la cual se tomó un promedio de $0.600 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ para la facultativa 1 y $0.507 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ para la facultativa 2 y se calculó de la siguiente manera:

Facultativa 1:

$$Q = 0.60 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$$

$$\phi = 0.90 \text{ m}$$

$$A = \frac{\pi \cdot \phi^2}{4}$$

$$u_m = \frac{Q}{A} = \frac{0.6 \cdot 4}{\pi \cdot 0.9^2} = 0.94 \text{ m s}^{-1}$$

Facultativa 2:

$$u_m = \frac{0.507 \cdot 4}{\pi \cdot 0.9^2} = 0.79 \text{ m s}^{-1}$$

Cálculo de los parámetros para el modelo de turbulencia

Existen varios parámetros que intervienen en el cálculo del factor k y epsilon, estos se los obtuvo del manual de programa FLUENT, y se tomó algunas simplificaciones de las mismas. Se utilizó datos de la laguna tales como la velocidad de entrada y la temperatura para obtener la viscosidad del agua.

La intensidad de turbulencia, se define como la relación entre la raíz cuadrada media de las fluctuaciones de velocidad y la velocidad media del flujo. Se obtiene mediante la siguiente fórmula:

$$I = 0.16 \cdot (R_E)^{-\frac{1}{8}} \quad (3.1)$$

De donde:

I: Intensidad de turbulencia

R_E : Número de Reynolds

Sabiendo que:

$$R_E = \frac{u_m \cdot \phi}{\nu} \quad (3.2)$$

Donde:

u_m : Velocidad media [m s^{-1}]



ϕ : Diámetro de la tubería (0.90 m)

ν : Viscosidad cinética [$m^2 s^{-1}$]

$$\nu_{20^\circ C} = 1.114 \cdot 10^{-6} m^2 s^{-1}$$

Facultativa 1:

$$R_E = \frac{0.94 \cdot 0.9}{1.011 \cdot 10^{-6}} = 759425$$

Reemplazando en la fórmula tenemos:

$$I = 0.16 (759425)^{-\frac{1}{8}} = 0.029$$

Para calcular el factor k y ϵ nos basamos en las fórmulas 3.3 y 3.4.

k : Energía cinética turbulenta

ϵ : Tasa de disipación.

$$k = \frac{3}{2} (u_m \cdot I)^2 \quad (3.3)$$

$$\epsilon = c_u^{\frac{3}{4}} \cdot \frac{k^{\frac{3}{2}}}{l} \quad (3.4)$$

Donde:

I : Factor escala de turbulencia

ϕ : Diámetro de la tubería [m]

c_u : Constante empírica cuyo valor aproximado es 0.09

u_m : Velocidad media [$m s^{-1}$]

$$l = 0.007 \cdot \phi$$

$$\phi = 0.9$$

$$l = 0.07 \cdot 0.9 = 0.063$$

$$k = \frac{3}{2} (0.94 \cdot 0.029)^2 = 0.00111$$

$$\epsilon = 0.09^{\frac{3}{4}} \cdot \frac{0.00111^{\frac{3}{2}}}{0.063} = 0.000101634$$

Facultativa 2.

$$R_E = \frac{0.79 \cdot 0.9}{1.011 \cdot 10^{-6}} = 643858$$

$$I = 0.16 (643858)^{-\frac{1}{8}} = 0.030$$

$$l = 0.07 \cdot 0.9 = 0.063$$

$$k = \frac{3}{2} (0.79 \cdot 0.030)^2 = 0.00086$$

$$\epsilon = 0.09^{\frac{3}{4}} \cdot \frac{0.00086^{\frac{3}{2}}}{0.063} = 0.0000658$$



Definición de condiciones de operación: se verificó que se encuentre en 3D, y se colocó el valor de la gravedad en el eje y con el valor de -9.807 m s^{-2} . Vemos que la presión se encuentre en cualquier punto y cuyo valor es de 1000 kg m^{-3} .

Definición de materiales: para esto se definió el agua, en primer lugar se seleccionó que sea un fluido, y en la opción "*fluent fluid material*", se escogió "*water liquid*" y se copió como material.

Definición de monitores: se colocó varios monitores para la realización de la simulación en los siguientes lugares: en la entrada, salida, en dos planos transversales y uno en un plano longitudinal.

En la facultativa 1, se colocó los planos transversales, en los cambios de dirección que presenta la laguna, para lo cual obtuvimos las coordenadas de la geometría realizada en GAMBIT y para la facultativa 2 se tomó uno en un cambio de dirección y el otro cerca de la salida. Los planos longitudinales se pasaron por el centro de gravedad de cada laguna.

Para el ensayo de trazador se colocó un monitor en la salida para que mida la fracción de masa "*mass fraction*" del trazador.

Creación del trazador:

El trazador se colocó en la simulación una vez que se estabilizó el modelo. Para definirlo se lo realizó en la definición del material, sabiendo que este es un líquido que se mezcla con el agua.

Se escogió un material a lazar, se lo renombró y se copió las propiedades del agua.

El trazador se va a crear como mezcla y se desactivan las opciones como se indicó en la parte de revisión de literatura del presente documento.

Para forma se coloca en orden las especies, primero la sustancia inerte, es decir, el trazador y a continuación el "*bulk*" (el medio en el cual se inyecta el trazador), en este caso el agua.

Se desactiva la ecuación de la energía y cuando se revisa las ecuaciones que se resolverán aparece una ecuación más.

Se revisa que en la salida de la laguna (condición de frontera "*outflow*") se encuentre el valor de 1, esto significa que todo el caudal tiene que salir por esta única salida.

Existen varios parámetros que aparecen por defecto, por lo que no se los cambia.

Para añadir el trazador es necesario realizar un cálculo del número y del tamaño del tiempo de paso "*time step*" a utilizar, así como también el valor de la concentración del trazador en el afluente de la laguna. Esto se lo realizó de la siguiente manera:

Facultativa 1

Se utilizaron los siguientes datos:

$$Q = 600 \frac{\text{l}}{\text{s}} = 600000 \text{ ml s}^{-1}$$

$$u_m = 0.94 \text{ m s}^{-1}$$

M: Total de masa de la solución del trazador (4916.3 g)

m: Total de la masa pura del trazador, igual al 20% M (983.26 g)



δ_E : Densidad de la solución de la rodamina en la entrada de la laguna (se asume igual a 1 g ml^{-1})

t_t : Tiempo en el que se añade el trazador (5 s)

M_s : "Mass fraction"

$$M_s = \frac{M}{Q \cdot t_t} \quad (3.5)$$

$$M_s = \frac{4916.3}{600000 \cdot 5} = 0.00032775 \text{ g g}^{-1}$$

ts : Time step, se asume un "time step" estable (0.005 s)

$\#ts$: Número de "time step"

$$\#ts = \frac{t_t}{ts} \quad (3.6)$$

$$\#ts = \frac{5}{0.005} = 1000$$

Para comprobar obtenemos la masa que se colocará en el tiempo de lanzamiento del trazador lo cual tenemos:

$Q \cdot M_s \cdot ts \cdot \#ts = 600000 \cdot 0.00032775 \cdot 0.005 \cdot 1000 = 983.25 \text{ g}$, que es la cantidad de rodamina que se colocó en la laguna.

Facultativa 2

$$Q = 507 \text{ l s}^{-1} = 507000 \text{ ml s}^{-1}$$

$$u_m = 0.79 \text{ m s}^{-1}$$

$$M = 2000 \text{ g}$$

$$m = 400 \text{ g}$$

$$\delta_E = 1 \text{ g ml}^{-1}$$

$$t_t = 5 \text{ s}$$

$$M_s = \frac{2000}{507000 \cdot 5} = 0.00015779 \text{ g g}^{-1}$$

$$ts = 0.005 \text{ s}$$

$$\#ts = \frac{5}{0.005} = 1000$$

Para comprobar obtenemos la masa que se colocará en el tiempo de lanzamiento del trazador lo cual tenemos:

$Q \cdot M_s \cdot ts \cdot \#ts = 507000 \cdot 0.00015779 \cdot 0.005 \cdot 1000 = 400 \text{ g}$, que es la cantidad de rodamina que se colocó en la laguna.

Una vez inyectado el trazador se desactivan las ecuaciones de flujo y la turbulencia, corriendo únicamente la ecuación del trazador.

Para comprobar que las ecuaciones convergen de una manera satisfactoria, en el sistema existe varias opciones, una de ellas es colocar varias superficies de control en las cuales



se revisa si los valores que calcula permanecen cambiando, otra opción es la comparación visual de los resultados obtenidos reflejados en perfiles de velocidad o turbulencia en toda la laguna o alguna parte de ella.

Condiciones iniciales:

Las condiciones iniciales que fueron puestas en los modelos para acelerar su convergencia fueron:

Velocidad x : 0.01 m s^{-1}

Velocidad y : 0.001 m s^{-1}

Velocidad z : 0.1 m s^{-1}

Factores a tomar en cuenta el momento de definir parámetros

Eficiencia: Lo que nos interesa es que el método sea lo más rápido posible, el inconveniente es que la eficiencia está reñida con los factores: precisión y estabilidad, en nuestra simulación se iniciaba con un "time step" pequeño hasta que el modelo adquiriera estabilidad, según la convergencia del modelo lo permita y así subamos la eficiencia modelo. Es importante controlar la estabilidad ya que un sistema inestable provocará efectos impredecibles, dándonos resultados absurdos.

Estabilidad: Para garantizar la estabilidad del modelo se controlaron en este dos aspectos:

Control I: Número de iteraciones necesarias para cada "time step", se verificaba que cada "time step" converja con dos iteraciones.

Control II: Mediante la herramienta monitor residual del FLUENT vigilábamos la convergencia de la ecuación de la continuidad, de la ecuación de ϵ y k , de tal forma que el gráfico no muestre una forma extraña.

Precisión: El objetivo de la tesis es validar el modelo, por lo que este parámetro va a ser determinado cuando se haga la validación del modelo.

Control: Si se deja una simulación correr sin más, es difícil predecir su comportamiento, el control que se llevó del programa se realizó con monitores de velocidad como con los monitores de convergencia explicados anteriormente.

Confiabilidad de la grilla

Como se mencionó anteriormente, se corrieron dos modelos adicionales de la laguna Facultativa 2 con la condición de frontera "symmetry" en la superficie libre de la misma. El objetivo de correr estos modelos es analizar la confiabilidad de la grilla.

Para este fin, empleamos la opción "Export"(exportar) que se encuentra dentro del menú "File", seleccionamos la opción "ASCII" y seleccionamos el plano y el parámetro que deseamos. El resultado es un archivo que nos da el valor del parámetro en los nodos de la grilla en el plano que se quiere, este archivo puede ser abierto con una hoja de cálculo o de texto.

Para procesar estos datos, se elaboró un programa en la plataforma Matlab (MATHEWORKS) cuyo funcionamiento es sencillo y se describe a continuación:



- ✓ Ingreso de la variable "volúmenes", esta variable se lee desde una hoja de cálculo, el archivo se llama monitores.xlsx, y tiene los volúmenes en los cuales se ha dividido la laguna.
- ✓ Ingreso de la variable "para", con esto se toman los valores desde una hoja de cálculo, en donde se debe seleccionar el rango de datos.
- ✓ Ingreso de la variable "hoja", sirve para colocar el nombre de la hoja en la que se desea imprimir los resultados.
- ✓ El programa se encarga de obtener los límites para cada volumen y tomar los datos de los nudos que se encuentren en ese rango, para después obtener el promedio de los datos.
- ✓ Una vez obtenido el promedio de los datos se imprimen los resultados en una hoja de cálculo, en la hoja previamente establecida.

El programa se lo llamó prueba.m y su codificación se puede encontrar en el Apéndice A.7.

Los parámetros analizados fueron los de velocidad y los de turbulencia. En cuanto a la turbulencia se analizaron los parámetros k , ϵ e l . Dichos parámetros adicionalmente se analizaron en el plano de la superficie, a un tercio y a dos tercios de profundidad, para verificar la existencia de variación con la profundidad.

3.5 EVALUACIÓN ESTADÍSTICA

Para analizar cuan certera es la predicción de los resultados obtenidos de la simulación en el CFD, se requiere de parámetros estadísticos, los mismo que expresan de forma analítica cuan buena fue la simulación, para esto se utilizaron 4 parámetros empleados en el análisis de datos hidrológicos que son:

Error de Raíz Promedio de Cuadrados (RMSE): Ofrece una evaluación del error en las mismas unidades de la variable, se define como la raíz cuadrada de la varianza de los residuales. Indica qué tan cerca están los valores observados de los valores predichos por el modelo. Bajos valores del RMSE indican un mejor ajuste. El RMSE es una buena medida de cuán exacto el modelo predice la respuesta, se lo considera el criterio más importante de ajuste cuando el principal propósito del modelo es la predicción (Martin, 2008).

$$RMSE = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{n} \right)^{0.5} \quad (3.7)$$

Coeficiente de Correlación (R^2): Posee una escala intuitiva que va de cero a uno. En este modelo un valor de 0 "cero", nos dice que el modelo que hemos propuesto no mejora la predicción sobre la media del mismo; un valor de 1 "uno", indica una predicción perfecta (Martin, 2008). Se debe tener cuidado con los datos sesgados, ya que R^2



realiza la evaluación de la precisión del ajuste con respecto al error aleatorio. Se puede llegar al valor ideal de 1, en el caso de que dos series de datos tengan una diferencia constante, sea grande o pequeña entre los puntos de comparación.

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}) \cdot (S_i - \bar{S})}{(\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2)^{0.5} \cdot (\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2)^{0.5}} \right)^2 \quad (3.8)$$

Coeficiente de Eficiencia (EF) Es una mejora del coeficiente de correlación ya que este valor es muy sensible a valores extremos, a diferencia de los promedios y variaciones de los datos observados y simulados (Alvarado, 2001).

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (3.9)$$

Error Absoluto Promedio (MAE) Se define como el promedio del módulo de la diferencia entre los valores obtenidos en la simulación y los de campo. En general, para la mayoría de rango de valores, RMSE, es mayor o igual a MAE. De acuerdo a cuan mayor es RMSE respecto de MAE, se brinda la idea de las variaciones de las diferencias entre valores simulados y observados (Alvarado, 2001).

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |S_i - O_i|}{n} \quad (3.10)$$

Donde:

S_i : Valor simulado

O_i : Valor observado

$\bar{O}$: Promedio de los valores observados

$\bar{S}$: Promedio de los valores simulados

n: Número de valores comparados

Capítulo 4

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se encuentran los resultados obtenidos en las pruebas de trazadores desarrolladas en la PTAR de Ucubamba; los cálculos del número de dispersión y del tiempo de retención teórico para confrontar con los datos obtenidos mediante fórmulas sugeridas por la literatura para el diseño. Posteriormente se comparara los datos obtenidos del modelo computacional de flujo dinámico (CFD) con los datos de campo, con el fin de determinar si el modelo CFD logró reflejar el comportamiento hidráulico de la laguna. También consta la discusión de los resultados de la caracterización hidráulica de las lagunas, mediante la determinación de vórtices y zonas muertas. Finalmente consta una sección acerca de los resultados del análisis de confiabilidad de la grilla.

4.2 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS EN CAMPO

4.2.1 INTRODUCCIÓN

En la presente sección se describe los resultados obtenidos en las pruebas de trazadores realizados en las lagunas facultativas de la PTAR de Ucubamba, indicándose información como la fecha de inicio y culminación de cada una de las pruebas y obteniéndose parámetros de importancia para la caracterización hidráulica de la laguna, así como las curvas concentración versus tiempo (C vs t), para finalmente realizar una de interpretación de los mismos.

4.2.2 FACULTATIVA 1

Datos obtenidos

La prueba de trazadores en la laguna Facultativa 1 se llevó a cabo desde el día 27 de diciembre del 2010 hasta el 12 de enero del 2011, los datos que se obtuvieron se pueden ver en el Apéndices B.2.

Se presentan en la Tabla 4.1 las características geométricas que posee la laguna.

De los datos obtenidos de la prueba, se obtuvieron parámetros los cuales pueden dar una idea de cómo está funcionando la laguna en la realidad, esto se muestra en la 4.2.

En la Tabla 4.3 observamos el coeficiente de dispersión hallado según las distintas fórmulas sugeridas por la literatura.



L (m)	648.80
B (m)	190.84
H (m)	1.8
$v \left(\frac{m^2}{d} \right)$	0.0844

Tabla 4.1: Datos geométricos y de viscosidad de la laguna Facultativa 1

Volumen de la laguna (m^3)	222870.586
Tiempo de residencia nominal t_n (días)	3.709
Fluorescencia inicial ($\frac{\mu g}{l}$)	1.800
Masa de Rodamina al 20% (g)	4916.300
Caudal Promedio ($\frac{l}{s}$)	695.537
$\sum A_i$	14.256
$\sum A_i * t_{mi}$	37.239
$\sum A_i * t_{mi}^2$	187.091
Tiempo medio de residencia t_m (días)	2.612
Varianza (σ^2)	6.300
Rodamina recuperada%	88.08%
Varianza a dimensional $\sigma \tau^2$	0.923
Factor de dispersión d	4.096
Coeficiente de dispersión D ($\frac{m^2}{h}$)	27504.590
Volumen efectivo e	0.704

Tabla 4.2: Resultados de la prueba de trazadores en la laguna Facultativa 1

Los datos obtenidos nos dicen que:

- ✓ **Volumen efectivo:** La Fórmula 2.14 obtuvo un valor de 0.727 y el valor de campo es de 0.704, por lo que se puede concluir que la fórmula si predice el volumen efectivo que se presenta en la laguna. Este valor de 0.704 sugiere que el 70% del volumen de la laguna está trabajando mientras que el 30% se encuentra inactivo.
- ✓ **Dispersión:** Ninguna de las fórmulas propuestas en la literatura logró predecir el valor del número de dispersión, la razón podría ser que la forma de esta laguna es más irregular en comparación con la Facultativa 2. Su valor de 4.096 al ser mayor a 0.01 sugiere que lo que sucede en la entrada o salida del reactor afecta ampliamente la forma de la curva del trazador. El coeficiente de dispersión D que se obtuvo es de $27504.590 \text{ m}^2 \text{ h}^{-1}$ que indica que la curva del trazador tiene una rápida dispersión (Levenspiel, 1999).
- ✓ **Recuperación de rodamina:** El volumen de rodamina recuperada fue de 88.08%, nos indica que se recuperó una cantidad de rodamina suficiente para que el ensayo sea válido.



Factor de dispersión d	
Polprasert and Batharai (ecuación 2.8)	0.057
Aguwamba (ecuación 2.9)	0.949
Yanez (ecuación 2.10)	0.276
Von Sperling (ecuación 2.11)	0.294

Tabla 4.3: Coeficientes de dispersión obtenidos de la literatura (Facultativa 1)

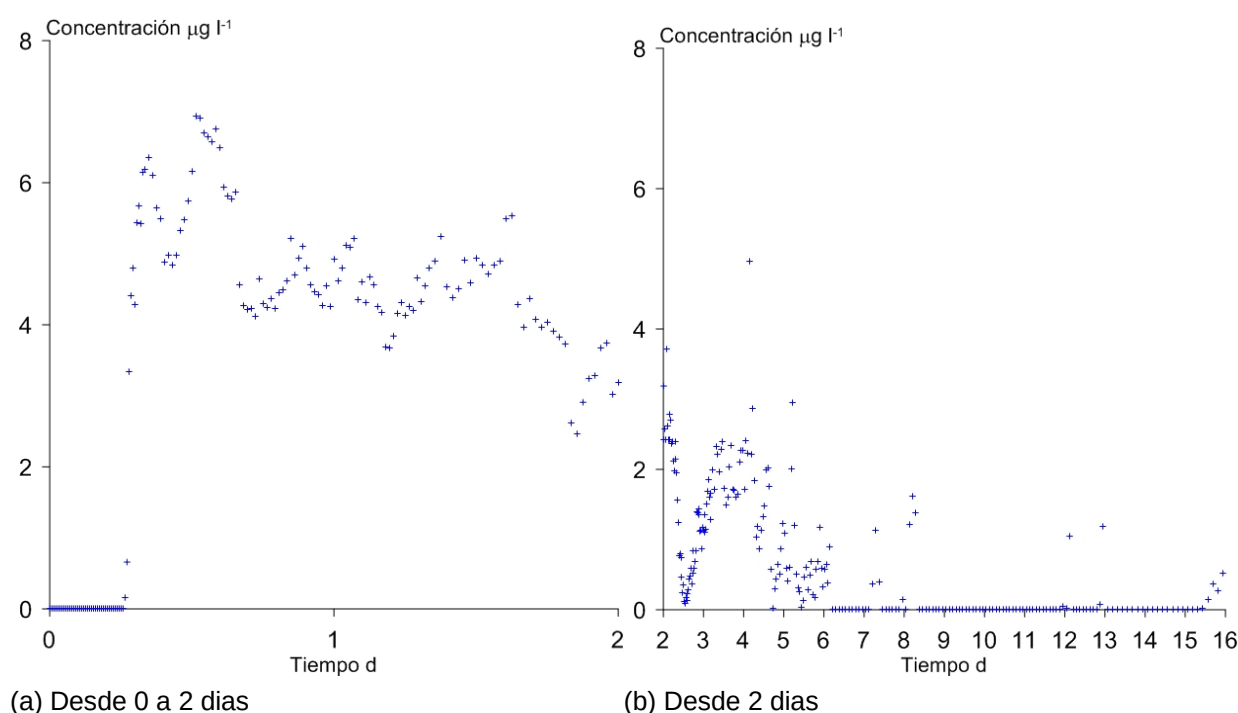


Figura 4.1: Curva concentración versus tiempo de la Facultativa 1

Descripción de la figura 4.1: En la figura se observa un pico máximo de $7.26 \mu\text{g l}^{-1}$ que se presenta a las 8 horas de haber iniciado la prueba, para posteriormente descender hasta un valor de $4.56 \mu\text{g l}^{-1}$ a las 10 horas, luego asciende a $7.00 \mu\text{g l}^{-1}$ a las 13 horas, volviendo a descender hasta llegar a $4.14 \mu\text{g l}^{-1}$ a las 17 horas, empezando a fluctuar su valor entre 5.63 a $3.68 \mu\text{g l}^{-1}$ hasta las 41 horas, a partir de este tiempo descende hasta llegar a un valor de $0.13 \mu\text{g l}^{-1}$ a las 61 horas. Posterior a esto empieza a oscilar los valores hasta las 151 horas de ensayo llegando a un máximo de $4.96 \mu\text{g l}^{-1}$, a partir de ese punto la curva descende hasta 0 presentando picos esporádicos hasta el final de la prueba.

Esta curva es de forma alargada (Yanez, 2003), debido al pico máximo que presenta se sabe que el sistema tiene cortocircuitos, el hecho de que la concentración no haya descendido bruscamente hasta las 41 horas, junto al número de dispersión $d=4.09$, muestra que la laguna tiene un buen régimen de mezcla.



4.2.3 FACULTATIVA 2

Datos obtenidos

La prueba de trazadores en la laguna Facultativa 2 se llevo a cabo desde el 9 al 21 de septiembre del 2010, los datos que se obtuvieron se pueden ver en el Apéndice B.1.

En la Tabla 4.4 se presentan las características geométricas que posee la laguna, las cuales fueron extraídas del levantamiento topográfico realizado sobre las lagunas de Ucubamba

L (m)	648.33
B (m)	196.22
H (m)	1.8
$v \left(\frac{m^2}{d} \right)$	0.0844

Tabla 4.4: Datos geométricos y de viscosidad de la laguna Facultativa 2

De los datos obtenidos de la prueba, se obtuvieron los siguientes parámetros que se presentan en la Tabla 4.5, los cuales pueden sugerir el funcionamiento de la laguna en la realidad.

Volumen de la laguna (m^3)	228982.728
Tiempo de residencia nominal t_n (días)	5.221
Fluorescencia inicial ($\frac{\mu g}{l}$)	2.012
Masa de Rodamina al 20 % (g)	2224.600
Caudal Promedio ($\frac{l}{s}$)	507.614
$\sum A_i$	12094.871
$\sum A_i * t_{mi}$	52999.178
$\sum A_i * t_{mi}^2$	352354.012
Tiempo medio de residencia t_m (días)	4.382
Varianza (σ^2)	9.931
Rodamina recuperada %	83.28 %
Varianza a dimensional $\sigma \tau^2$	0.517
Factor de dispersión d	0.416
Coeficiente de dispersión D ($\frac{m^2}{h}$)	1662.966
Volumen efectivo e	0.839

Tabla 4.5: Resultados de la prueba de trazadores en la laguna Facultativa 2

En la Tabla 4.6 observamos el coeficiente de dispersión encontrado según las distintas fórmulas sugeridas por la literatura.

Los datos obtenidos nos dicen que:

- ✓ **Volumen efectivo:** La Fórmula 2.14 obtuvo un valor de 0.720 y el valor de campo es de 0.839, por lo que se puede decir que la fórmula si predice el volumen efectivo que



Factor de dispersión d	
Polprasert and Batharai (ecuación 2.8)	0.085
Aguwamba (ecuación 2.9)	0.847
Yanez (ecuación 2.10)	0.284
Von Sperling (ecuación 2.11)	0.303

Tabla 4.6: Coeficientes de dispersión obtenidos de la literatura (Facultativa 2)

se da en la laguna. Este valor de 0.839 sugiere que el 84% del volumen de la laguna está trabajando mientras que el 16% se encuentra inactivo.

- ✓ **Dispersión:** De las fórmulas propuestas para predecir el número de dispersión la que mejor llegó a predecir el número de dispersión fue la Formula 2.11, la misma que dio un valor de 0.302 frente a un valor de campo de 0.416, la diferencia entre ambas cantidades no es significativa. Este valor de 0.416 al ser mayor a 0.01 nos indica que lo que sucede en la entrada o salida del reactor afecta ampliamente la forma de la curva del trazador. Con respecto al coeficiente de dispersión D cuyo valor es $1662.966 \text{ m}^2 \text{ h}^{-1}$ implica un D grande, por lo tanto la curva del trazador tiene una rápida dispersión (Levenspiel, 1999).
- ✓ **Recuperación de rodamina:** El volumen de rodamina recuperada fue de 83.28%, una cantidad suficiente para que el ensayo sea considerado válido.

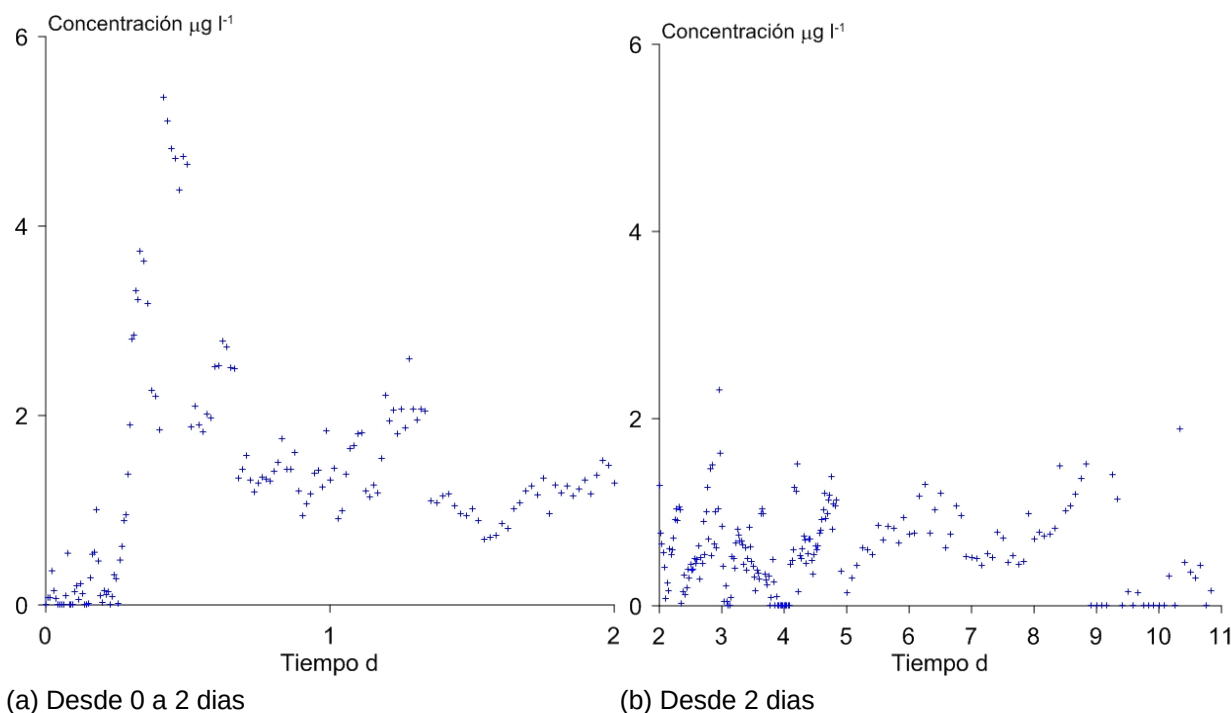


Figura 4.2: Curva concentración versus tiempo de la Facultativa 2

Descripción de la Figura 4.2: En esta figura se observa claramente que llega a un pico máximo de 5.29 µg l^{-1} a las 10 horas después de haber iniciado la prueba, para descender



hasta $1.70 \mu\text{g l}^{-1}$ a las 13 horas, a partir de este punto empieza a oscilar entre valores que van de 2.60 a $0.63 \mu\text{g l}^{-1}$ a las 50 horas, finalmente desciende hasta valores de 0 y máximos de $2.31 \mu\text{g l}^{-1}$ hasta la finalización

La forma de la curva C vs t es alargada (Yanez, 2003), ya que crece hasta un máximo (pico), y luego desciende de forma brusca a partir del cual presenta picos que son de valor inferior al máximo inicial, este tipo de curva es típico de sistemas que presentan cortocircuitos. Según el número de dispersión ($d=0.416$) este sistema es disperso, la caída brusca del pico de la laguna nos indica un cortocircuito, posiblemente debido a un sistema recirculatorio bien marcado en la laguna.



4.3 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN EN EL CFD

4.3.1 INTRODUCCIÓN

Las simulaciones se corrieron según los parámetros y procedimiento explicados en el Capítulo 3, en un computadora que posee las siguientes características:

Sistema Operativo: Windows 7 con sistema operativo de 64 bits.

Procesador: Inter (R) Core (TM) I7 CPU 860 @ 2.8 Ghz 2.79 Ghz.

Memoria RAM: 4 GB.

En la presente sección se presenta un análisis de los datos obtenidos de las simulaciones en el CFD. Además de analizarse las condiciones que son validas para representar la superficie de la laguna como son la condición wall y symmetry.

Los resultados obtenidos son representados gráficamente mediante las herramientas del software FLUENT, las gráficas que se obtienen son:

- ✓ Perfil de velocidades.
- ✓ Vectores de velocidad.
- ✓ Animación del recorrido del trazador a lo largo de la laguna.

A través del uso de los monitores se controlaron los siguientes datos:

- ✓ Concentración del trazador a la salida de la laguna.
- ✓ Velocidad a la entrada de la laguna con el fin de controlar que se cumpla la curva de velocidades.

4.3.2 FACULTATIVA 1

Se realizaron dos simulaciones de esta laguna, las cuales se diferencian en la asignación de condiciones de frontera y el tipo de solución en FLUENT. A continuación se describen cada una de ellas.

Primera simulación: Las condiciones de frontera que se asignaron fueron: "*velocity inlet*".^{en} la cara de entrada, "*outflow*".^{en} la cara de salida, y al resto de caras se asignó por defecto la condición "*wall*". La simulación del modelo fue ejecutada bajo un régimen no estacionario "*Unsteady*" hasta que la solución convergió. Sobre éste último resultado se procedió a realizar la simulación del paso del trazador.



Segunda simulación: Las condiciones de frontera que se asignaron a la laguna fueron: "*velocity inlet*".^a la cara de entrada, "*outflow*".^a la cara de salida, "*symmetry*".^a las caras que representan la superficie del agua y al resto la condición "*wall*". Para comenzar la simulación en el FLUENT, se comenzó con la solución "*Steady*" hasta que convergió y a partir de esta se le colocó el tipo de solución "*Unsteady*" hasta que el modelo llegó a la convergencia.

La simulación con la condición "*wall*" implica que el líquido se encuentra totalmente confinado, mientras que con la condición "*symmetry*", la laguna presenta la superficie del agua se totalmente libre. Ninguna de las dos condiciones es verdadera en la realidad, ya que el viento y la lluvia pueden ejercer un confinamiento, pero estos efectos pueden desaparecer hasta estar en una total calma lo cual se asemejaría a la condición "*symmetry*". Las curvas *C* vs *t* obtenidas en la simulación en el CFD tanto con la condición "*symmetry*" con la condición "*wall*", se muestran en la Figura 4.3.

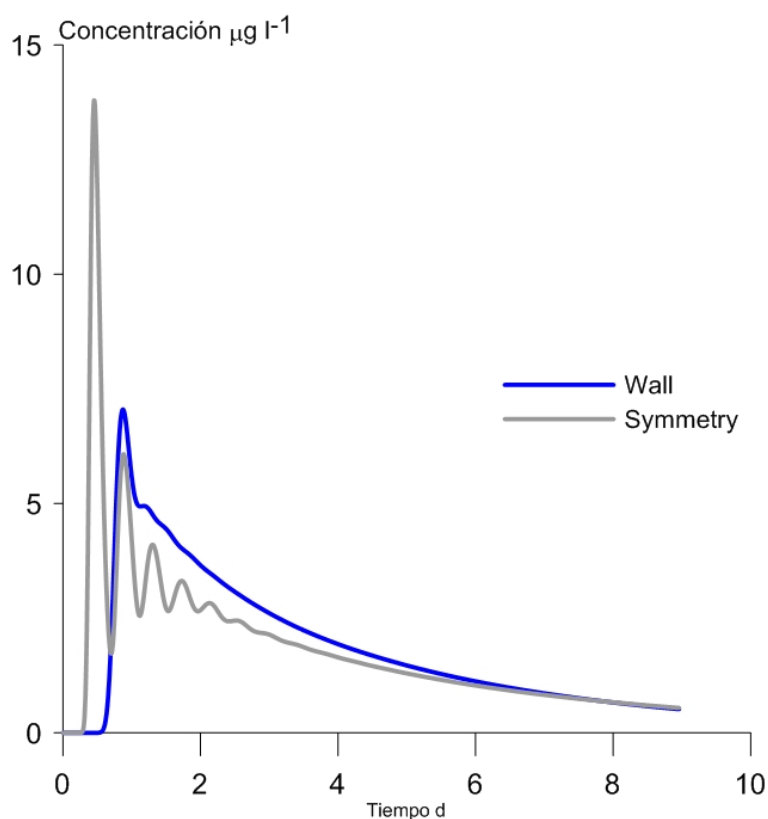


Figura 4.3: Curvas *C* vs *t*, condición wall y condición symmetry (Facultativa 1)

En la Figura 4.3 observamos que para la condición "*symmetry*".^{el} pico de la curva resulta de una magnitud mayor al pico que se obtiene con la condición "*wall*", ya que con la primera condición el agua posee mayor libertad para desplazarse, mientras que con la otra se encuentra confinada y por ende con menos capacidad para desplazarse. Posterior a la aparición del pico de la curva "*symmetry*", la concentración tiende a caer para posteriormente oscilar durante un periodo semejante a 43 horas, mientras que con la condición "*wall*", llega al pico, desciende, se mantiene constante durante un corto periodo de tiempo para terminar con valores semejantes a cero.



A partir de estas dos simulaciones se obtuvieron dos series de datos de prueba de trazadores (C vs t), con las cuales se realizó un promedio teniendo de esta forma una serie de datos promedio.

Se procesaron estos datos calculando los parámetros estadísticos que comparen cuantitativamente cuál de las condiciones de frontera utilizadas se asemeja mejor a los datos obtenidos en campo, para posteriormente utilizarlos en la validación. Los parámetros encontrados se resumen en la Tabla 4.7.

	Primera simulación	Segunda simulación	Promedio de simulaciones	Valor ideal
Error de raíz promedio de cuadrados (RMSE)	2.115	1.816	1.506	0.000
Coeficiente de correlación (R^2)	0.184	0.448	0.487	1.000
Coeficiente de eficiencia (EF)	-0.042	0.232	0.471	1.000
Error absoluto promedio (MAE)	1.325	1.127	1.010	0.000

Tabla 4.7: Parámetros estadísticos entre datos de campo, wall, symmetry y combinación wall symmetry (Facultativa 1)

Para estas series de datos la diferencia entre los datos y su respectiva media tienen variación por lo que se puede concluir que el coeficiente de correlación se puede utilizar con seguridad para el presente caso (Figura 4.4).

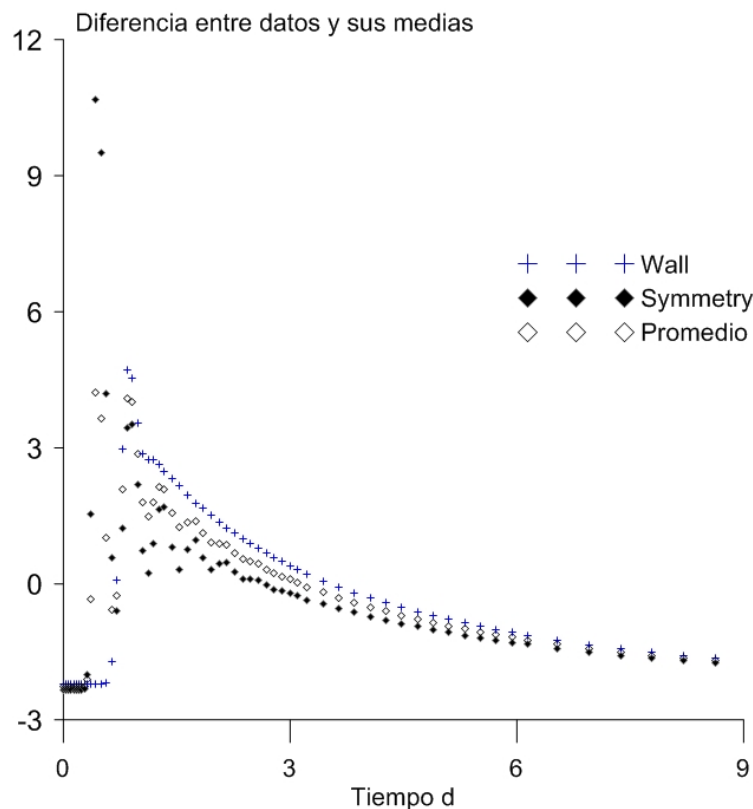


Figura 4.4: Diferencia entre los valores de las variables y sus medias de la Facultativa 1

En la Tabla 4.7, se observó que el promedio de las simulaciones con la condición "wall/z" "symmetry" son un mejor ajuste de los datos en campo, lo que puede sugerir que la solución



se encuentra en un punto intermedio entre estas dos soluciones. La incorporación del viento como condición de frontera ciertamente mejoraría la respuesta del modelo; sin embargo, la gran variabilidad de este parámetro a lo largo de la laguna (casi 700 metros de largo) implicaría una gran dificultad al momento de incorporarlo y además una mucho mayor demanda computacional del modelo.

Al ser el RMSE un indicador de la cercanía de los datos simulados respecto de los observados, un valor de 1.51 es considerado alto por lo que se podría concluir que la predicción de los datos de campo no es adecuada para un análisis de toda la curva.

El coeficiente de correlación es de 0.49, para este parámetro 1 es una predicción perfecta del modelo, este valor indicaría una predicción aceptable del modelo considerando las limitaciones de incorporación de parámetros meteorológicos y los errores en la recolección de los datos experimentales.

El valor del coeficiente de eficiencia no difiere en gran medida del coeficiente de correlación, su valor de 0.47 indica que la diferencia en los promedios y variaciones en los datos simulados y observados es aceptable.

Como se mencionó en el capítulo de revisión bibliográfica, el error de raíz promedio de cuadrados (RMSE) es generalmente mayor al error absoluto promedio (MAE), siendo el primero 1.51 y el segundo 1.01 diferenciándose por 0.5 lo cual se puede considerar que no es una diferencia significativa entre los parámetros. El valor de 1.01 indica que la diferencia entre los valores de campo y los predichos a través del modelo es de 1 ppb.

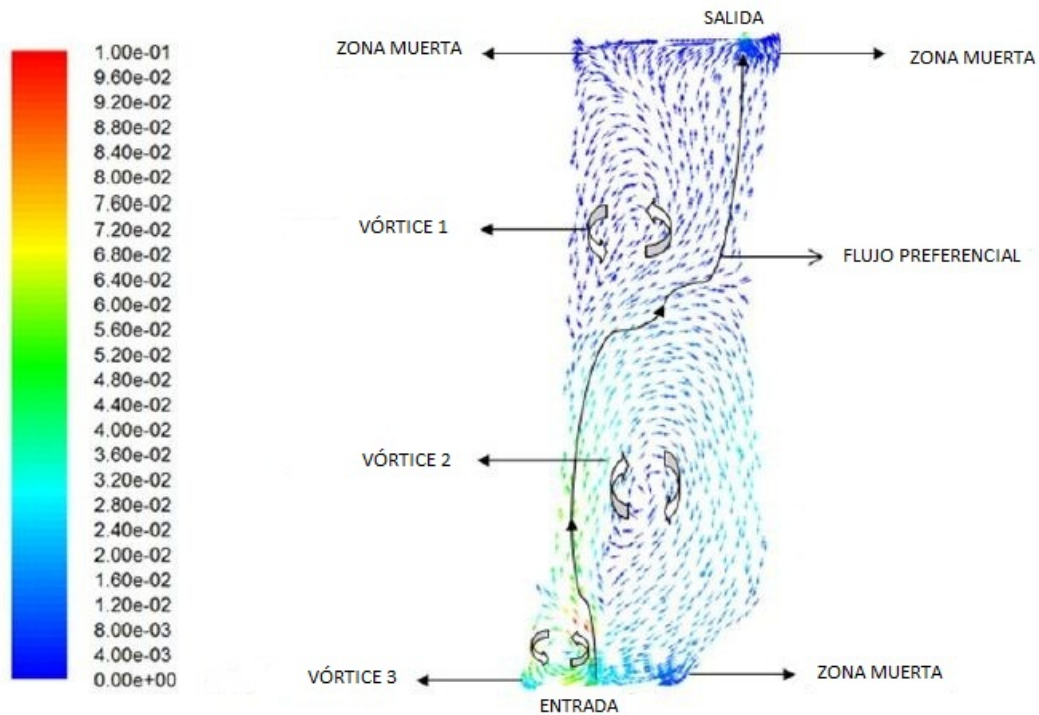
La simulación computacional de esta laguna en todas las etapas descritas fue de 45 días.

Descripción de los resultados de CFD de la laguna Facultativa 1

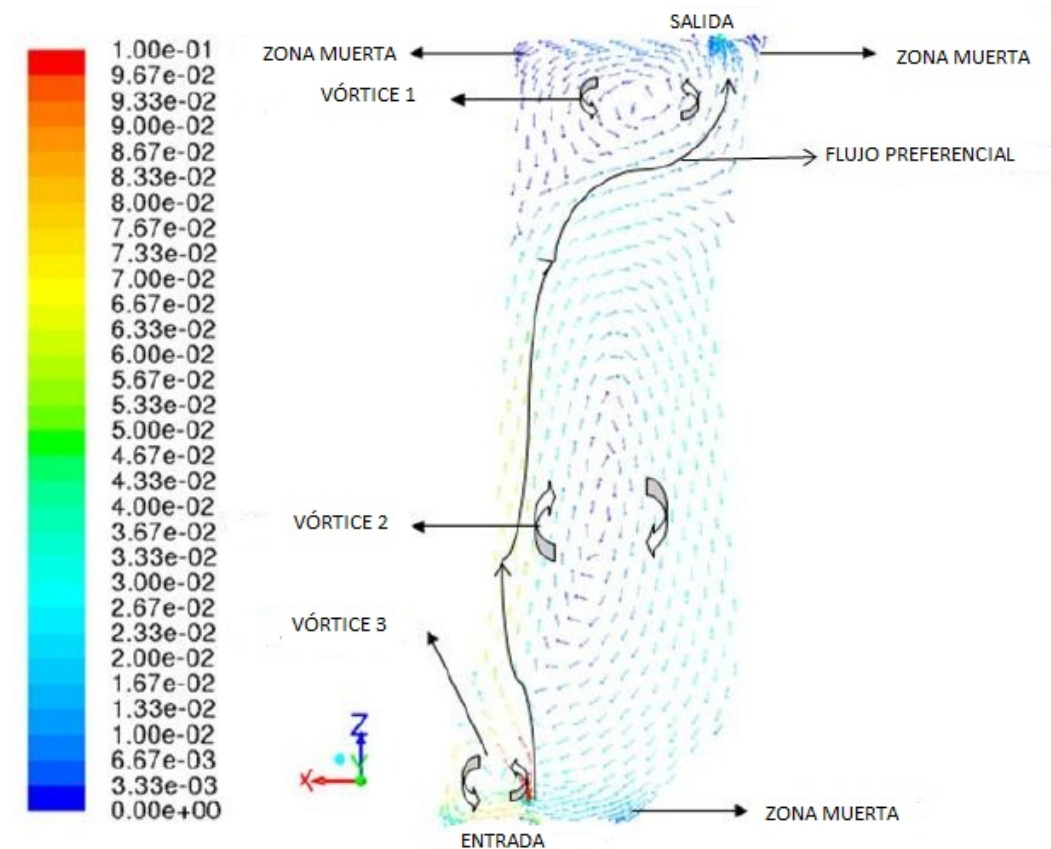
A continuación se presentan las figuras correspondientes al contorno de velocidades y los vectores de velocidad de la simulación con la condición "wall" (Figuras 4.5a y 4.6a) y la condición "symmetry" (Figuras 4.5b y 4.6b). Estas figuras se obtuvieron gracias al uso de las herramientas del software FLUENT 6.3.26 que permitió realizar una descripción de la hidráulica de la laguna.

Considerando la Figura 4.5, una primera observación en común en las dos simulaciones es que la laguna presenta tres cortocircuitos, los cuales se localizan junto a la entrada de la laguna, en el cuerpo de la misma y el último hacia la salida de la laguna, además de tres esquinas de la laguna, (indicadas en la Figura 4.5), son zonas muertas. Las diferencias que existen entre las simulaciones con las condiciones wall y symmetry se refleja en los cortocircuitos 1 y 2, tanto en su forma, extensión y localización. El vórtice 2 con la condición symmetry es más alargada que el de la condición wall y el vórtice 1 de la misma condición se encuentra ocupando todo el ancho de la laguna en el sector de la salida mientras que el vórtice 1 de condición wall se encuentra en el segundo tercio de la laguna (Tomando como referencia la entrada de la laguna). Además se puede observar que la entrada y la salida son zonas de alta turbulencia, indicadas por la magnitud y alta concentración de vectores en aquellas zonas.

En la Figura 4.5, se observó también que tanto con la condición symmetry como con la condición wall, la laguna tiende hacia un flujo preferencial similar, el cual parte de la entrada,

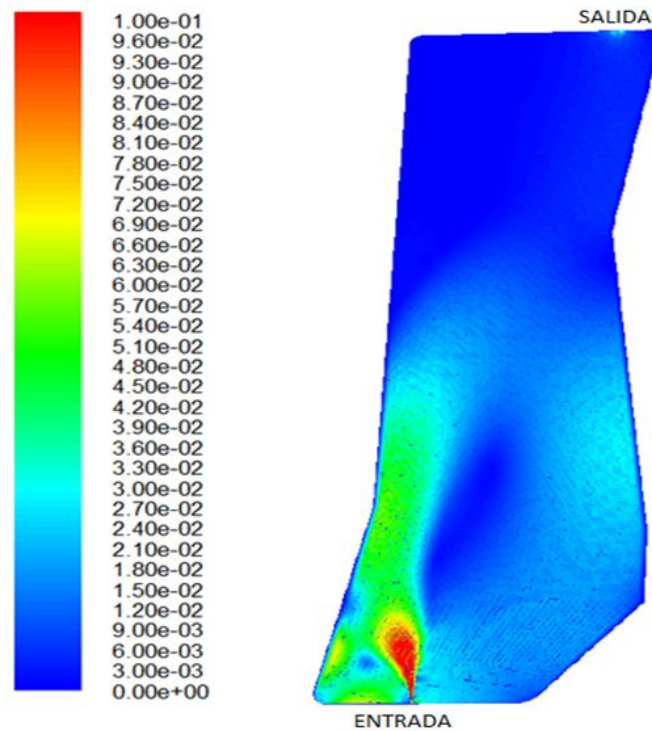


(a) Condición wall

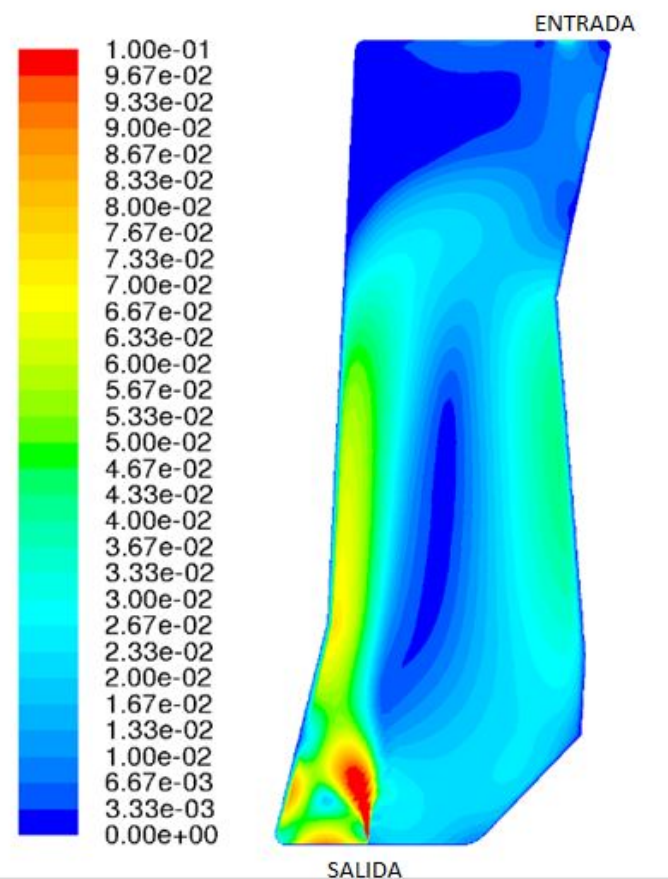


(b) Condición symmetry

Figura 4.5: Gráficos de vectores de velocidad de la simulación en la Facultativa 1



(a) Condición wall



(b) Condición symmetry

Figura 4.6: Gráficos de contorno de velocidades de la simulación en la Facultativa 1



se dirige hacia la izquierda de la laguna hasta que llega al vórtice 1 en el cual cambia la dirección hacia la derecha para posteriormente dirigirse a la salida.

En lo que respecta a los datos obtenidos del paso del trazador en el modelo CFD, se presenta en la Tabla 4.8 los datos obtenidos del trazador en la simulación (Datos promedios entre la condición "wallz symmetry", dicho promedio se sugirió que estadísticamente se adapta mejor a los datos del campo) frente a los datos de campo.

	Campo	CFD
Volumen de la laguna (m^3)	222870.586	222870.586
Tiempo de residencia nominal t_n (días)	3.709	4.990
Tiempo medio de residencia t_m (días)	2.612	3.130
Varianza (σ^2)	6.300	4.887
Varianza a dimensional ($\sigma\tau^2$)	0.923	0.499
Factor de dispersión (d)	4.096	0.390
Coefficiente de dispersión D ($\frac{m^2}{h}$)	27504.590	1844.723

Tabla 4.8: Datos de la prueba de trazadores Campo vs CFD de la Facultativa 1

De los datos mostrados se observó, que el modelo CFD planteado logra un acercamiento aceptable al tiempo de residencia medio de la laguna, el cual es de 2.612 días y lo que el CFD predice es de 3.130 días, el parámetro que no se predice de manera adecuada es el factor de dispersión (d), el cual en el campo resultó de 4.065 y en el CFD es de 0.390, esto puede ser ocasionado por la forma de la laguna que es irregular.

En la Figura 4.7, se muestra la curva C vs t de la prueba de trazadores obtenida en el campo y en el CFD, en esta curva lo que se distingue es que el modelo hace una aproximación aceptable de la prueba de trazadores en campo, ya que el pico del CFD ($6.83 \mu g l^{-1}$) es casi de la misma magnitud que el pico del campo ($7.26 \mu g l^{-1}$), el tiempo en que se aparece el pico es similar también (8 horas versus 10 horas). El modelo CFD predice la oscilación de valores en la concentración que se origina después del pico y su duración antes que los valores tiendan a descender. En el campo la variación permaneció alrededor de 35.3 horas, mientras que en el CFD alrededor de 29 horas. Finalmente, mediante la observación de los datos estadísticos de aproximación y de las formas de las curvas se encontró que el CFD se aproximó al flujo presente en la laguna Facultativa 1, mediante un promedio de las condiciones de frontera "wallz symmetry".

En la Figura 4.8 se muestra al lado izquierdo fotografías tomadas de la prueba de trazadores en la laguna Facultativa 1 y en el derecho las obtenidas por el modelo CFD. Se observa la semejanza ya que la simulación predice la forma de la mancha del trazador a medida que esta recorre la laguna. La comparación se realizó con fotografías capturadas durante los primeros minutos de la prueba, en los que la mancha de la rodamina fue perceptible a la vista. Se incluye aquí un agradecimiento especial al Sr. Ricardo Guerky de la Empresa ETAPA.

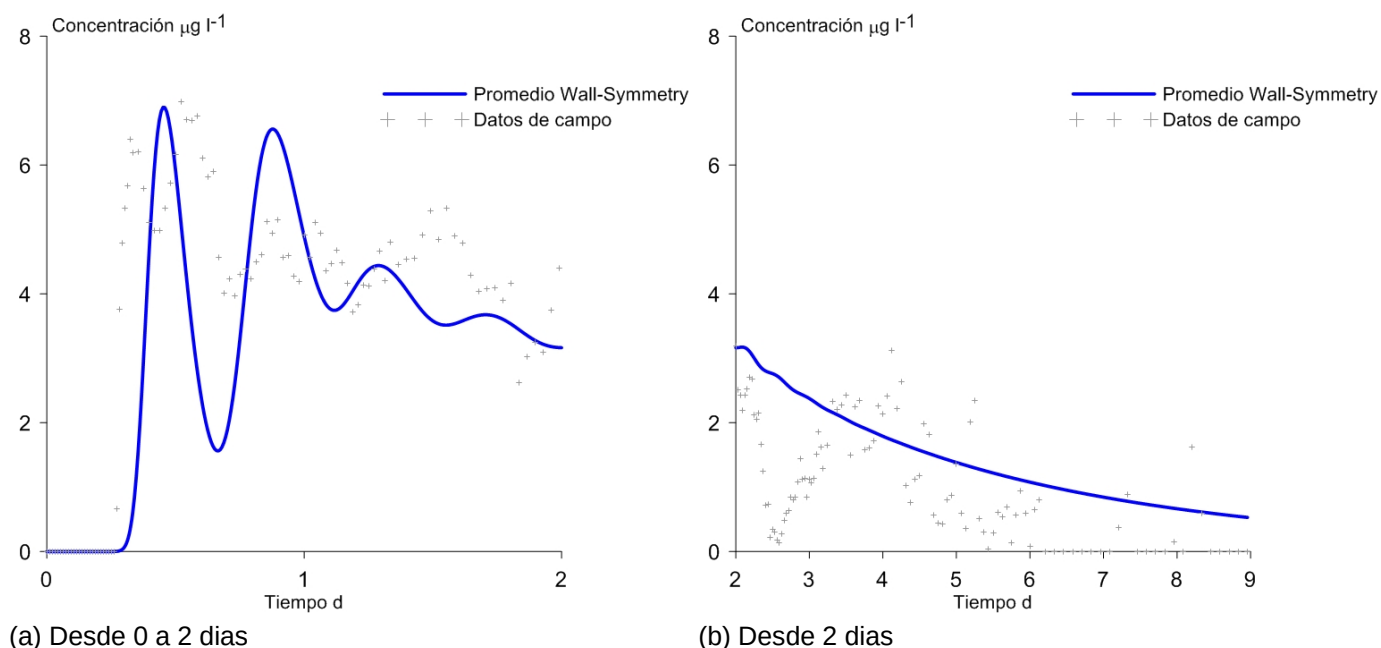


Figura 4.7: Curvas C vs t de datos de campo y de CFD de la Facultativa 1

4.3.3 FACULTATIVA 2

La simulación de la Facultativa 2 se realizó únicamente con la condición "symmetry" en vista de los resultados preliminares obtenidos en la laguna Facultativa 1. La simulación inició con régimen estacionario, seguido del régimen no estacionario inmediatamente luego de la convergencia. El inicio de la simulación fue el día viernes 10 de junio y concluyó el 1 de julio del 2011. Considerando la experiencia adquirida en el manejo de los tiempos de paso para la simulación y la disponibilidad de un sistema de alimentación de energía ininterrumpida por lo que el tiempo de simulación fue de 21 días.

En la Tabla 4.9 se va a realizar el análisis estadístico entre los datos de campo y los obtenidos mediante el CFD.

	CFD	Valor Ideal
Error de raíz promedio de cuadrados (RMSE)	2.096	0
Coeficiente de correlación (R^2)	5.76E-8	1
Coeficiente de eficiencia (EF)	-4.804	1
Error absoluto promedio (MAE)	0.972	0

Tabla 4.9: Parámetros estadísticos entre datos de campo y CFD (Facultativa 2)

Considerando que el indicador RMSE cuyo valor es de 2.1, se encuentra lejano al valor ideal que es 0, esto indica que los valores observados no se encuentran cercanos a los valores predichos por el modelo, por tanto, basados en el resultado de este parámetro el modelo no se ajusta de manera satisfactoria a los datos experimentales. El Coeficiente de correlación, muestra un comportamiento similar a RMSE.

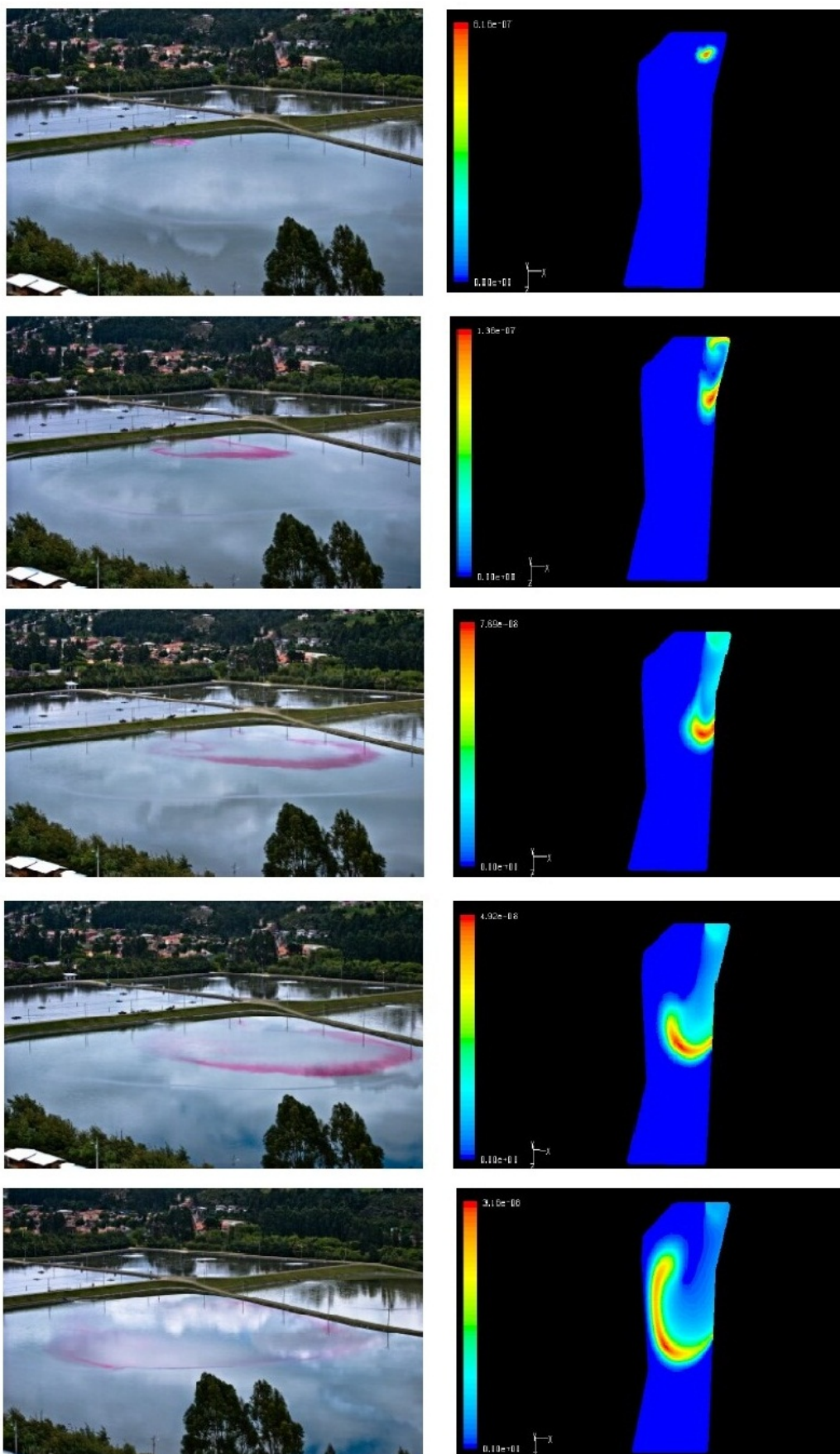


Figura 4.8: Simulación en CFD frente a prueba de campo

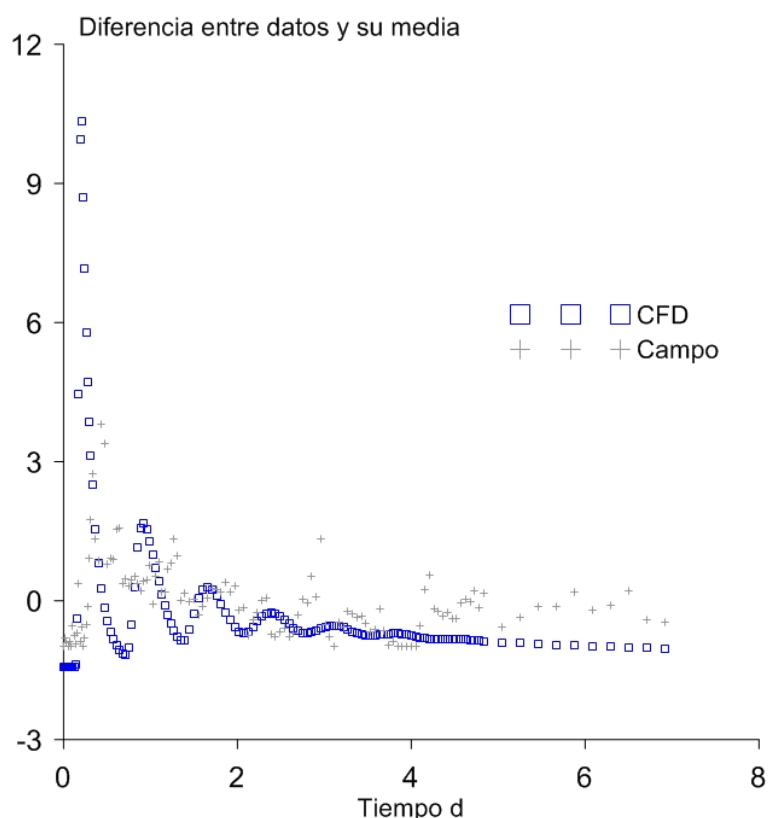


Figura 4.9: Diferencia entre los valores de las variables y sus medias de la Facultativa 2

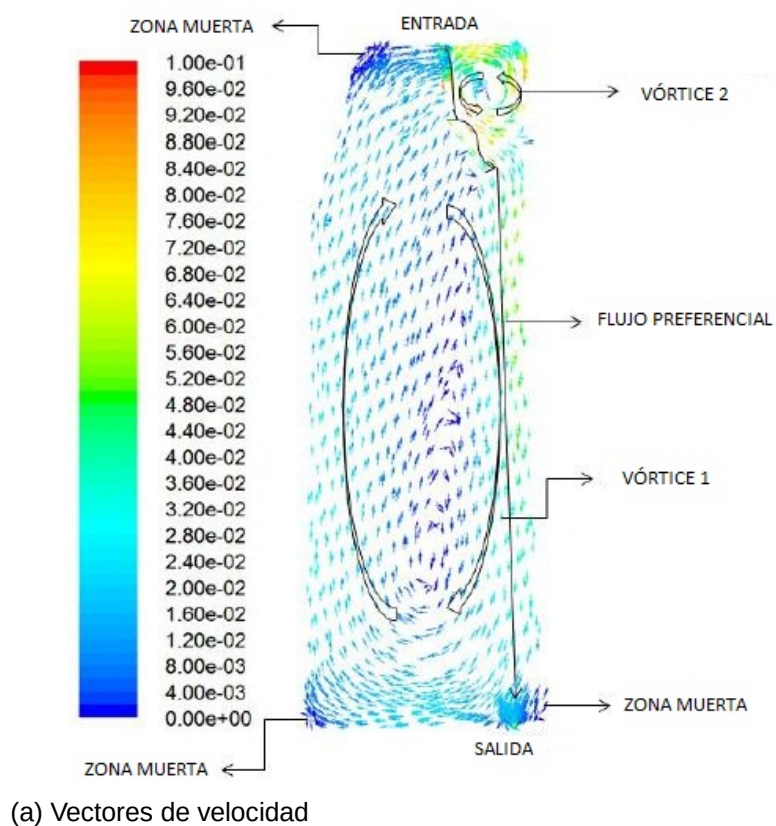
El valor del coeficiente de eficiencia -4.8 difiere en gran medida del valor ideal 1, por lo que este parámetro sugiere la existencia de valores extremos.

El valor de 0.972 del parámetro MAE indica que la diferencia entre los valores de campo y los predichos a través del modelo es de 1 ppb.

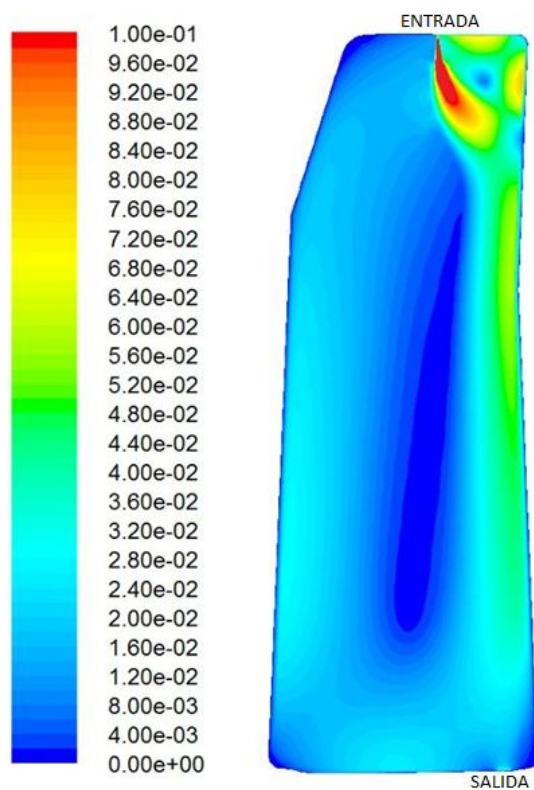
Descripción de los resultados de CFD de la laguna Facultativa 2

Mediante la Figura 4.10, se describe la respuesta hidráulica de la laguna Facultativa 2 de acuerdo a la simulación del modelo CFD. En el gráfico de vectores de velocidad (Figura 4.10a) identificamos dos vórtices, el vórtice 2, al igual que en la Facultativa 1, se presenta en la esquina junto a la entrada y el vórtice 1 es de gran tamaño ocupando las dos terceras partes de la laguna. Además se identificaron 3 zonas muertas que se ubican en las esquinas de la laguna y se puede observar que la entrada y la salida son zonas de alta turbulencia, estas se identifican por la alta concentración de vectores en aquellas zonas. El flujo preferencial de la laguna parte desde la entrada, se dirige hacia la derecha y continua hasta llegar a la salida.

Con respecto al contorno de velocidades que nos indica la Figura 4.10b, se observa que la laguna tiene altas velocidades en la entrada y se mantienen relativamente altas hasta los dos tercios de la misma, el resto de la laguna se mueve a una velocidad baja, diferenciándose en las esquinas zonas muertas, donde las velocidades son prácticamente cero.



(a) Vectores de velocidad



(b) Contorno de velocidad

Figura 4.10: Gráficos de la simulación en la Facultadiva 2



En la Tabla 4.10 se presentan los datos obtenidos en el campo y por el CFD, lo que se observa, es que el modelo CFD, predice de una manera adecuada el tiempo de retención de residencia promedio, el cual es de 4.382 días en el campo y de 3.276 día en la simulación. En cuanto al factor de dispersión (d), el modelo no pudo aproximar su valor, dado que la dispersión de campo es de 0.416 y del CFD es de 1.553, lo cual era de esperarse ya que los parámetros estadísticos calculados indicaban que no era una buena aproximación a los datos de campo, sin embargo, conociendo los resultados de la facultativa 1, combinando los resultados de la simulación con condición "wall" condición "symmetry" se tendría una mejor aproximación.

	Campo	CFD
Volumen de la laguna (m^3)	228981.728	228981.728
Tiempo de residencia nominal t_n (días)	5.221	5.258
Tiempo medio de residencia t_m (días)	4.382	3.276
Varianza (σ^2)	9.931	8.754
Varianza a dimensional ($\sigma\tau^2$)	0.517	0.816
Factor de dispersión (d)	0.416	1.553
Coefficiente de dispersión D ($\frac{m^2}{h}$)	1662.966	8304.995

Tabla 4.10: Datos de la prueba de trazadores Campo vs CFD de la Facultativa 2

En la Figura 4.11, se muestra la curva C vs t de la prueba de trazadores en campo y de la simulación en el CFD de la laguna Facultativa 2. En la misma se observa que el tiempo que tarda en presentarse la máxima concentración en el CFD es de 5 horas llegando a un valor de $12.075 \mu g l^{-1}$. Por el contrario, los datos experimentales muestran que el pico tardó 10 horas en presentarse y llegó a $5.362 \mu g l^{-1}$. Posteriormente las dos curvas descienden manteniendo una oscilación de concentraciones que en el CFD duran aproximadamente 74 horas, mientras que en la prueba de campo la oscilación se extiende hasta el fin de la prueba.

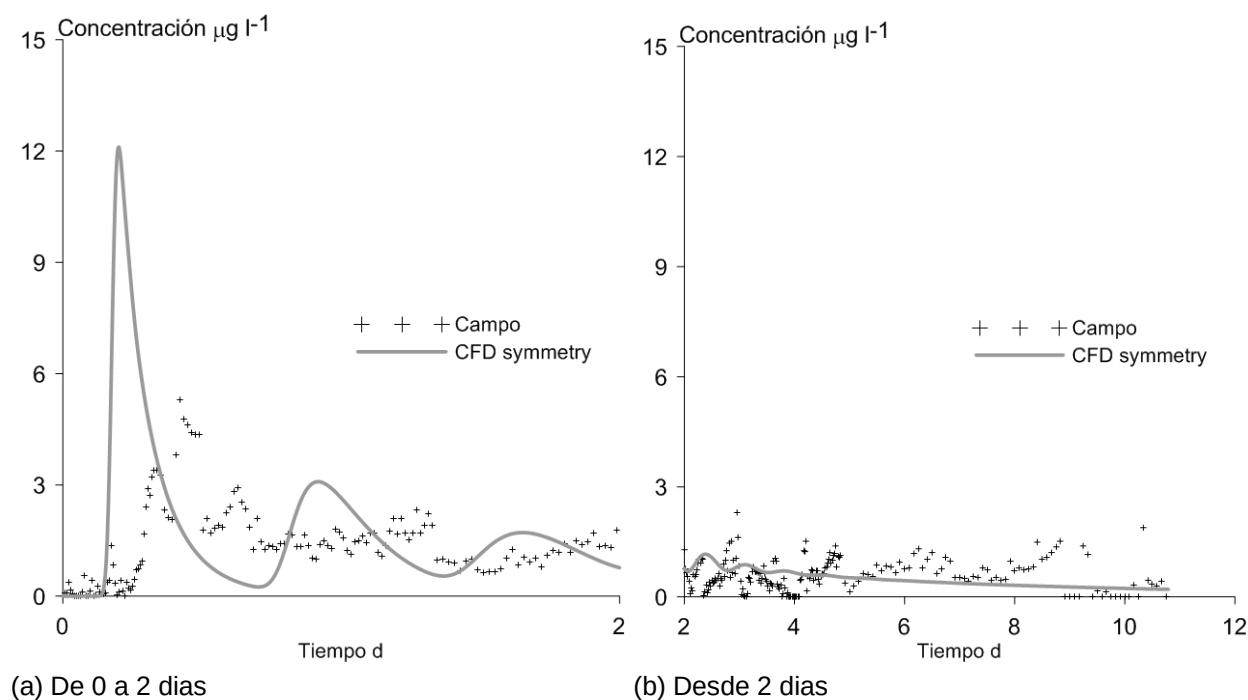


Figura 4.11: Curvas C vs t de datos de campo y de CFD de la Facultativa 2

4.4 COMPARACIÓN ENTRE LOS DATOS OBTENIDOS DE LAS LAGUNAS FACULTATIVA 1 Y FACULTATIVA 2

4.4.1 INTRODUCCIÓN

En la presente sección se compararán los datos obtenidos de la prueba de trazadores en las lagunas facultativas de la PTAR Ucubamba, así como, se analizarán si estos parámetros obtenidos son diferentes a los parámetros de diseño. Los parámetros de diseño fueron facilitados por el Ing Galo Durazno, Jefe de la PTAR Ucubamba (Yáñez, 1989).

4.4.2 COMPARACIÓN DE LOS DATOS DE CAMPO, CFD Y DISEÑO

Los datos obtenidos de la prueba de trazadores, en la simulación CDF y los parámetros de diseño se presentan en la Tabla 4.11, tanto de la Facultativa 1 como de la Facultativa 2. Los parámetros de diseño son los mismos para las dos lagunas.

Analizando el tiempo de residencia (t_m), la laguna Facultativa 2 con un t_m igual a 4.382 días se acerca más al valor de diseño (4.777 días) que la laguna Facultativa 1 cuyo valor es de 2.612 días. En cuanto a la dispersión sucede algo similar, ya que en la Facultativa 2 se tiene un d igual a 0.416 que se acerca mejor a la dispersión de diseño que es de 0.292, mientras que la Facultativa 1 posee una dispersión de 4.096.

El alejamiento de los resultados de la Facultativa 1, se debe a la forma irregular que tiene la laguna, puesto que como se menciona en (Yáñez, 1993) existe una gran controversia en



	Facultativa 1		Facultativa 2		Diseño ¹
	Campo	CFD	Campo	CFD	
Tiempo medio de residencia t_m (días)	2.612	3.130	4.382	3.276	4.777
Varianza (σ^2)	6.300	4.887	9.931	8.754	
Varianza a dimensional ($\sigma\tau^2$)	0.923	0.499	0.517	0.816	
Factor de dispersión (d)	4.096	0.390	0.416	1.553	0.292
Coefficiente de dispersión D ($\frac{m^2}{h}$)	27504.590	2185.820	1662.966	8304.995	

Tabla 4.11: Parámetros de las lagunas

cuanto a la forma que deben tener las lagunas. También se observó como la forma influye en la condiciones de mezcla en el reactor (Polprasert y Bhattarai, 1985), ya que se observa la gran diferencia que existe entre la Facultativa 1 ($d=4.096$) y la Facultativa 2 ($d=0.416$). Comparando la Facultativa 1 y 2 se observa que la primera posee tres vórtices, mientras que la Facultativa 2 posee dos vórtices, esto se debe a que lagunas con formas irregulares contribuyen a la formación de vórtices (Mendoza, 2000).

En cuanto a la capacidad de predecir del CFD, se muestra que el tiempo medio de residencia entre las dos lagunas es similar y se aproxima al tiempo de residencia calculado con los datos de campo. No sucede lo mismo con la dispersión, en este caso el modelo que predijo mejor fue el de la Facultativa 2, sin embargo, esta aproximación no es muy buena como se lo comprobó mediante los parámetros estadísticos calculados en la sección anterior.

Considerando lo que se dice en (Shilton y Harrison, 2002), en el cual nos recomienda dividir los datos de tiempo para el tiempo medio de retención (t_m), puesto que esto hace que el tiempo sea adimensional, en el cual se recomienda dividir los datos de tiempo para el tiempo medio de retención (t_m), para que el tiempo sea adimensional, lo cual es útil cuando los estudios se comparan con diferentes caudales. Los resultados de realizar este proceso en los datos de campo se presentan en la Figura ??, la cual nos indica que en la laguna facultativa 1 el tiempo en que el trazador es evacuado de la laguna llega hasta 6 veces el tiempo de retención, mientras que en la laguna facultativa 2 llega únicamente hasta 2 veces el tiempo de retención, con lo cual se concluye que la laguna facultativa 2 tiene un mejor comportamiento hidráulico que la laguna facultativa 1, siendo un sistema con menos vórtices que la otra.



4.5 CONFIABILIDAD DE LA GRILLA

4.5.1 INTRODUCCIÓN

En la presente sección se analiza la demanda computacional así como la diferencia entre los datos obtenidos con los modelos CFD creados con un número diferente de elementos: 100000, 200000 y 400000. Se comparan los tiempos requeridos para la estabilización del modelo. Al tener una grilla más densa el modelo que contiene 400000 elementos será naturalmente el que ofrezca la solución más precisa; sin embargo, la demanda computacional crece significativamente. En consecuencia, el objetivo es encontrar un balance entre estas dos situaciones que permita concluir que una determinada solución matemática es satisfactoria en términos de precisión y demanda computacional.

Cabe recordar que la laguna en la que se hace este estudio es la laguna Facultativa 2, que tiene como condición de frontera symmetry para su superficie libre.

Los parámetros a analizar son velocidad, I , k y ϵ , dichos datos obtenidos fueron clasificados por el programa prueba.m, adicionalmente se analizaron los parámetros en superficie, a un tercio y a dos tercios de profundidad.

4.5.2 GRILLAS

En las Figuras 4.13, 4.14, 4.15 se muestra el mallado de las lagunas con 100000, 200000 y 400000 elementos, con el fin de que el lector pueda visualizar las diferencias en la densidad de las grillas analizadas.



En la Tabla 4.12 se muestra el número de elementos reales usados así como el factor forma del peor elemento.

Laguna	# de elementos	Factor forma del peor elemento
F2-100000	126168	0.485
F2-200000	229428	0.473
F2-400000	401820	0.514

Tabla 4.12: Características del mallado en las lagunas con 100000, 200000 y 400000



4.5.3 RESULTADOS DE LOS MODELOS CON DIFERENTES NUMEROS DE ELEMENTOS

Para la división de la laguna en volúmenes, se emplearon los mismos volúmenes usados para la discretización, en el caso de la entrada y la salida se fusionaron algunos para simplificar el proceso. En la Figura 4.16 se muestra esta división en donde:

Entrada: Volúmenes del 1 al 5.

Cuerpo: Volúmenes del 6 al 9.

Salida: Volúmenes del 10 al 14.

De la Figura 4.17 a la 4.19 , se muestra los valores de velocidad obtenidos a las diferentes profundidades de la laguna. Las Figuras que muestran los valores de los parámetros de turbulencia están en el Apéndice A.8 De la Figura A.23 a la A.31 .



Volumen	1/3	2/3	Superficie
1	12.70 %	12.08 %	12.03 %
2	3.26 %	8.27 %	9.91 %
3	25.51 %	25.15 %	25.27 %
4	3.89 %	2.39 %	2.00 %
5	13.10 %	12.37 %	12.34 %
6	9.53 %	9.42 %	9.31 %
7	7.86 %	8.58 %	8.71 %
8	17.44 %	17.30 %	17.24 %
9	15.57 %	15.80 %	15.88 %
10	30.71 %	27.38 %	26.14 %
11	57.38 %	57.36 %	57.59 %
12	123.41 %	135.06 %	140.69 %
13	77.83 %	77.35 %	77.49 %
14	101.92 %	113.20 %	116.93 %

Tabla 4.13: Diferencia en % de las lagunas de 100000 y 400000 con respecto a la velocidad

Volumen	1/3	2/3	Superficie
1	5.06 %	1.88 %	1.66 %
2	7.29 %	2.40 %	0.47 %
3	17.72 %	16.76 %	16.61 %
4	0.77 %	2.89 %	3.27 %
5	0.14 %	0.45 %	0.45 %
6	3.77 %	3.62 %	3.55 %
7	1.64 %	1.88 %	1.96 %
8	9.25 %	9.20 %	9.15 %
9	7.65 %	8.28 %	8.35 %
10	6.02 %	4.77 %	4.22 %
11	31.03 %	25.60 %	25.68 %
12	73.82 %	64.95 %	65.68 %
13	34.67 %	31.42 %	31.21 %
14	41.16 %	44.04 %	44.06 %

Tabla 4.14: Diferencia en % de las lagunas de 200000 y 400000 con respecto a la velocidad

En las Tablas 4.13 y 4.14 se observa la diferencia en % que existen entre las lagunas de 100000 y 200000 con la de 400000 en cuanto a la velocidad, los parámetros de turbulencia se encuentran en las Tablas A.10, A.11, A.12, A.13, A.14 y A.15 en el Apéndice A.8.



El análisis comparativo se realizó con la velocidad y la turbulencia que está representada por los tres parámetros ya mencionados. Se analizó la variación con respecto a la altura que tiene la laguna con 100000 y la de 400000 elementos, así como las zonas con mayor variación entre las mismas lagunas. La laguna con 200000 elementos se utilizó para identificar en que zonas se presentaron menores errores al aumentar el número de elementos.

Comparación entre los valores de velocidad de las lagunas de 100000 y 400000 elementos

El porcentaje de diferencia entre estas dos lagunas en cuanto a la velocidad no varía en gran medida con respecto a la profundidad, a excepción de los volúmenes 2 y 12. El volumen 2 corresponde a la entrada, por lo que se podía esperar una variación debido a que esta zona es la de más alta turbulencia. El % de diferencia a 1/3 de profundidad es 3.26%, a 2/3 de profundidad es 8.27% y en la superficie es 9.91%, estas diferencias se consideran no significativas.

El volumen 12 es una zona muerta, y se caracteriza por ser una zona con una alta variación entre las dos lagunas. A 1/3 de profundidad es 123.41%, a 2/3 de profundidad es 135.06% y en la superficie es 140.69%. Se observa que a medida que se acerca a la superficie la diferencia entre las dos lagunas incrementa en estos dos volúmenes. Es importante señalar que estos volúmenes no son zonas de especial interés en la laguna.

La variación entre las dos lagunas es baja en la zona de entrada que tiene una diferencia máxima de 16%, en el cuerpo se tiene un rango entre 7 y 17%, la salida es la que tiene zonas de gran diferencia, los volúmenes 10, 11 y 13 están en el rango del 30% al 70%, los volúmenes 12 y 14 tienen un rango entre el 100% y 140%, estos volúmenes se caracterizan por ser zonas muertas que se encuentran a un lado de la salida.

Comparación entre los valores de turbulencia de las lagunas de 100000 y 400000 elementos

El porcentaje de diferencia entre estas dos configuraciones en cuanto a la turbulencia tiene una variación con respecto a la profundidad, en general se vio que del volumen 1 al 9, la diferencia incrementa a medida a medida que llega a la superficie, y del volumen 10 al 14 el error disminuye a medida que nos acercamos a la superficie.

La zona con mayor porcentaje de variación al igual que el caso de la velocidad es la salida. En los tres parámetros se registran altas variaciones en esta zona en especial en los volúmenes 11, 12 y 13. Adicionalmente se presentan altas diferencia en los volúmenes 3 y 4.

Análisis de los datos de las laguna con 200000

Como era de esperarse, esta configuración presentó mejoras en cuanto a las diferencias observadas con la configuración de 400000. Con respecto a la velocidad esta configuración se asemeja más a la configuración de 100 000 elementos especialmente en la zona cercana a la salida de la laguna.



En cuanto a la turbulencia los volúmenes 3 y 4 de la entrada y en general los volúmenes de la salida mostraron mejoras significativas.

En definitiva de este análisis se puede concluir que densificando la grilla en la salida, en especial en los volúmenes 12 y 14 se puede mejorar la precisión del modelo. En caso de que la grilla no sea igualmente espaciada hacia abajo, se recomienda que del volumen 1 al 9 se realice una grilla más densa que en la superficie hasta $1/3$ de la profundidad, mientras que del volumen 10 al 14 se recomienda densificar la grilla desde el fondo hasta $2/3$ de la profundidad de la laguna.

Con respecto a la demanda computacional, se presenta en la Tabla 4.15, la cual fue resultado de los datos obtenidos de la simulación de las lagunas de 100000, 200000 y 400000.

# de elementos	Tiempo	Tiempo de simulación	Razón	Tiempo para 1 día de simulación
100000	22	4.14	0.188	5.31
200000	18	2.85	0.158	6.32
400000	29	2.85	0.098	10.18

Tabla 4.15: Demanda computacional

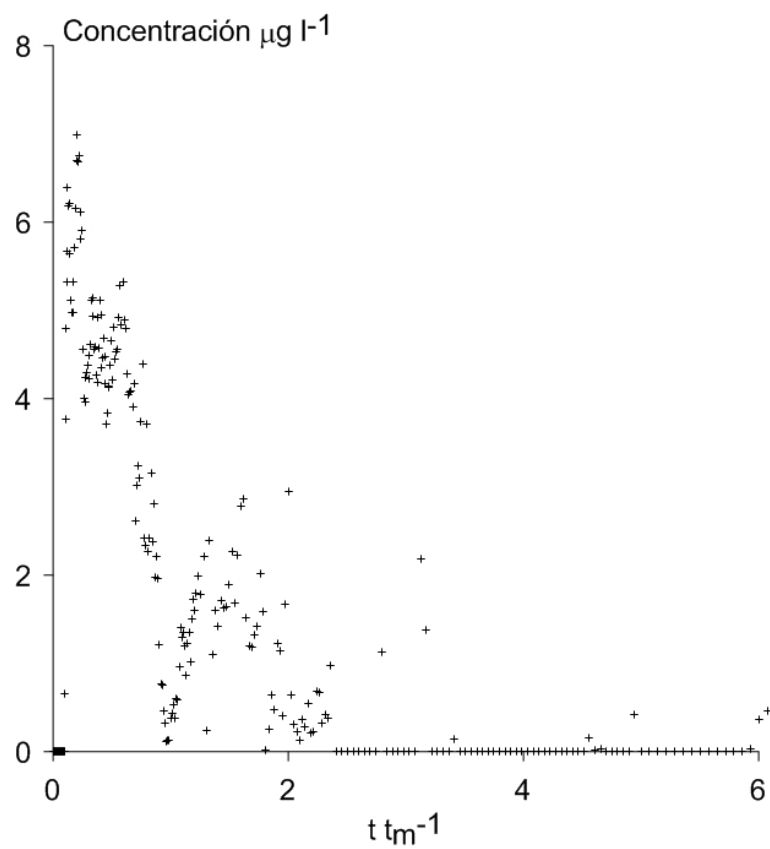
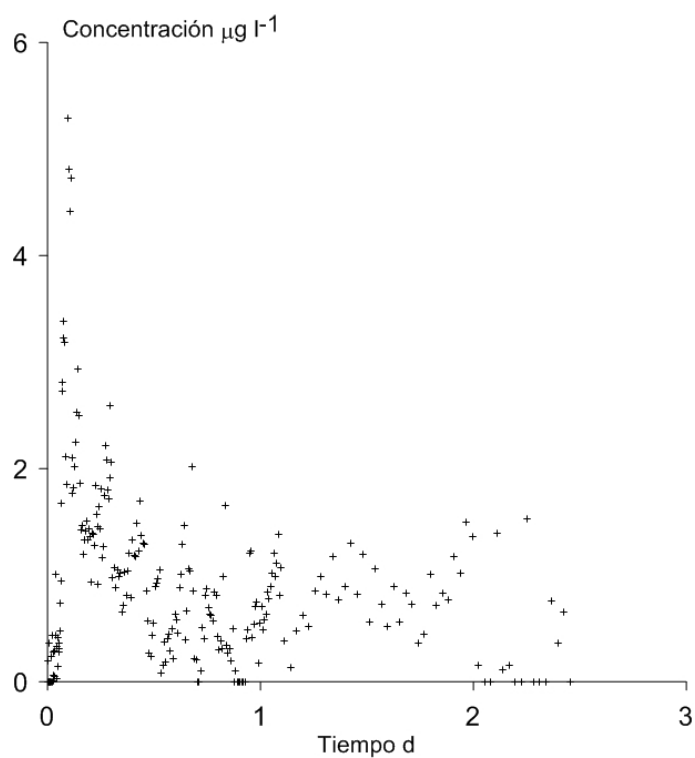
Lo que vemos en la Tabla 4.15, es que no existe una gran diferencia entre la laguna de 100000 y la de 200000 elementos, el tiempo requerido para un día de simulación solo se diferencia en un día entre las dos, sin embargo la diferencia llega a ser mayor cuando se compara la diferencia entre la de 100000 y la de 400000, la diferencia para un día de simulación para la laguna de 400000 elementos es el doble de la necesaria que para la de 100000 elementos. Lo recomendable para mejorar la precisión y evitar subir en exceso el tiempo de simulación es acercarse a los 200000 elementos densificando las áreas ya establecidas.

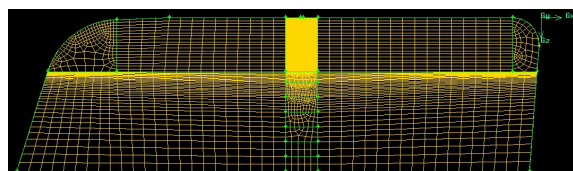
A continuación en la Figura 4.20 se presentan las gráficas a $1/3$ $2/3$ de profundidad y en superficie de la laguna Facultativa 2.

Lo que podemos concluir de la Figura 4.20, es que la distribución de las velocidades en la laguna no cambia con respecto a la profundidad.

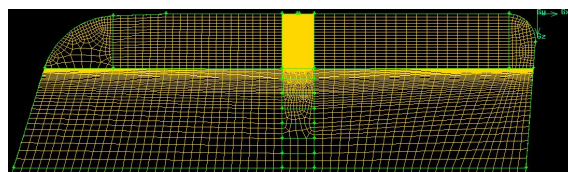
En la Figura 4.21 se ven los contornos de velocidades de la laguna Facultativa 2 con diferentes números de elementos:

Lo que observamos en la Figura 4.21 es que a medida que se densifica la grilla, la zona muerta en la sección media de la laguna se agranda.

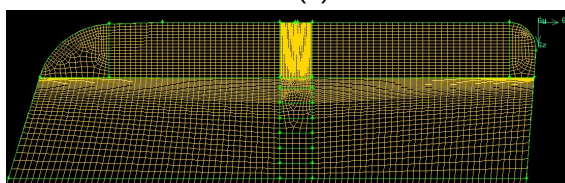
(a) Curva C vs t/t_m (Facultativa 1)(b) Curva C vs t/t_m (Facultativa 2)**Figura 4.12: Curvas C vs t/t_m**



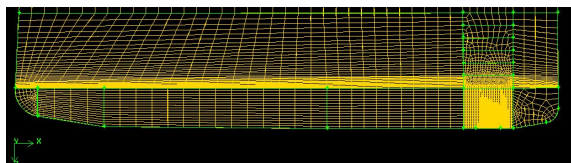
(a) Entrada F2 100000 elementos



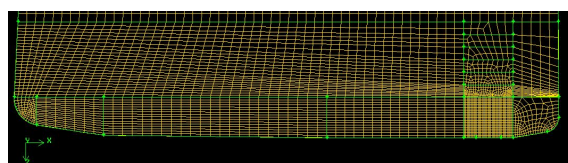
(b) Entrada F2 200000 elementos



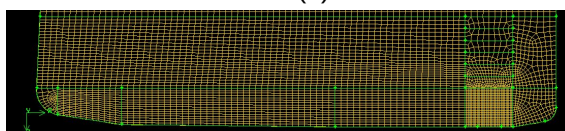
(c) Entrada F2 400000 elementos

Figura 4.13: Discretización de la entrada en lagunas con 100000, 200000 y 400000 elementos

(a) Salida F2 100000 elementos

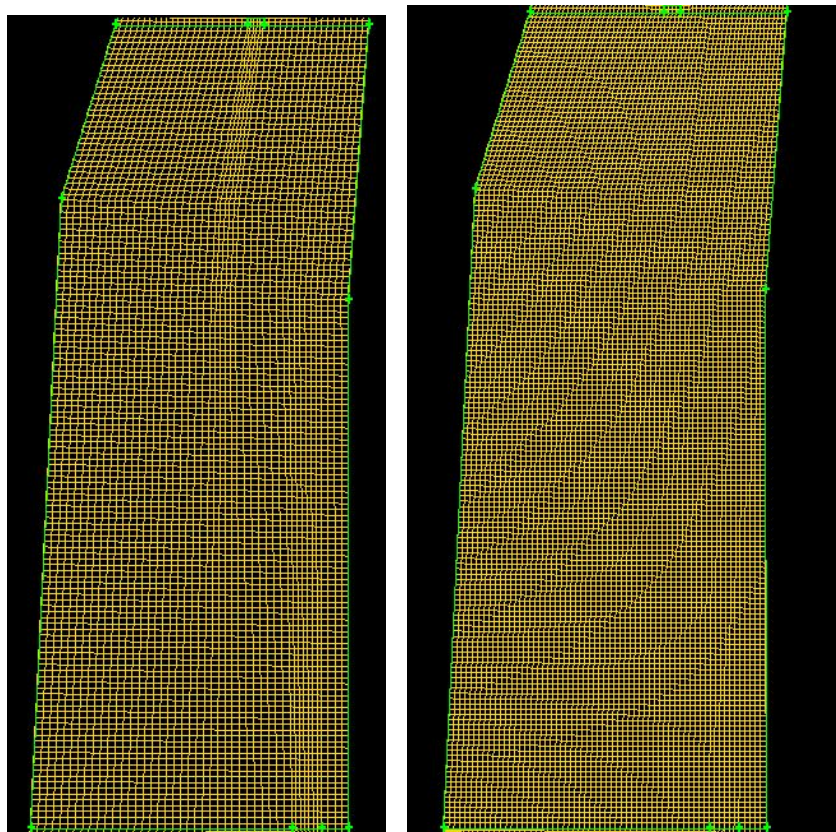


(b) Salida F2 200000 elementos

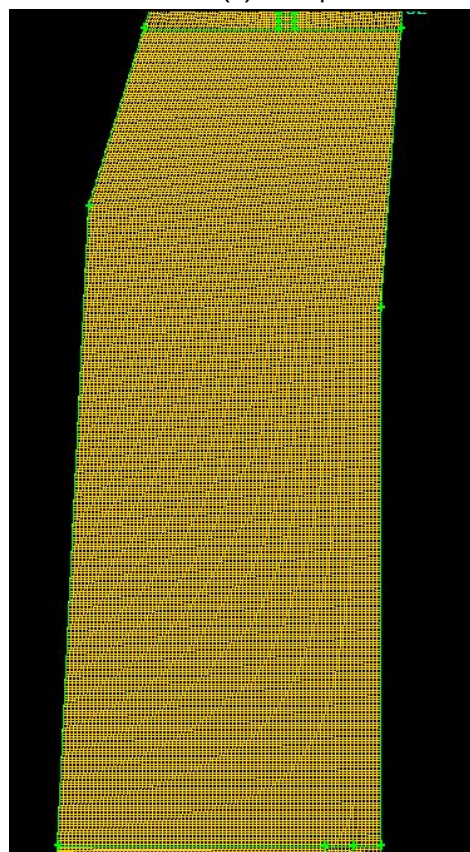


(c) Salida F2 400000 elementos

Figura 4.14: Discretización de la salida en lagunas con 100000, 200000 y 400000 elementos



(a) Cuerpo F2 100000 elementos (b) Cuerpo F2 200000 elementos



(c) Cuerpo F2 400000 elementos

Figura 4.15: Discretización del cuerpo en lagunas con 100000, 200000 y 400000 elementos

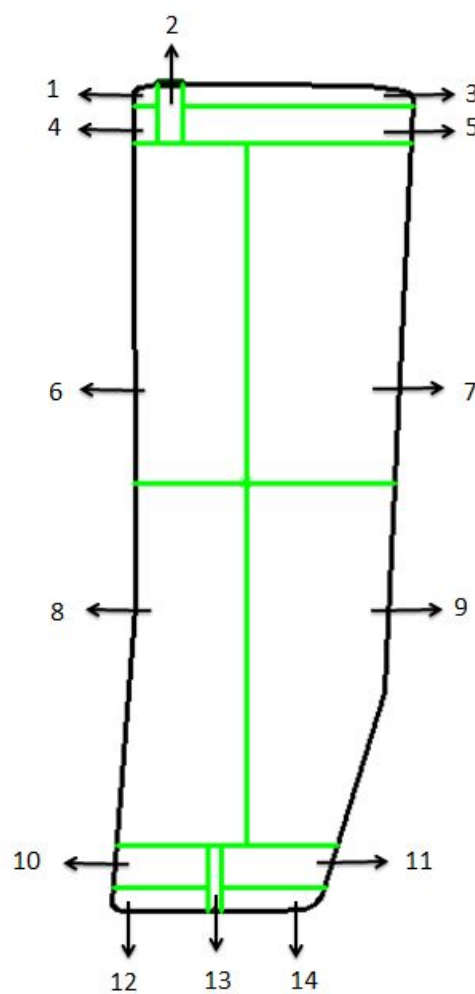


Figura 4.16: Division en volúmenes de la Facultativa 2 symmetry

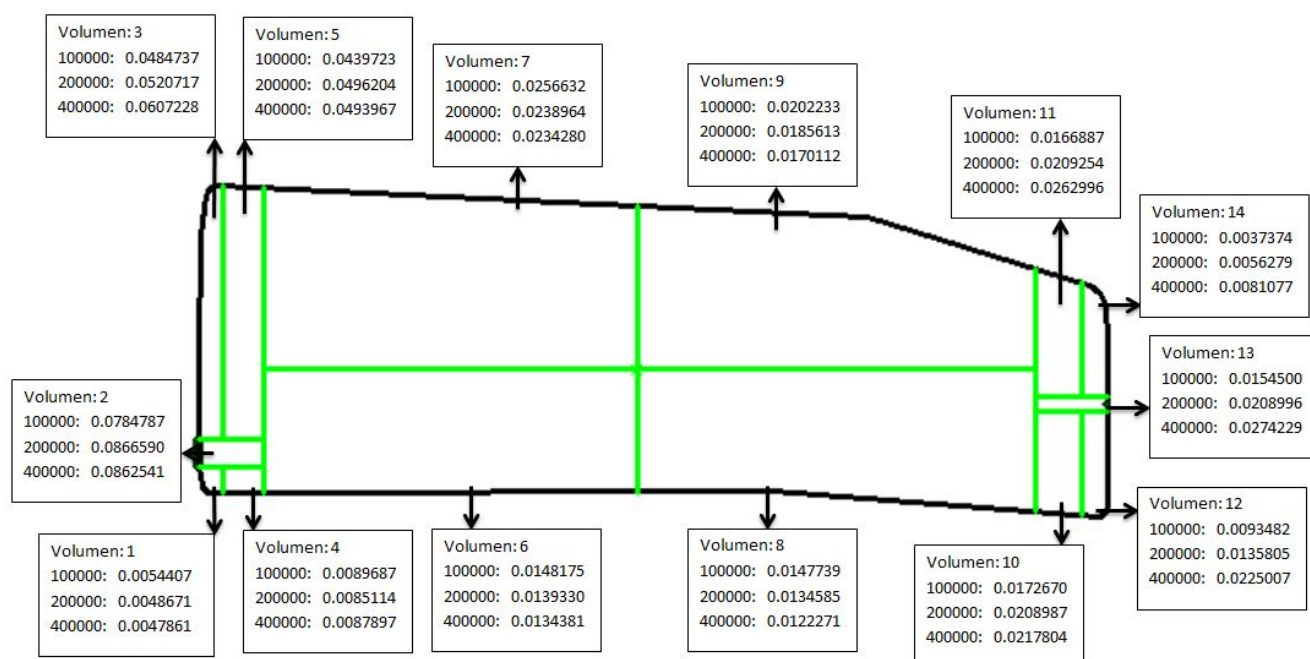


Figura 4.17: Promedio de velocidades en los volúmenes Superficie

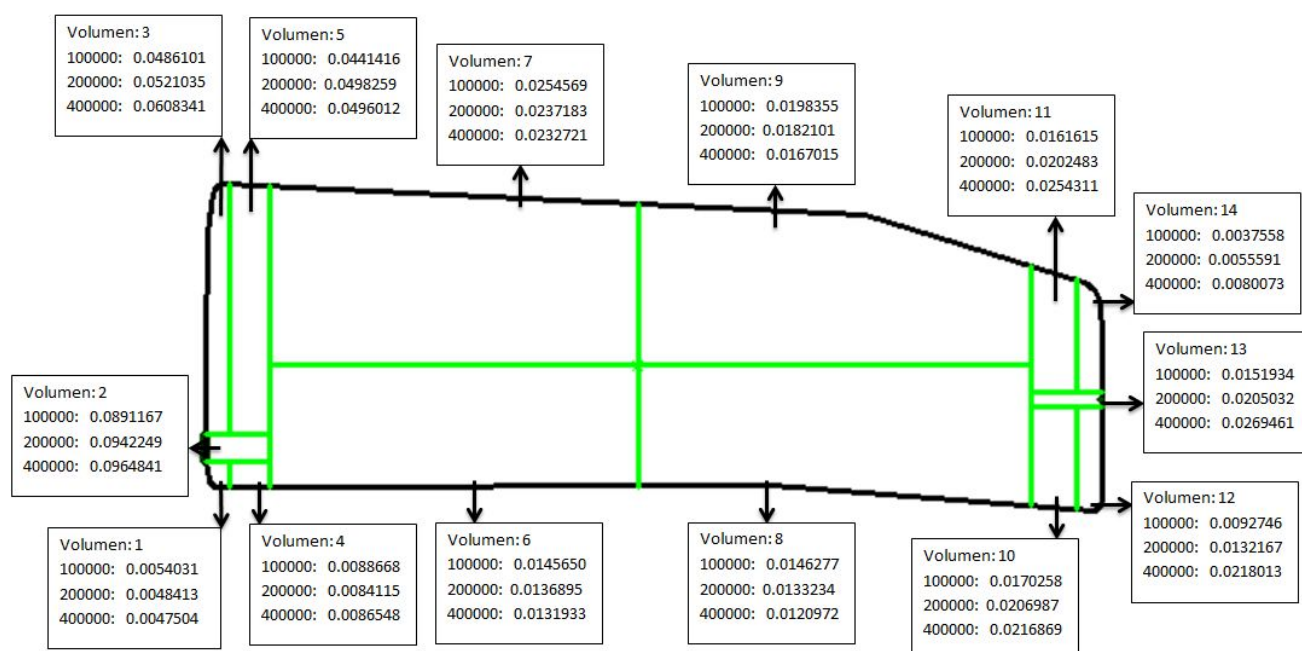


Figura 4.18: Promedio de velocidades en los volúmenes a dos tercios de profundidad

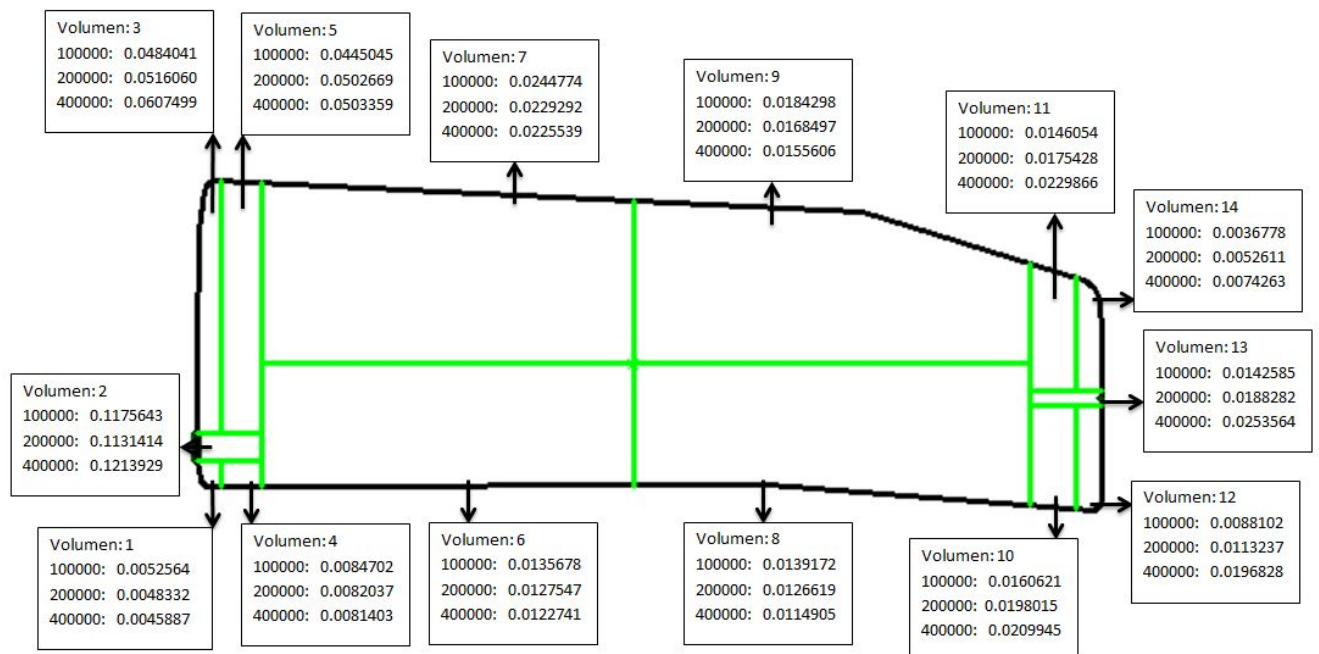


Figura 4.19: Promedio de velocidades en los volúmenes a un tercio de profundidad

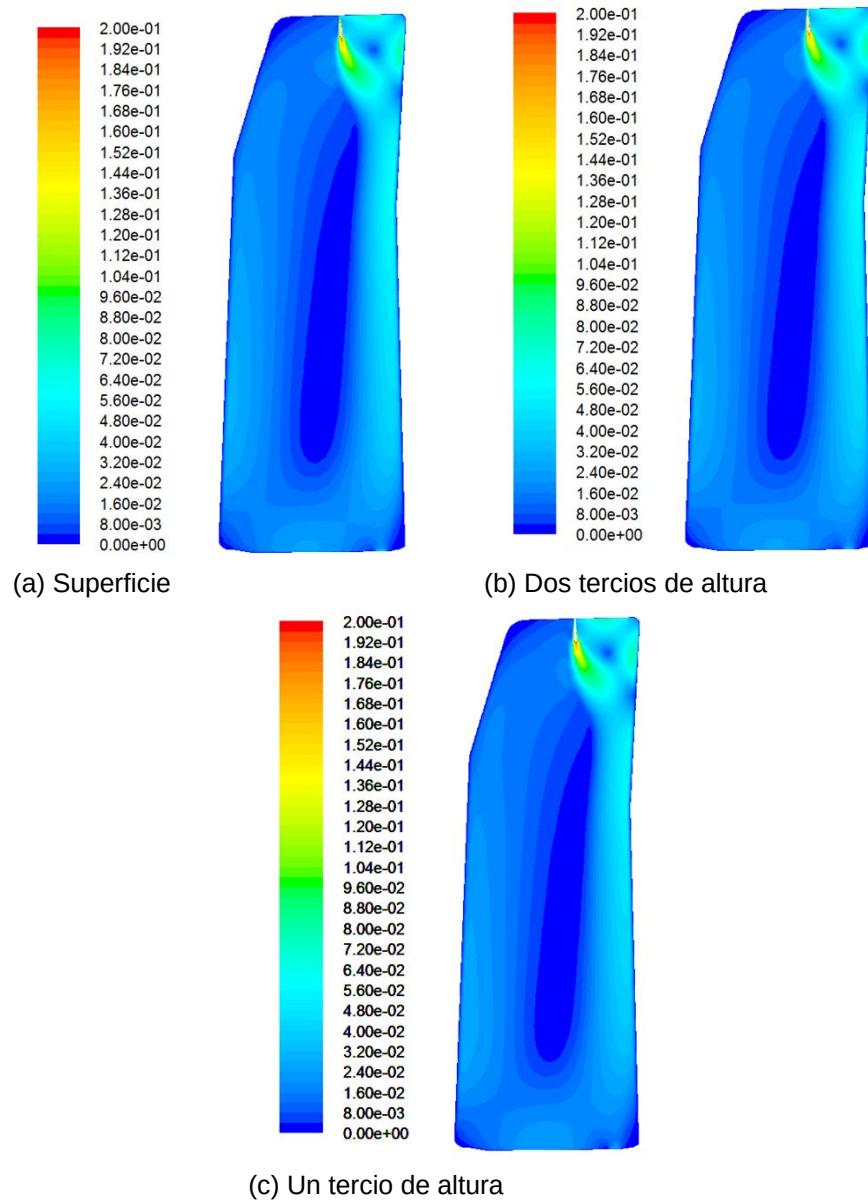


Figura 4.20: Contornos de velocidad con multiples números de elementos

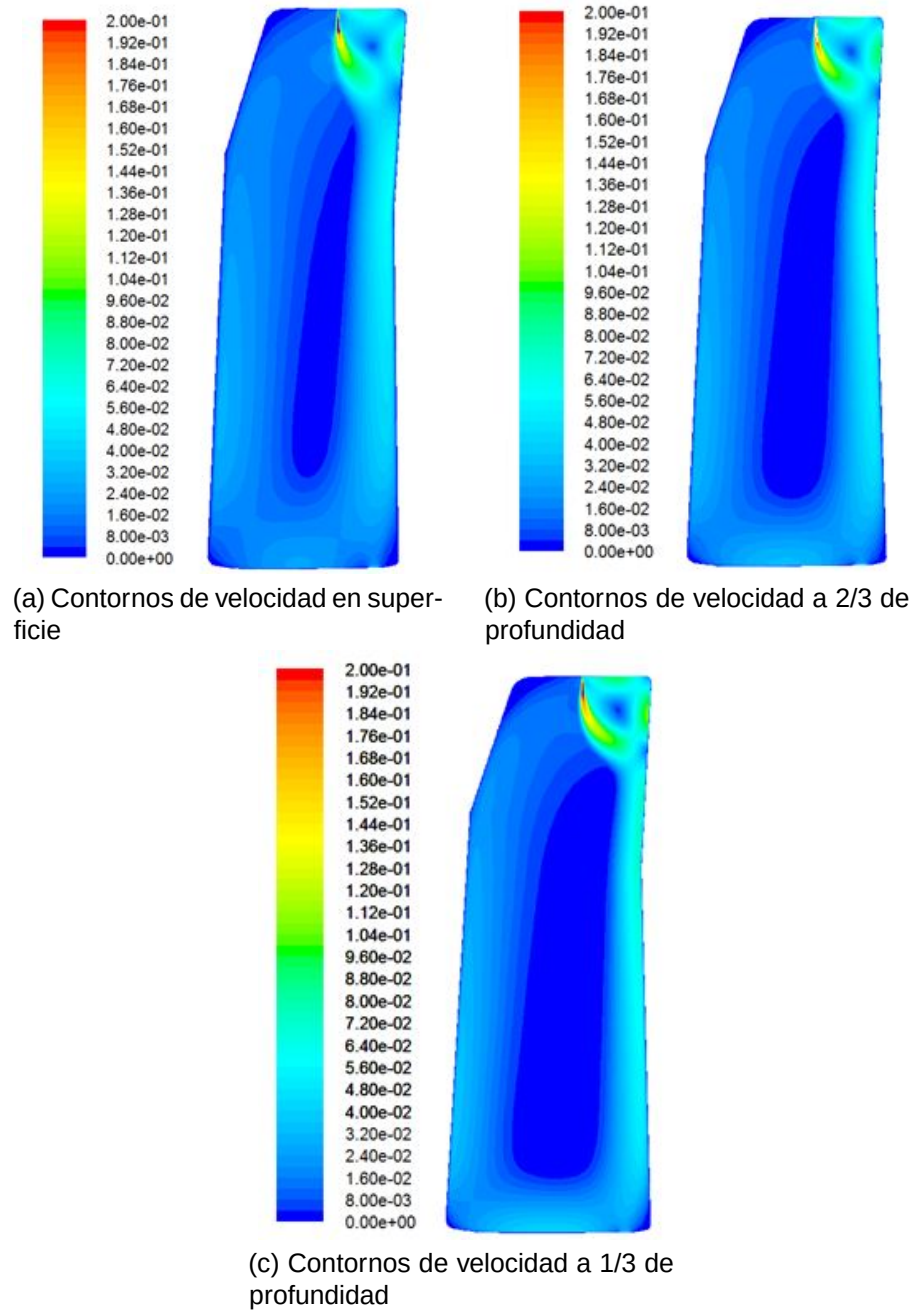


Figura 4.21: Contornos de velocidad a multiples alturas

Capítulo 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- ✓ De todos los métodos de tratamiento revisados en la literatura, las lagunas de estabilización son las más funcionales en lugares donde el terreno es barato, además que se caracterizan por tener bajo costo de operación y mantenimiento en comparación con otras tecnologías.
- ✓ La eficiencia de las lagunas depende de la hidráulica de las mismas, es por eso que el uso de programas computacionales que logren predecir los patrones de flujo, se convierte en una herramienta poderosa para el análisis y diseño.
- ✓ Debido a la gran versatilidad de configuraciones de los modelos CFD y a la multitud de variables que pueden ser alimentadas en el modelo, es necesario realizar una validación del modelo previo a su análisis.
- ✓ Las pruebas de trazadores siguen siendo una manera muy eficaz de validar modelos CFD así como por sí solas son procedimientos muy útiles para analizar el comportamiento hidráulico de una laguna en vista que permiten evaluar el tiempo medio de residencia y el factor de dispersión. Sin embargo, los datos que se obtienen de una prueba de trazadores son muy limitados respecto de la cantidad de resultados que ofrecen los modelos CFD.
- ✓ Una vez que un modelo CFD es validado los resultados permiten obtener una visión general del comportamiento hidráulico de la laguna, entre los que se destaca: flujos preferenciales, cortocircuitos, zonas muertas y zonas de mayor turbulencia.
- ✓ En un proceso de modelación en CFD (planteamiento, modelación, simulación e interpretación del problema) el ser humano tiene una doble participación, en vista que es aquel que plantea la base de todo el ciclo iniciando por la geometría del modelo: forma, entradas, salidas y sus simplificaciones, continuando con la discretización que se realiza a base de criterio y del conocimiento del fenómeno a modelar, para posteriormente asignar condiciones iniciales representativas del sistema y finalmente el ser humano procesa los datos concluyendo si son validos o no para el problema planteado. En definitiva el CFD es una herramienta, cuya aplicación depende de la persona que lo utilice.
- ✓ La discretización dentro del proceso de modelación en CFD es la etapa de mayor consumo de tiempo por tratarse de un ejercicio de ensayo y error que depende mucho de la experiencia del modelador. Se requiere de criterio para la discretización de zonas especiales tales como: cortocircuitos, zonas muertas y zonas de alta turbulencia, lugares en donde la grilla debe ser más o menos densa. Otro aspecto a considerar es la calidad y cantidad de los elementos, los cuales tienen una gran influencia sobre la eficiencia y precisión del modelo. Elementos de mala calidad disminuyen la capacidad de predicción



del modelo al aumentar la incertidumbre en los resultados. Un bajo número de elementos incrementa la eficiencia computacional, pero disminuye la precisión; por el contrario, gran cantidad de elementos disminuye la eficiencia computacional y aumenta la precisión. Encontrar el balance depende del propósito de la implementación del modelo, en este sentido la experiencia del modelador es fundamental.

- ✓ De la prueba de trazadores realizada en campo se puede concluir que:

Facultativa 1: La laguna Facultativa 1 presenta una máxima concentración de $7.260 \mu g l^{-1}$ a las 8 horas de iniciada la prueba, lo cual implica la presencia de un cortocircuito, la forma de la curva C vs t es cuadrada (Yanez, 2003), que es propia de un sistema cortocircuitado recirculatorio. El tiempo medio de residencia encontrado es de 2.612 días mientras que el de diseño es de 4.777 días, uno de los causantes de esta reducción de tiempo es la presencia de lodos que se ha acumulado en los años de funcionamiento de la laguna. En cuanto a la dispersión el valor hallado es de 4.096 que difiere del valor de diseño que es de 0.292, lo que indica este valor es que lo que sucede en la entrada o en la salida afecta a la forma de la curva C vs t , además indica que la laguna tiene un tipo de mezcla disperso, es decir, un intermedio entre mezcla completa y flujo de pistón. Al tener un alto coeficiente de dispersión (D) implica que la curva tiene una rápida dispersión del trazador.

Facultativa 2: La laguna Facultativa 2 presenta la máxima concentración de $5.29 \mu g l^{-1}$ a las 10 horas. Al igual que en la laguna facultativa 1 esto implica la presencia de un cortocircuito, la forma de la curva C vs t es cuadrada (Yanez, 2003), con lo que tenemos en sistema cortocircuitado recirculatorio. El tiempo medio de residencia calculado es de 4.382 días y el de diseño de 4.777 días, por lo que se concluye que en la facultativa 2 los tiempos de residencia de diseño y campo son prácticamente iguales. Se tiene un factor de dispersión de 0.416 que se aproxima al de diseño que es de 0.292, que además se asemeja a valor calculado con la fórmula de dispersión 2.11 del autor Von~Sperling (2007b), que indica que lo que sucede a la entrada o salida de la laguna afecta a la forma de la curva C vs t , como también que tiene un tipo de mezcla disperso. Un alto valor del coeficiente de dispersión (D), implica que la curva tiene una rápida dispersión de trazador. El volumen de eficiencia es de 84 %.

Se observa que la laguna facultativa 2 se asemeja mejor a los parámetros de diseño, tanto en tiempo de residencia como en dispersión; mientras que la facultativa 1 se distancia de los parámetros de diseño. Se concluye a criterio de los autores de este trabajo que una de las causas para esto es la forma irregular de la laguna y los distintos factores externos que tuvieron lugar entre las dos pruebas debido a la época del año cuando se ejecutaron.

- ✓ Un aspecto muy importante abordado dentro de esta investigación fue la asignación de distintas condiciones de frontera a la superficie de la laguna. Las dos condiciones que podrían simular la superficie son la condición *wall* y la condición *symmetry*. La condición *wall* representa una pared que se mueve a la misma velocidad que el agua, haciendo que la superficie se encuentre totalmente confinada, mientras que la condición *symmetry* conlleva a que todos los vectores perpendiculares a la superficie sean igual a cero; es decir, provoca una superficie de agua totalmente libre. Según los parámetros



estadísticos evaluados en los datos obtenidos de la condición *wall*, condición *symmetry* y el promedio entre ambas condiciones se llega a la conclusión que la solución más cercana a la realidad se encuentra en algún punto entre estas dos soluciones.

5.2 RECOMENDACIONES

- ✓ En las pruebas de trazadores es necesario analizar la fluorescencia natural del sistema que se pretende experimentar. Esto se logra tomando muestras por algunas horas inmediatamente antes de iniciar la prueba. La incidencia de estos valores son muy representativos en los resultados finales obtenidos con esta técnica. El uso de muestreadores automáticos son una necesidad para el éxito de estas pruebas.
- ✓ Para la lectura de la fluorescencia se recomienda analizar en forma constante la precisión de la curva de calibración y en caso de ser necesario contar con los implementos necesarios para recalibraciones en el lugar de medida de la fluorescencia en las muestras.
- ✓ Se observó en esta investigación que realizar una simulación en estado estacionario previo a la simulación en estado no estacionario es muy eficiente desde el punto de vista computacional puesto que el modelo parte de una solución aproximada y el proceso de convergencia se agilita. La asignación de magnitudes iniciales para los componentes de velocidad en cada dirección en el sistema a modelar también es conveniente para este objetivo. Para este último punto, el conocimiento experto del sistema es fundamental.

Bibliografía

- ABBAS, H.; NASR, R. y SEIF, H. (2006). «Study of waste stabilization pond geometry for the wastewater treatment efficiency». *Ecological Engineering*, **28**, pp. 25–34.
- ALDANA, G. y BRACHO, N. (2005). «Simulation and prediction of hydrodynamic performance at University of Zululand wastewater stabilisation ponds using a 3D-Computational Fluid Dynamic (CFD) model». *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zululand*, **28**.
- ALVARADO, A. (2001). «Modelización hidrodinámica de canales de riego medianos». Tesis de pregrado.
- ALVARADO, A.; VEDANTAM, S.; DURAZNO, G y NOPENS, I. (2011). «Hydraulic assessment of waste stabilization ponds: Comparison of computational fluid dynamics simulations against tracer data». *Maskana - Universidad de Cuenca*, **1**, pp. 81–89.
- ASHGRIZ, N. y MOSTAGHIMI, J. (2002). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics*. capítulo Veintecuatro, pp. 24.1–24.47. Department of Mechanical & Industrial Eng. University of Toronto.
- BADROT-NICO, F.; GUINOT, V. y BRISSAUD, F. (2009). «Fluid flow pattern and water residence time in waste stabilization ponds». *Water Science and Technology*, **59.6**, pp. 1061–1068.
- BLUM VELASCO, S. (2009). «Desarrollo de un programa para predecir la trayectoria de vuelo de un cohete sonda». Tesis de pregrado.
<http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/458>
- CAMARGO, M. y MARA, D. (2009). «The influence of algal biomass on tracer experiments in maturation ponds». *Desalination and Water Treatment*, **4**, pp. 89–92.
- CEPIS (1994). «Pruebas de trazadores para calibración de medidores y estudio de la dispersión». *Evaluación de lagunas de estabilización; métodos experimentales*, pp. 1–10.
- DESIGN, TURNER (1995). *Preparation of standards for dye studies using Rhodamine WT*.
- DOREGO, N. y LEDUC, R. (1996). «Characterization of hydraulic flow patterns in facultative aerated lagoons». *WAT. SCI. TECH.*, **34**, pp. 99–106.
- ESPINOZA, E. y RENGEL, P. (2009). «Evaluación hidráulica de la planta de tratamiento de aguas residuales Ucubamba - Cuenca». Tesis de pregrado.
- ETAPA (2007). «Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Ucubamba».
- FLETCHER, C. A. J. (2006). *Computational Techniques for Fluid Dynamics 1*. Springer-Verlag, 2ª edición.
- FLUENT INC. (2004). *GAMBIT 2.2 Tutorial Guide*.
- FLUENT INC. (2006). *FLUENT 6.3 User's Guide*.



- HERRERA, L. y CASTILLO, G. (2000). «Dynamics of a waste stabilization pond in Chile». *Water Science and Technology*, **42**, pp. 83–90.
- KUZMIN, D. (2003). «Lectura 1». En: *Introduction to Computational Fluid Dynamics*, .
<http://www.mathematik.uni-dortmund.de/~kuzmin/cfdintro/cfd.html>
- LEÓN, G. y SANHUEZA, J. (1995). «Aspectos sanitarios en el uso de aguas residuales». En: *Curso regional: El tratamiento y la reutilización de aguas*, .
- LEVENSPIEL, O. (1999). *Chemical Reaction Engineering*. Jhon Wiley & Sons, 3ª edición.
- LLOYD, B.; VORKAS, C. y GUGANESHARAJAH, R. (2003). «Reducing hydraulic short-circuiting in maturation ponds to maximize pathogen removal using channels and wind breaks». *Water Science and Technology*, **48**, pp. 153–162.
- MACROSSAN, M. (2008). «Computational Fluid Dynamics». <http://www.mech.uq.edu.au/courses/mech4480/fluvent>
- MANCHO, A. (2007). «Mecánica de fluidos computacional y aplicaciones». *Informe técnico*, Instituto Madrileño de Estudios Avanzados.
- MARA, D. (2009a). «Waste stabilization ponds: Past, present and future». *Desalination and Water Treatment*, **4**, pp. 85–88.
- MARA, D. (2009b). «Waste Stabilization Ponds: Past, Present and Future».
- MARÍN, R. (2007). «Optimización aerodinámica de un fórmula uno mediante dispositivos estabilizadores de capa límite». Tesis de pregrado.
<http://www.iit.upcomillas.es/pfc/resumenes/467bb264506b3.pdf>
- MARTIN, K. (2008). «Assessing the fit of regression models». The analysis factor: Articles, Resources and News about Applied Statistics and Data Analysis.
<http://www.analysisfactor.com/statchat/?tag=rmse>
- MENDOÇA, S. (2000). *Sistemas de lagunas de estabilización*. Mc Graw Hill, 1ª edición.
- MONCADA, D y MORALES, H. (2003). «Aplicación práctica de la Dinámica de Fluidos Computacionales en la medición de flujo de fluidos». *Tecnología, Ciencia, Educación*, **18**, pp. 57–66.
- OJEDA, P.; LÓPEZ, M.; FARAH, S. y REIVICH, A. (2009). «CFD como una herramienta para diseño de productos». En: *XV Congreso Internacional Anual de la SOMIM*, .
- PEÑA, M.; MARA, D. y SANCHEZ, A. (2000). «Dispersion studies in anaerobic ponds: implications for design and operation». *Water Science and Technology*, **42**, pp. 273–282.
- PEREZ, A. y GARRE DEL OLMO, C. (1995). «Dinámica de fluidos computacional para gráficos». Grupo de Modelado y Realidad Virtual.
http://www.gmrv.es/~cgarre/TAG3D_CFD.pdf
- PÉREZ, J. (2006). *Estudio numérico experimental del flujo compresible estacionario en uniones de conductos*. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Cartagena.



- PERSSON, J. y WITTGREN, H. (2003). «How hydrological and hydraulic conditions affect performance of ponds». *Ecological Engineering*, **21**, pp. 259–269.
- PIEDROLA, G. (2000). *Medicina preventiva y salud pública*. Editorial Masson S.A., 10ª edición.
- POLPRASERT, C. y BHATTARAI, K. (1985). «Modelo de dispersión para estanques de estabilización de aguas residuales». *Journal of Environmental Engineering*, **3**, pp. 45–59.
- RAMALHO, R. (2003). *Tratamiento de aguas residuales*. Editorial Reverté, 2ª edición.
- REYNOLDS, K. (2002). «Tratamiento de aguas residuales en Latinoamérica. Identificación del problema». *De la llave*, **1**, pp. 1–4.
- ROJAS, R. (2002). «Sistema de tratamiento de aguas residuales». En: *Gestión integral de tratamiento de aguas residuales*, CEPIS/OPS/OMS.
- ROMERO, J. (2004). *Tratamiento de aguas residuales, teoría y principios de diseño*. Escuela Colombiana de Ingeniería, 3ª edición.
- SALTER, H.; TA, H.; OUKI, S. y WILLIAMS, S. (2000). «Three-dimensional computational fluid dynamic modelling of a facultative lagoon». *Water Science and Technology*, **42**, pp. 335–342.
- SHILTON y HARRISON (2002). «10 Appendix two-tracer studies». *Guidelines for the hydraulic design of waste stabilisation ponds*, pp. 55–59.
- SHILTON, A. (2000). «Potential application of Computational Fluid Dynamics to pond design». *Water Science and Technology*, **42**, pp. 327–334.
- SHILTON, A.; KREEGHER, S. y GRIGG, N. (2008). «Comparison of Computation Fluid Dynamics simulation against tracer data from a scale model and full-sized waste stabilization pond». *Journal Of Environmental Engineering* © ASCE, **134**, pp. 845–850.
- SHILTON, A.; WILKS, T.; SMYTH, J. y BICKERS, P. (2000). «Tracer studies on a New Zealand waste stabilisation pond and analysis of treatment efficiency». *Water Science and Technology*, **42**, pp. 343–348.
- TCHOBANOGLIOUS, G.; BURTON, F.; TRILLO, J. y TRILLO, I. (1998a). *Ingeniería de aguas residuales*. volumen 1. Mc Graw Hill, 3ª edición.
- TCHOBANOGLIOUS, G.; BURTON, F.; TRILLO, J. y TRILLO, I. (1998b). *Ingeniería de aguas residuales*. volumen 2. Mc Graw Hill, 3ª edición.
- TORRES, J.; SOLER, A.; SAEZ, J.; LEAL, I. y AGUILAR, M. (1999). «Study of the internal hydrodynamics in three facultative ponds of two Municipal WSPS in Spain». *WAT. RES.*, **33**, pp. 1133–1140.
- VÁZQUEZ, J. (2004). «La ecuación de Navier-Stokes. Un reto físico matemático para el siglo XXI». *Monografías de la Real Academia de Ciencia de Zaragoza*, **XXVI**, pp. 31–56.



- VEGA, G.; PEÑA, M.; RAMÍREZ, C. y MARA, D. (2003). «Application of CFD modelling to study the hydrodynamics of various anaerobic pond configurations». *Water Science and Technology*, **48**, pp. 163–171.
- VON SPERLING, M. (2007a). *Activated sludge and aerobic biofilm reactors*. volumen 5. IWA Publishing, 1ª edición.
- VON SPERLING, M. (2007b). *Waste stabilisation ponds*. volumen 3. IWA Publishing, 1ª edición.
- WOOD, M.; GREENFIELD, P.; HOWES, T.; JOHNS, M. y KELLER, J. (1995). «Computational Fluid Dynamic modelling of wastewater ponds to improve design». *WAT. SCI. TECH.*, **31**, pp. 111–118.
- WOOD, M.; HOWES, T.; KELLER, J. y JOHNS, M. (1998). «Two dimensional computational fluid dynamic models for waste stabilisation ponds». *Elsevier Science*, **32**, pp. 958–963.
- YÁNEZ, F. (1989). «Diseños Definitivos de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la Ciudad de Cuenca». *Informe técnico Cuaderno 5*, Empresa Pública Municipal de Teléfonos, Agua Potable y Alcantarillado de Cuenca. Diseño de Lagunas Facultativas.
- YANEZ, F. (1993). *Lagunas de estabilización, teoría, diseño, evaluación y mantenimiento*. Editorial Monsalve, 1ª edición.
- YANEZ, F. (2003). «Evaluación del comportamiento hidráulico de lagunas, pruebas de trazadores». En: *Curso internacional sobre lagunas de estabilización*, .

Apéndice A

DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL

A.1 PAQUETES DE SOFTWARE CFD DISPONIBLES EN EL MERCADO

Software	Compañía
ALGOR	Algor Inc
CFX	AEA Technology
FLUENT	Fluent Inc
PHOENICS	Concentration Heat & Momentum Ltd (CHAM)
STAR-CD	Computational Dynamics Ltd
FLOW3D	Flow Science Inc
MAYA (NX FLOW)	Heat Transfer Technologies Ltd
COSMOS FloWorks	CFD Flow Analysis Software, SolidWorks
FLOTRAN	ANSYS Inc
POLYFLOW	ANSYS Inc
CFD –ACE	CFD Research Corporation
ICEM CFD	ICEM Technologies
AMI –VSAERO	Analytical Methods, Inc (AMI)
IGGTM	NUMECA International SA
TECPLOT	Amtec Engineering, Inc
PAM –FLOW	Engineering Systems International SA

Continúa en la siguiente página

**Tabla A.1** – Continuación de la página anterior

Software	Compañía
FLOVENT	Flomerics Inc (FLOVENT)
AVS/EXPRESS	Advanced Visual Systems, Inc
FLO++	Softflo
CFD ++	Metacomp Technologies, Inc
CFD2000	Fluids Engineering Software and Services
CFD –ACE	ESI Group
AVL FIRE	Powertrain Engineering & Testing Solution

Tabla A.1: Paquetes comerciales disponibles



A.2 PROBLEMAS DE FLUIDOS QUE LOS CÓDIGOS CFD PUEDEN RESOLVER

Tipos de flujo	Modos de transferencia de calor	Tipos de material
Estado estable o transitorio	Convección	Fluido (líquido o gas)
Viscoso	Conducción	Sólido (homogéneo o poroso)
Laminar o turbulento	Radiación	
Compresible o incompresible		
Subsónico, ultrasónico o supersónico		
Dos fases		
Reacción química		
Combustión		
Remolinos		
No newtonianos		

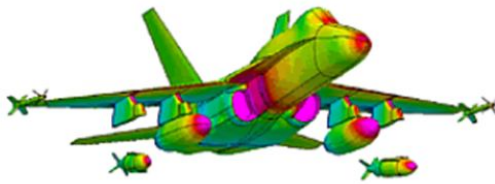
Tabla A.2: Problemas que los códigos CFD resuelven



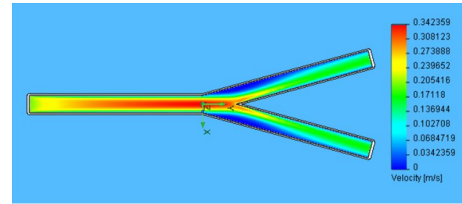
A.3 APLICACIONES DEL CFD

Industriales	Ambientales	Fisiológicas
Aeroespacial	Contaminación atmosférica	Flujos cerebrales
Arquitectura	Clima	Flujos cardiovasculares
Automotriz	Incendios en construcciones y áreas verdes	Flujos pulmonares
Biomédica	Flujos oceánicos	Respiración
Alimentos	Contaminación en aguas	
Farmacéutica	Seguridad	
Química y procesos		
Electrónica y computación		
Calor, ventilación, refrigeración		
Petróleo		
Energía		
Marina		
Mecánica		
Metalurgia		
Nuclear		
Turbo maquinaria		
Agua		

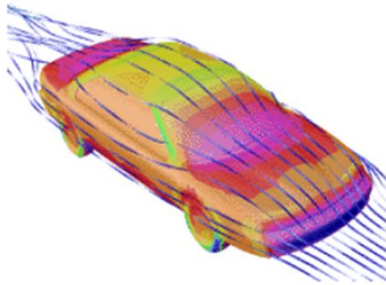
Tabla A.3: Aplicaciones del CFD



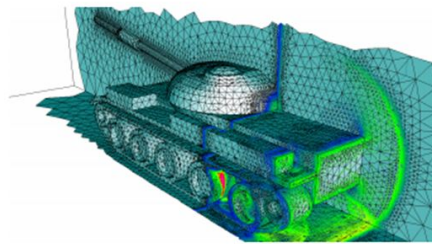
(a) Organizaciones Militares



(b) Simulación de la hemodinámica de una arteria



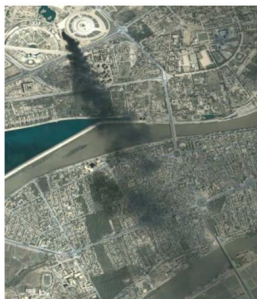
(c) Diseñadores de vehículos



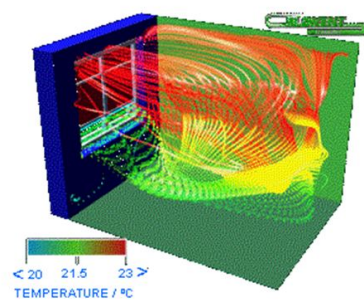
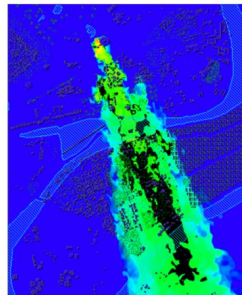
(d) Organizaciones Militares



(e) Diseño de transbordadores



(f) Diseño de la propagación de humo en un incendio



(g) Simulación para obtener la distribución de flujo de aire, distribución de temperatura en el local (Confort térmico)

Figura A.1: Ejemplos de aplicación práctica de los CFD



A.4 GAMBIT v.2.4

Inicio de GAMBIT

Para iniciar una nueva sesión se abre el programa después del cual aparece la siguiente ventana de diálogo (Figura A.2), en la cual se escoge la dirección donde se quiere trabajar y se manda a correr el programa.

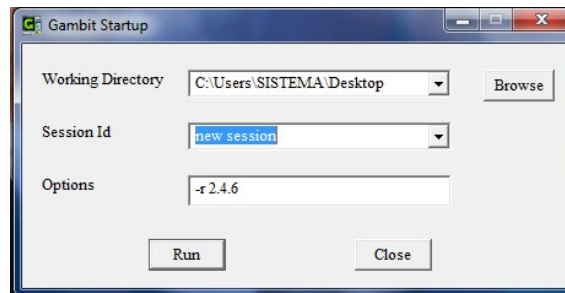


Figura A.2: Inicio en GAMBIT

Tipos de archivo

Una vez que se guarda el archivo y se cierra la sesión, se crean tres archivos los cuales tienen las siguientes extensiones: .dbs, .jou, y .trn. El archivo que tiene la extensión .dbs es el que contiene todos los cambios realizados hasta la última vez que se ha guardado. El que tiene extensión .jou, contiene todo el historial de comandos que se ha realizado en la última sesión, esto nos sirve para verificar errores. El que contiene la extensión .trn es un registro de los mensajes que aparecen en la ventana de transcripción durante la última sesión. En ocasiones GAMBIT guarda un archivo innecesario que causa errores, éste tiene extensión .lok y se requiere borrarlo para continuar trabajando.

Cuando se encuentra abierto el programa y se requiere abrir otro documento es necesario desactivar la opción **save current section**, para evitar que se sigan guardando archivos innecesarios.

Interfaz de GAMBIT

El interfaz que contiene Gambit está constituido por lo siguiente:

- 1) Ventana gráfica: Es aquella en donde se muestra el gráfico del modelo que se está trabajando, ocupa la mayor parte de la pantalla .
- 2) Menú principal: Se encuentra en la parte superior de la pantalla y contiene los siguientes ítems:
 - ✓ File: Podemos crear, abrir y guardar sesiones GAMBIT; gráficos de impresión, editar y / o ejecutar, limpiar journals, importar y exportar modelos, salir del programa.



- ✓ Edit: Permite editar títulos de sesiones, los parámetros del modelo y los valores predeterminados del programa.
 - ✓ Solver: Se especifica un programa de solución de cómputo.
 - ✓ Help: Inicia el explorador Web y abre el documento de ayuda en línea de GAMBIT.
- 3) Barra de herramientas: Es la sección en donde encontramos los botones de comando que corresponden al proceso de la creación y de la realización de la discretización. Se encuentran agrupados de acuerdo a su jerarquía (Figura A.3).

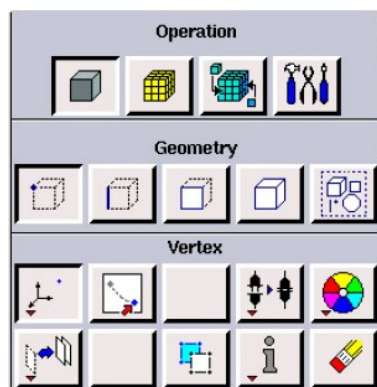


Figura A.3: Barra de herramientas

- 4) Campo de forma: Es una sección en donde se indican las especificaciones relacionadas con la creación y discretización del modelo, en ella se asignan las dimensiones y los requerimientos del modelo (Figura A.4).

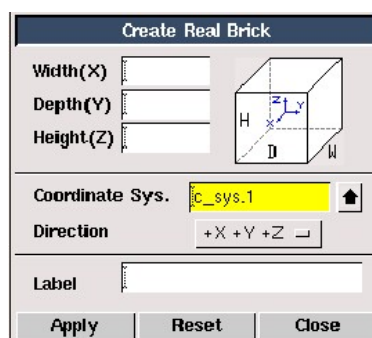


Figura A.4: Campo de forma

- 5) Control global de herramientas: Este nos permite tener el control del diseño y del funcionamiento de la ventana de gráficos, pudiendo trabajar en uno, dos o cuatro cuadrantes, así como también deshacer acciones en GAMBIT (Figura A.5).
- 6) Ventana de descripción: En esta se presenta la descripción de los botones y objetos que se señalen con el puntero del ratón (Figura A.6).
- 7) Ventana de transcripción: En ella se escriben las acciones que se realizan en el modelamiento, se registran los comandos ejecutados y los mensajes que aparecen mientras se trabaja en el GAMBIT. Si se hace clic sobre la pequeña flecha de la derecha, se puede minimizar y maximizar esta ventana (Figura A.7).

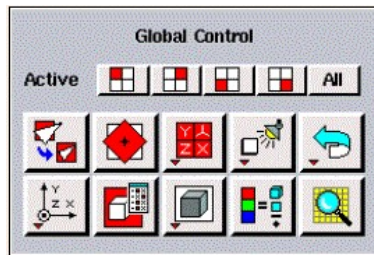


Figura A.5: Control global de herramientas

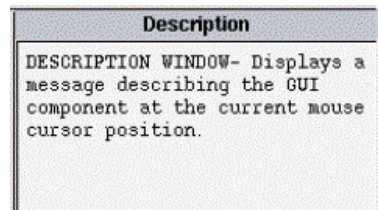


Figura A.6: Ventana de descripción

- 8) Comando de cuadro de texto: este nos permite ejecutar comandos GAMBIT directamente sin utilizar los formularios de interfaz gráfica de usuario, ni botones de comando.

Geometría básica

Para establecer la geometría se puede crear volúmenes directamente o a la vez construirlo a partir de entidades inferiores, es así que se las puede ordenar de la siguiente manera:

- ✓ Vertex
- ✓ Edge
- ✓ Face
- ✓ Volume

Estos van a estar referenciados a un eje de coordenadas que pueden ser globales o locales.

Creación de vértices

Para crear vértices en la barra de herramientas se escoge la opción **Create Vertex**, y se ingresa las coordenadas en los ejes x, y y z; verificando si son coordenadas globales o locales. Para separar los decimales se utiliza el punto.

Creación de lados

Estos se crean a partir de vértices. Para señalar las entidades se la puede realizar desplegando la flecha que se encuentra en la parte derecha en el campo de vértices. Una vez que se señala la entidad ésta se vuelve de color rojo, que nos sirve para observar cuales se encuentran señaladas (**picked**) (Figura A.8).

Otra forma de señalar es aplastando el click derecho y luego el izquierdo con lo que el puntero del ratón aparecerá en forma de ojo, y una vez que se tenga de esa forma se señalará la entidad simplemente haciendo click sobre ella.

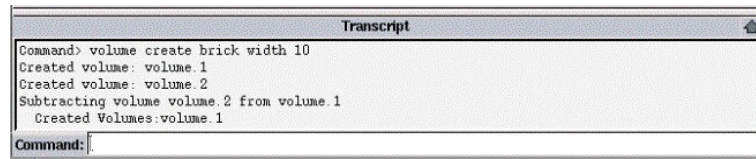


Figura A.7: Ventana de transcripción

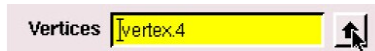


Figura A.8: Entidades señaladas

Creación de caras

Para crear las caras se señala todos los lados que se quiere que la formen, ya que de lo contrario, el programa muestra un error. Se la puede crear directamente cuando se requiere una cara rectangular colocando el ancho, el largo e indicando el plano en el que quiere que se encuentre.

Creación de volúmenes

Al igual que las otras entidades se puede crear a partir de caras o directamente colocando las dimensiones requeridas de acuerdo al volumen que se quiere generar.

Se la puede crear a partir de una sola cara haciendo que esta se copie a lo largo de un eje perpendicular.

Una vez que se tiene varios volúmenes, dependiendo del modelo que se quiere construir, se puede realizar varias operaciones: unión, intersección y sustracción.

Continuidad en los volúmenes

Para dar continuidad a los volúmenes se utiliza la herramienta **split volumen**, esto se realiza para colocar un volumen o cara dentro de otro volumen. Al utilizar esta herramienta se mantiene activada tan sólo la opción **connected**. Si se utiliza la opción **retain**, se crean volúmenes adicionales.

Discretización o mallado (mesh)

Generar una buena discretización comprende una gran parte del trabajo en la modelación en CFD's pudiendo llegar a ser en ocasiones complicado (Macrossan, 2008).

La discretización se las puedo realizar en los ejes, caras y volúmenes. Cuando se realiza esto se debe buscar que resulte lo más regular, prefiriendo utilizar prismas rectangulares.

La calidad de los elementos se los puedo verificar mediante el botón **examine mesh**, que se encuentra en el control global de herramientas, allí además se indica cual es el peor elemento. Se debe considerar que a mayor regularidad en la discretización, existe mayor convergencia en el modelo.

Para obtener una discretización de alta calidad se debe considerar que las variaciones en el espaciado de la cuadrícula sean ligeras y que tenga una buena simetría, es decir, que



los ángulos interiores de la celda debería ser iguales (Macrossan, 2008), este último se lo verifica con el factor forma.

Mesh edges

La discretización de los ejes se los realiza considerando dos parámetros, la separación y el radio, utilizándose también un doble radio, y se los va probando hasta conseguir lo que se requiere para el modelo deseado.

Mesh face

Este comando crea la grilla en las caras, cuando realiza esta acción a la vez crea automáticamente nudos. Los elementos que se pueden realizar son cuadrados, triángulos y una mezcla entre los dos. Se recomienda utilizar los elementos cuadrados.

Además de escoger la forma de elemento a utilizar es necesario señalar el tipo de mallado que puede ser map, submap, pave y tri primitive. Están ordenadas por la regularidad que presentan los elementos, es decir, el map realiza una grilla uniforme, mientras que el pave y el tri primitive realizan una grilla no uniforme.

Cuando se trabaja con caras que contengan un número par de lados se recomienda utilizar el map y el submap, mientras que cuando se tiene un número impar de lados se trabaja con pave y como última opción se escoge el tri primitive.

Mesh volume

Para generar la grilla en el volumen se considera la forma de los elementos que puede ser hexagonales, o no hexagonales.

Los tipos de grilla a utilizar son: el map, submap, tet primitive, cooper y stairstep, se prefiere utilizar el map y el submap, el cooper se lo utiliza cuando se tiene la grilla de una de las caras, los otros sólo se los utiliza como último recurso.

Condiciones de contorno y exportación desde GAMBIT

Selección del Solver

Se especifica que la malla se va a utilizar con FLUENT 6.0, para esto se escoge la opción **FLUENT 5/6**.

Condiciones de contorno

Se debe tener claro cuáles son las condiciones de contorno que se van a asignar al modelo y se activan la opción **Specify Boundary Types Command Button** (Figura A.9), en donde se coloca el nombre y el tipo de condiciones que pueden ser: velocity inlet, outflow, wall, symmetry, etc. Y se aplica a la entidad que corresponda.

A continuación se realiza una descripción de las condiciones de frontera que se asignaron al modelo, que permitirá un mejor entendimiento en qué se basa el programa para la resolución del flujo en la laguna.

Wall: Esta condición de contorno se emplea como frontera entre regiones fluidas y sólidas, es decir, para confinar un fluido y para determinar las parte sólidas del modelo (Marín, 2007). En flujo viscoso se presenta por defecto la condición “no-slip” (dicha condición

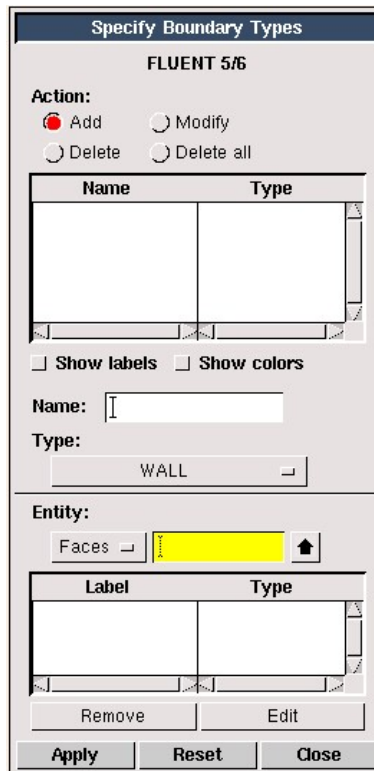


Figura A.9: Condiciones de contorno

fue usada en ésta simulación la cual nos indica que el fluido se adhiere a la pared y se mueve con la misma velocidad que la pared) (Pérez, 2006).

Las propiedades a especificar en una condición de contorno de este tipo son:

- ✓ Condiciones de contorno térmicas.
- ✓ Movimientos de traslación y rotación de la pared.
- ✓ Características de rugosidad de la superficie y de tensiones cortantes.
- ✓ Condiciones de reacciones químicas.
- ✓ Radiación.
- ✓ Multifase, etc.

Se toma por defecto cuando no se asigna una condición específica, si se quiere se puede especificar el esfuerzo cortante y además se lo puede utilizar para aproximar a una superficie libre así como para modelar una fuente de momento (Macrossan, 2008).

Symmetry: Está condición se la asigna cuando la geometría y el flujo son simétricos con respecto a un plano, reduciendo a la mitad el dominio computacional. Se considera que no existe flujo convectivo (Se define flujo convectivo o flujo por transporte en masa de una propiedad genérica A a través de una superficie de control S a la cantidad de A que, debido al transporte de masa, atraviesa la superficie S por unidad de tiempo (MMC Xavier Oliver, UPC)) ni difusión a través del plano de simetría para ninguna de las magnitudes fluidas y que el esfuerzo cortante es nulo (Pérez, 2006).



No se especifica ninguna otra propiedad en este tipo de condición. En la práctica esta condición de contorno se utiliza también para limitar la región de flujo que conforma el modelo (Marín, 2007).

Velocity inlet: Mediante esta condición de contorno se indica al programa el lugar por donde ingresa el fluido hacia la laguna. Los parámetros usados en esta simulación fueron la magnitud de la velocidad de entrada, la energía cinética turbulenta (k), la tasa de disipación turbulenta (ϵ) y el species mass fraction.

Se puede especificar si la velocidad es constante o variable para la cual se le asigna un perfil de velocidades y se requiere por lo menos una salida (Macrossan, 2008).

Outflow: Se emplea para modelar la salida de flujo cuando la velocidad y presión del flujo no son parámetros prioritarios para la resolución del problema. Es apropiado cuando la salida del flujo está próxima a una de condición de flujo completamente desarrollado (Flujo que es laminar o turbulento. Aquel que tiene un perfil de velocidad constante a lo largo de la longitud de un conducto). Este tipo de condición asume un gradiente nulo para todas las propiedades del flujo, excepto para la presión.

Si se tiene múltiples salidas se requiere especificar el porcentaje que sale por cada una de ellas, de lo contrario se divide equitativamente (Macrossan, 2008).

Exportación a FLUENT

El modelo generado en Gambit que incluye tanto la discretización como la asignación de condiciones de frontera es exportado en su formato original (.msh) a Fluent (Figura A.10), donde es abierto con todos sus atributos.

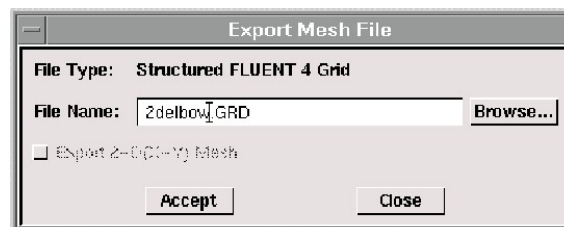


Figura A.10: Exportación al FLUENT

A.5 FLUENT v.6.3

Inicio de FLUENT

Se abre el programa en el cual se escoge la dimensión y precisión que se requiere en el modelo. Además cuando se abra la ventana de dialogo también se podrá escoger entre full simulation y post only, generalmente se trabaja con el full simulation (Figura A.11).

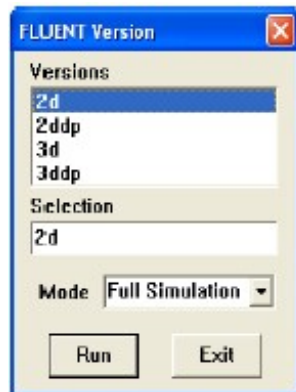


Figura A.11: Inicio de FLUENT

Interfaz de FLUENT

El interfaz de FLUENT consta de los siguientes elementos:

- 1) Ventana principal: Es aquella en donde se controla la ejecución del programa. Consta de la barra de menú y de una ventana en donde se visualiza las actividades que va realizando en el programa. La barra de menú contiene los elementos que se utiliza cuando se ejecuta las acciones en el programa (Figura A.12).

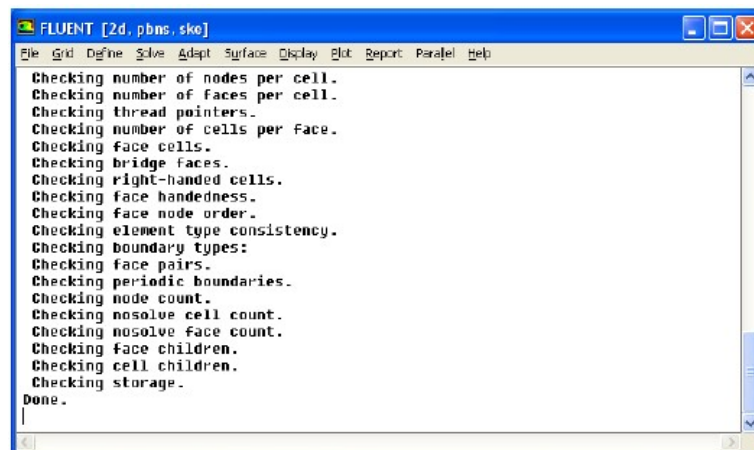


Figura A.12: Ventana principal de FLUENT



- 2) Tablas de dialogo: Pueden ser de emisión de alerta, entrada o salida de tareas, mensajes de error o de pregunta que requiere una respuesta afirmativa o negativa.
- 3) Paneles: Se utilizan para la realización de tareas más complicadas. Cada panel es diferente y contiene varios tipos de controles, en ellos se selecciona los parámetros que regirán el modelo.
- 4) Pantalla de gráficos: Es la ventana donde se visualizan los gráficos, son independientes y muestran la salida gráfica del programa (Figura A.13).

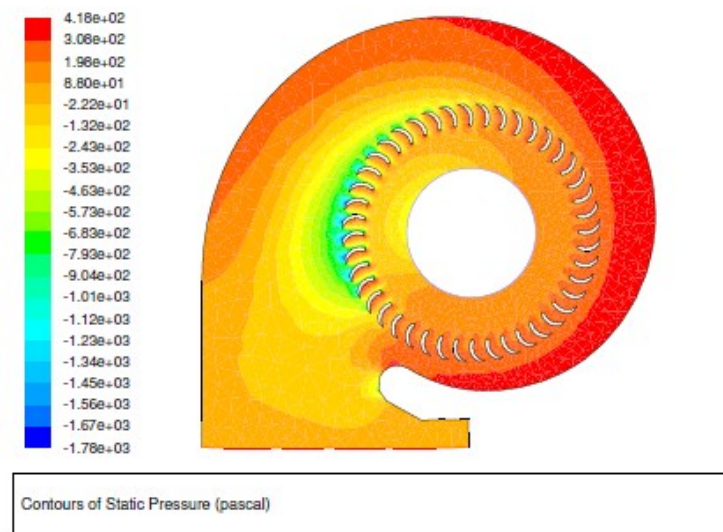


Figura A.13: Pantalla de gráficos

Para abrir un archivo se va al panel de herramientas, y en la opción **File**, se escoge **Read** > **Case and Data**, y si se requiere guardar en vez de **Read** se escoge **Write**.

Verificación de la grilla: Una vez que se ha leído el documento se procede a chequear la grilla para esto vamos al panel de herramientas a la opción display y luego a grid, para esto se toma default interior.

Definición de parámetros

Modelo: Es necesario la definición del modelo para lo cual vamos a la opción **Define** > **Models** > **Solver**, hecho esto se nos abre una tabla de dialogo en la cual nos muestra varias opciones que definirán la resolución del modelo. En el espacio donde se encuentra solver se coloca pressure based, en formulation se escoge implicit, en space se toma 3D, en time comenzamos con steady hasta que el programa encuentre una solución, para posteriormente simularlo con unsteady y las otras opciones se deja las que aparecen por defecto (Figura A.14).

Solucionador Steady y Unsteady

Steady: Supone que la derivada en el tiempo es cero. Un ejemplo de un flujo steady, es el flujo de agua a través de un grifo.

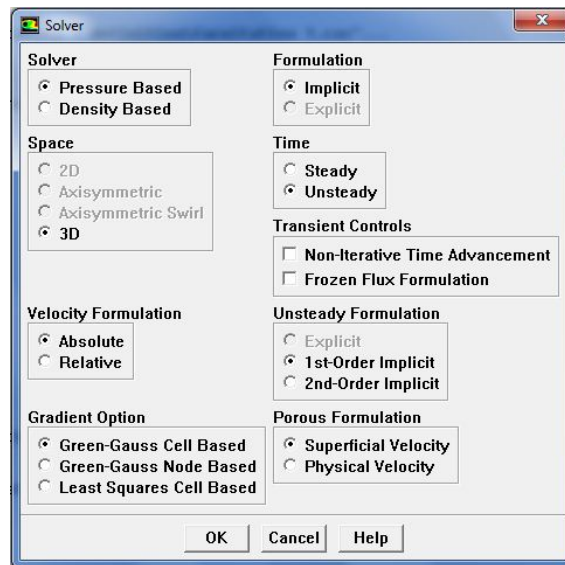


Figura A.14: Definición del modelo

Unsteady: Se integran las ecuaciones diferenciales en el tiempo usando el algoritmo Runge-Kutta -Merson (Macrossan, 2008).

El método de Runge-Kutta: Los métodos de R-K usan evaluaciones sucesivas de la función $f(t,y)$ en puntos adecuados (Fletcher, 2006). Tiene la forma general:

$$y_{n+1} = y_n + \Theta(xi, yi, h) \quad (A.1)$$

Donde:

Θ : Pendiente representativa sobre el intervalo

Por ejemplo si tomamos sucesivamente las evaluaciones de la función

$$g_1 = f(t_n, y_n) \quad (A.2)$$

$$g_2 = f(t_n + h, y_n + \frac{h}{2} \cdot g_1) \quad (A.3)$$

Entonces :

$$y_{n+1} = y_n + h \cdot g_2 \quad (A.4)$$

Tiene un orden de dos, los errores locales son proporcionales a h^3 .

En el caso específico de Runge Kutta Merson este método es una extensión para hacerlo de paso variable, a costa de una evaluación adicional de las ecuaciones del sistema para poder estimar el error y tomar decisiones sobre el tamaño del paso.

Modelo de turbulencia: Se escoge el modelo viscoso y en la forma de resolución K-epsilon, en el cual aparecen los parámetros los cuales se mantienen. Este modelo de turbulencia es el más utilizado (Figura A.15).

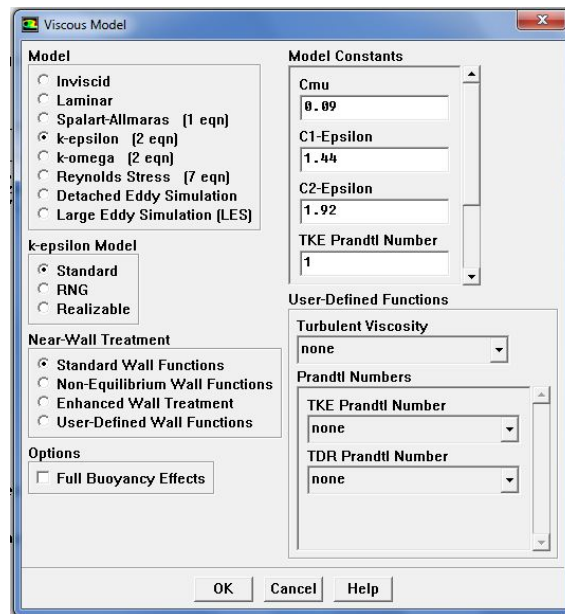


Figura A.15: Modelos de turbulencia

Modelo de Turbulencia $k-\epsilon$ estándar: La familia de modelos de turbulencia $k-\epsilon$ son modelos robustos de dos ecuaciones de transporte para la energía cinética (k) y para la tasa de disipación (ϵ) (Blum~Velasco, 2009).

El modelo $k-\epsilon$ pertenece a este tipo de modelos de turbulencia y a llegado a ser el “Caballo de batalla” del cálculo práctico de flujo ingenieril, desde que fue propuesto por Launder y Spalding. Se caracteriza por su robustez, economía y exactitud razonable para una amplia explicación de flujos turbulentos, popular en los flujos industriales y en simulaciones de transferencia de calor.

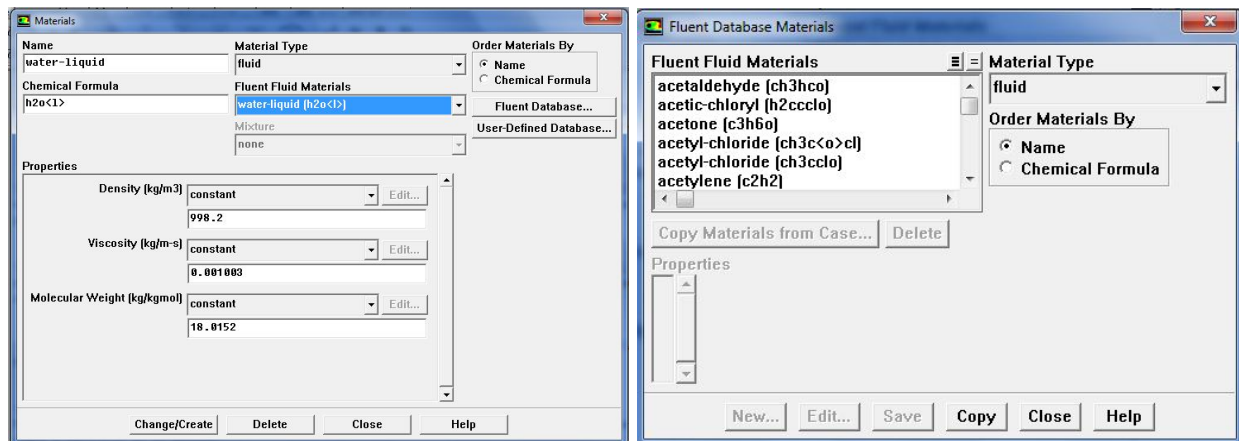
Es un modelo semi empírico, y su derivación se basa en consideraciones fenomenológicas y empíricas, además en ecuaciones del modelo de transporte para la energía cinética (k) y su tasa de disipación (ϵ), donde k se deriva de la ecuación exacta y ϵ se obtiene de razonamiento físico y tiene poco parecido con su contraparte matemática exacta.

En la derivación del modelo $k-\epsilon$, se asume que el flujo es totalmente turbulento y los efectos de la viscosidad molecular son insignificantes, por lo tanto el modelo es válido en flujo totalmente turbulento.

Materiales: Para definir el material podemos escoger entre los existentes en la base de materiales del FLUENT o se puede crear otros con las propiedades deseadas, éstos pueden ser sólidos, líquidos o gaseosos (Figura A.16b).

Condiciones de operación: En esta se define el valor de la presión y de la gravedad, se debe considerar en cuál de los ejes está actuando. Se toma el valor de la presión de 100410 Pascuales y la gravedad de 9.807 m s^{-2} , activamos la pestaña **Specified Operating Density**, aparecerá un cuadro de texto donde colocamos 1000 Kg m^{-3} . (Figura A.17).

Condiciones de borde: Para definir la condiciones de contorno se nos muestra varios opciones, entre las que tenemos la velocidad de entrada, el flujo de salida, entre otros (Figura A.18).



(a) Características de los materiales

(b) Materiales disponibles

Figura A.16: Definición de materiales

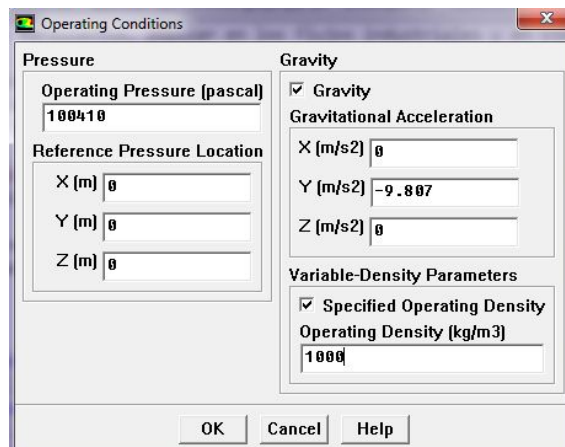


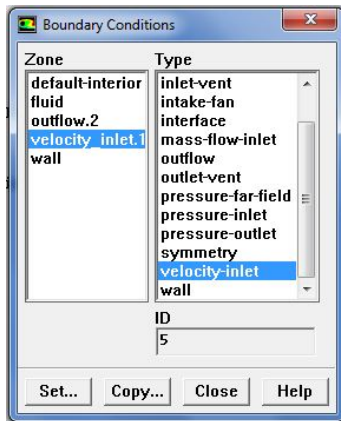
Figura A.17: Condiciones de operación

Monitores

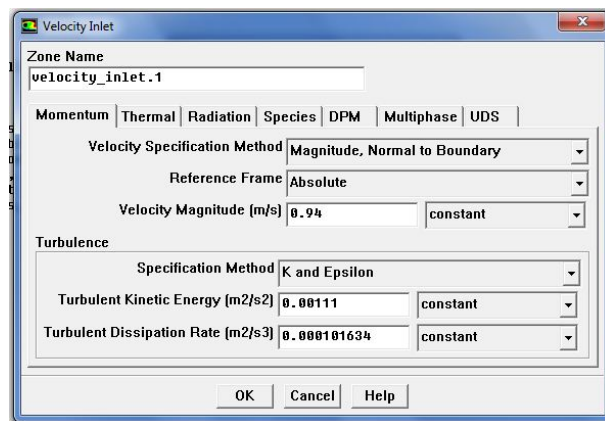
Una de las formas para verificar el progreso de la simulación es el uso monitores los cuales se los define señalando los parámetros que se quiere verificar (Figura A.19). Se puede crear monitores en diferentes planos en los cuales además de indicar los parámetros a monitorear se señala cada cuántas iteraciones o time step nos muestre los resultados (Figura A.20).

Corrimiento del modelo

Cuando se ha definido el modelo, material, condiciones de frontera, monitores y se ha chequeado el modelo, ya se está listo para iniciar la simulación. Se manda a correr el programa indicado previamente el time step size en segundos y el número de time step que deseo que realice.



(a) Condiciones de frontera



(b) Parámetros de la velocidad

Figura A.18: Definición de las condiciones de frontera

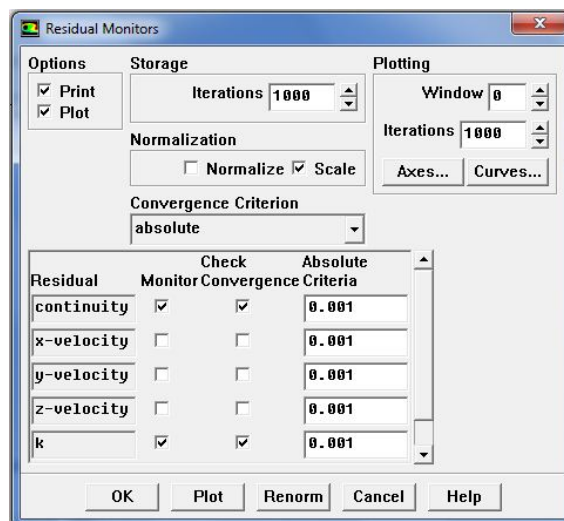


Figura A.19: Condiciones de operación

Creación del trazador

Para realizar la práctica de la prueba de trazadores en las lagunas es necesario definir un nuevo material para lo cual realizamos de la siguiente manera:

Se crea un nuevo material, líquido con las mismas propiedades del agua, después del cual se activa la opción **mixture** verificando que se desactiven las opciones inlet diffusion y diffusion energy source, se coloca el valor de la viscosidad y en **Mixture Species** se edita las opciones y se selecciona el trazador y el agua, primero se coloca la sustancia inerte y luego la sustancia sobre la que se coloca (bulk). Para chequear que se haya incluido en el modelo se verifica en **Define > Models > Species > Mixture Templatation** que se encuentre el 2.

Para comprobar vamos a **Solve > Control > Solution** y vemos que se ha añadido la ecuación del trazador.

Cuando se añada el trazador se lo realiza una vez que el modelo ya este estable, vamos a **Define > Boundary Conditions > Velocity inlet > Species**, y colocamos el mass fraction



Figura A.20: Condiciones de operación

así como el número de time steps resultante del cálculo, una vez colocado del trazador se regresa a 0 y sigue corriendo el modelo.

Convergencia y precisión de los modelo CFD

La solución numérica se dice que converge si tienden a la solución analítica, en la grilla. Sin embargo, no todos tienen solución analítica, por lo que una solución numérica converge si los valores de las variables en los puntos de dominio tienen a moverse hacia un valor fijo como la solución (Ashgriz y Mostaghimi, 2002).

Se dice que la solución numérica es estable cuando los errores en la solución discreta no aumentan. La estabilidad numérica está relacionada con el comportamiento de la solución cuando se incrementa el *time step* (tiempo de paso), es así que, si existe un buen comportamiento de la solución (no oscila los monitores) cuando se incrementa el time step, se dice que es incondicionalmente estable (Ashgriz y Mostaghimi, 2002).

La convergencia se la monitorea medida que avanza la simulación, por eso es necesario observar los residuales (cambios de la solución relativa) y otros indicadores como son las secuencias de contorno de velocidades que aseguren que las iteraciones converjan (Kuzmin, 2003).

Monitoreo de la convergencia

Durante el proceso de solución se puede monitorear la convergencia dinámicamente mediante la revisión de los residuales, monitores de velocidad en diferentes planos de las lagunas, los cuales se puede observar mediante un archivo de salida con extensión .out el cual se lo puede abrir con una hoja de cálculo o texto.

Al final de cada iteración la suma residual para cada una de la variables consideradas es computarizada y guardada en el historial de convergencia, el mismo que es almacenado en un archivo. La suma residual se define a continuación:

En una computadora con una precisión infinita, estos residuales llegan al valor de cero cuando converge la solución, en una computadora actual los residuales disminuyen a valores pequeños “redondeo” y entonces la solución “se estabiliza”. Para una computadora de simple precisión el residual puede bajar hasta 10^{-6} de magnitud antes de “redondear”, en una computadora con doble precisión el residual puede descender hasta 10^{-12} .



A.6 DISCRETIZACIÓN

Facultativa 1

La laguna Facultativa 1, tiene la particularidad de ser más irregular que la laguna Facultativa 2, para su discretización se emplearon 26 volúmenes distribuidos como se muestra en la Figura A.21, los cuales tienen una grilla de acuerdo a la zona que discretizan.

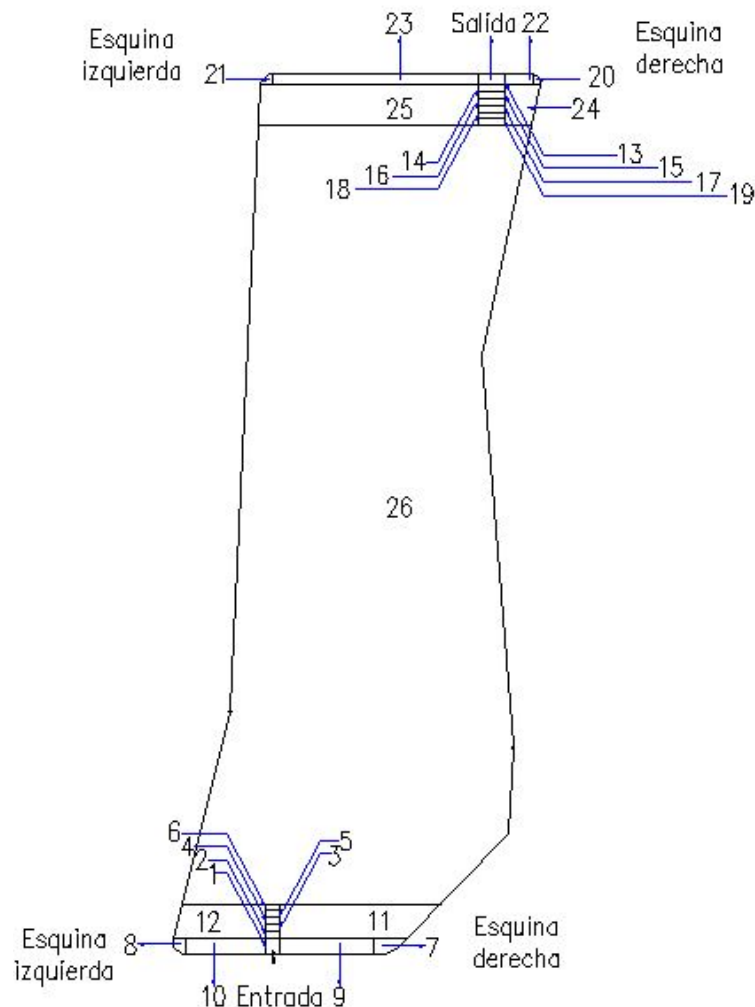


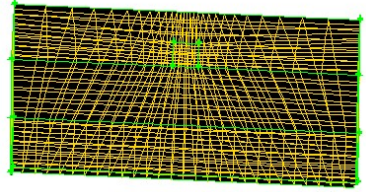
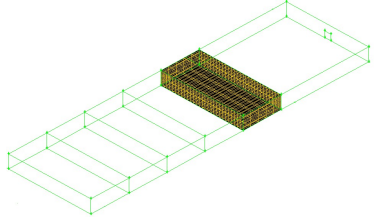
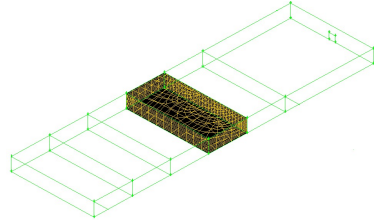
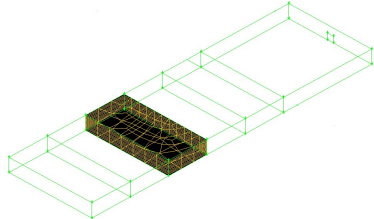
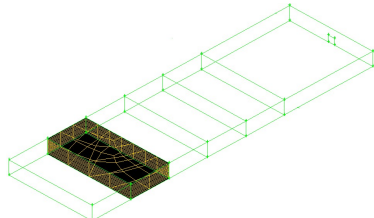
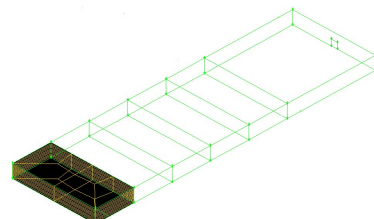
Figura A.21: Esquema de los volúmenes de discretización de la laguna Facultativa 1

A continuación se realiza una descripción de cómo se realizó la discretización en cada zona de la laguna, indicando el número de volúmenes empleado así como el de los elementos. Cabe recalcar que la discretización presentada a continuación es para las lagunas que tienen alrededor de 100000 elementos.

Zona de entrada: En esta zona se colocaron 12 volúmenes, de los cuales el volumen 1 corresponde a la zona de entrada, el volumen 2 hasta 6 se colocaron para homogenizar la geometría con lo cual se permitió tener una transición entre la grilla de la zona de entrada y la del cuerpo total de la laguna. El volumen 7 y 8 corresponden a las esquinas y los



volúmenes del 9 a 12 se colocaron para completar la geometría de la zona de entrada. Todo esto se detalla en la siguiente tabla:

Volumen	Procedimiento	Elementos	Figura
1 Entrada	Se realizó la grilla en la cara de entrada, con un map de 0.10 m. Se restringió los ejes correspondiente a la profundidad, con una separación de 0.15 m. Para restringir los ejes se ocupó la herramienta "mesh" > ejes, en la cual se mantiene el radio de 1 que aparece por defecto y añadimos la distancia de separación requerida. Se aplicó al resto de la cara un "submap" cada 0.50 m. En el volumen 1 se aplicó un cooper cada 1.00 m	3696	
2	De los volúmenes 2 al 6 se discretizó primero la cara ya sea la superior o inferior y luego se realizó un cooper cada 0.15 m. Para este volumen debido a que uno de los ejes ya está restringido cada 0.50 m, se restringió el eje paralelo a éste cada 0.50 m y se realizó un "submap" cada 1.00 m.	1680	
3	Como uno de los ejes ya está restringido cada 0.50 m, al eje paralelo a éste se restringió cada 1.00 m y se aplicó un "pave" cada 1.00 m.	1560	
4	Se aplicó una separación de 1.50 m al eje paralelo al que se encuentra restringido cada 1.00 m y se realizó un "pave" cada 1.50 m.	384	
5	El eje paralelo a la cara que esta restringida cada 1.5 m, se lo restringe cada 2.50 m terminando la grilla al aplicar un "pave" cada 2.50 m.	180	
6	Debido a que esta zona se encuentra en contacto con el cuerpo de la laguna, se debe imponer al eje paralelo a la cara que esta restringida cada 2.5 m un distanciamiento de 5 m, para así lograr compatibilidad con la zona central de la laguna.	72	

Continúa en la siguiente página



Tabla A.4 – Continuación de la página anterior

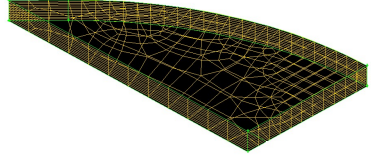
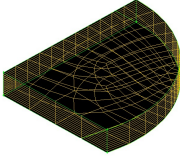
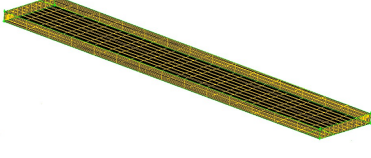
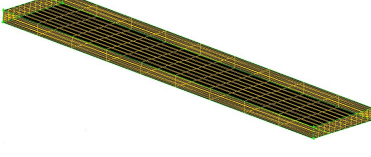
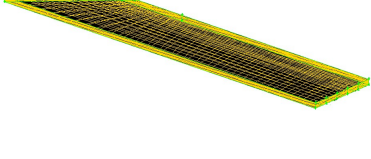
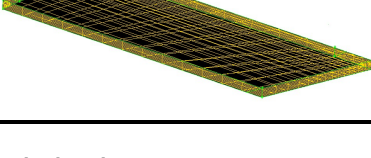
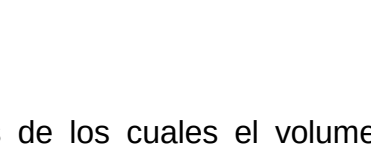
Volumen	Procedimiento	Elementos	Figura
7 Esquina	Las esquinas en las lagunas son zonas singulares, constituidas por una partes circulares y partes rectas no alineadas. Esta se constituye por 4 lados, uno de ellos corresponde a un arco circunferencia, junto a este tenemos una parte que no esta alineada a ningún eje que forma parte de la pared de la laguna, una que es paralela al eje z y la otra al eje x. La parte recta que es paralela al eje x se la restringió cada 2.00 m, mientras que el lado paralelo al eje z se restringió cada 1.00 m y el lado no alineado cada 1.5 m. Se aplicó en la cara un "pave" cada 1.00 m y luego un "Cooper" cada 0.15 m en el volumen.	1536	 
8 Esquina	Esta esquina corresponde a un arco de circunferencia. En el lado paralelo al eje x se restringió cada 2.00 m y en la curva se aplicó un doble radio de 0.85 con una separación de 1.00 m, realizando en la cara un "pave" cada 1.00 m y terminando con un "Cooper" cada 0.15 m en el volumen.	984	
9	Se aplicó un "map" cada 5.00 m, sabiendo que los lados que se encuentran paralelos al eje z ya se encuentran restringidos cada 1.00 m y los paralelos al eje y tienen una restricción cada 0.15 m.	1848	
10	Con un criterio similar al volumen 9 se aplicó un "map" cada 5.00 m.	1188	
11	Tanto en el volumen 11 y 12 se probaron con diferentes radios y separaciones en los ejes que pertenecen a las paredes de la laguna para poder aplicar un "submap" en el volumen. En el volumen 11 se restringió el lado con una radio de 0.9 y una separación de 1.60 m con lo cual finalmente se aplicó un "submap" cada 5.00 m.	5616	
12	Se restringió el eje con un radio de 0.9 y una separación de 1.90m, terminando con un "submap" en el volumen cada 5.00 m.	2496	

Tabla A.4: Discretización en la zona de entrada (Facultativa 1)

Zona de salida: En esta zona se colocó 13 volúmenes de los cuales el volumen 13 corresponde a la zona de salida, del 14 al 19 son los que nos permiten tener una transición entre la zona central de la laguna y la salida, el volumen 20 y 21 son los volúmenes de las esquinas y los volúmenes del 20 a 25 complementan la geometría de la zona de salida. Todo esto lo detallamos en la tabla siguiente:



Volumen	Procedimiento	Elementos	Figura
13 salida	En la cara que corresponde al vertedero se aplicó un "map" de 0.50 m. Se restringió los ejes correspondiente a la profundidad, con una separación de 0.15 m. Se aplicó al resto de la cara un "submap" cada 0.60 m. Se aplicó un "cooper" cada 1.00 m en el volumen.	4320	
14	De los volúmenes 14 al 19 se discretizó primero la cara y luego se realiza un "cooper" cada 0.15 m. Se tiene un eje restringido cada 0.60 m por lo que restringió el eje paralelo cada 1.00 m, aplicando a continuación un "pave" cada 1.00 m.	1944	
15	Siguiendo la grilla del volumen 14, se restringe el eje cada 1.50 m y se aplicó un pave cada 1.50 m.	768	
16	Se aplicó una separación de 2.00 m al eje paralelo al que se encuentra restringido cada 1.50 m y se realizó un "pave" cada 2.00 m.	468	
17	Al eje paralelo que tiene una separación de 2.00 m, se le restringió cada 3.00 m, terminando la grilla al aplicar un "pave" cada 3.00 m.	228	
18	Se restringió el eje paralelo al que tiene una separación cada 3.00 m con una separación de 4.00 m y se aplicó un "pave" cada 4.00 m.	144	

Continúa en la siguiente página



Tabla A.5 — Continuación de la página anterior

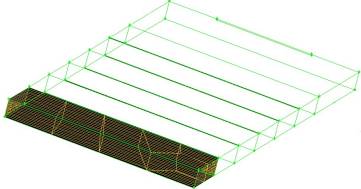
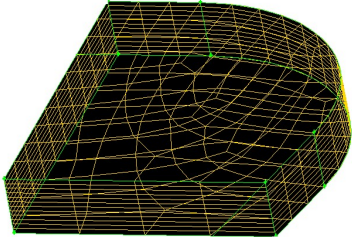
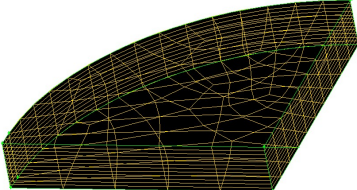
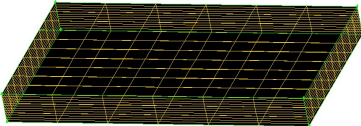
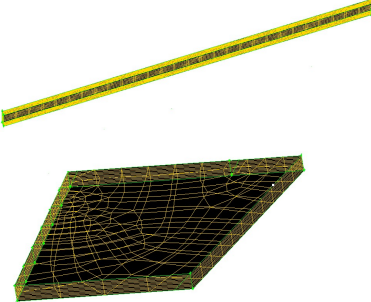
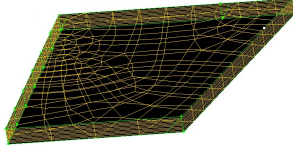
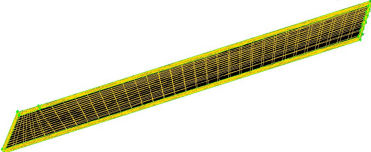
Volumen	Procedimiento	Elementos	Figura
19	Este volumen es el que se une con la zona central por la cual necesita que el eje que se encuentra en contacto con esta zona tenga una separación de 5.00 m después del cual se aplicó un "pave" cada 5.00 m.	72	
20	Este volumen contiene 5 lados. Un arco de circunferencia, 2 lados paralelos al eje x, uno de los cuales forma parte de la pared de la laguna, uno paralelo al eje y y un lado no alineado a un eje que también es limita a la laguna. La parte recta que es paralela al eje x y limita la laguna se restringió cada 1.00 m, el otro lado paralelo se colocó una distancia de 2.00 m, mientras que la parte no alineada también se restringió cada 1.00 m. Se aplicó en la cara un "pave" cada 1.00 m y luego un "cooper" cada 0.15 m en el volumen.	972	
21	Esta constituida por 4 lados, uno de ellos corresponde a un arco circunferencia, junto a este tenemos un eje no alineado a un eje que limita a la laguna, uno que es paralela al eje z y la otra al eje x. El eje recto que es paralelo al eje x se restringió cada 2.00 m, mientras que el lado paralelo al eje z se restringió cada 1.00 m, el eje no alineado cada 0.30 m. Se aplicó en la cara un "pave" cada 1.00 m y luego un "cooper" cada 0.15 m en el volumen.	804	
22	Se aplicó un "map" cada 5.00 m, sabiendo que los lados que se encuentran paralelos al eje z ya se encuentran restringidos cada 1.00 m y los paralelos al eje y tienen una restricción cada 0.15 m.	720	
23	Con el criterio similar al volumen 22 se aplicó un map cada 5.00 m.	3360	
24	Se aplicó un "pave" cada 3.00 m. Se debe considerar que la grilla de éste volumen fue la última que se realizó.	1500	
25	Se aplicó un "submap" cada 5.00 m.	5940	

Tabla A.5: Discretización en la zona de salida (Facultativa 1)



Zona central: Se le asignó el volumen 26, los elementos son más amplios y el flujo es laminar, la forma de discretizar se explica en la tabla siguiente:

Volumen	Procedimiento	Elementos	Figura
26 Cuerpo	Se aplicó un "map" cada 5.00 m en el volumen.	59532	

Tabla A.6: Discretización en la zona central (Facultativa 1)

El total de elementos en la laguna es de 102012, cuyo peor elemento presenta un factor forma de 0.521 y se encuentra en el volumen 18.



Facultativa 2

La laguna Facultativa 2, tiene una forma más regular que la laguna facultativa 1, para su discretización se emplearon 29 volúmenes, distribuidos como se muestran en la Figura A.22 los cuales tienen una grilla de acuerdo a la zona que discretizan.

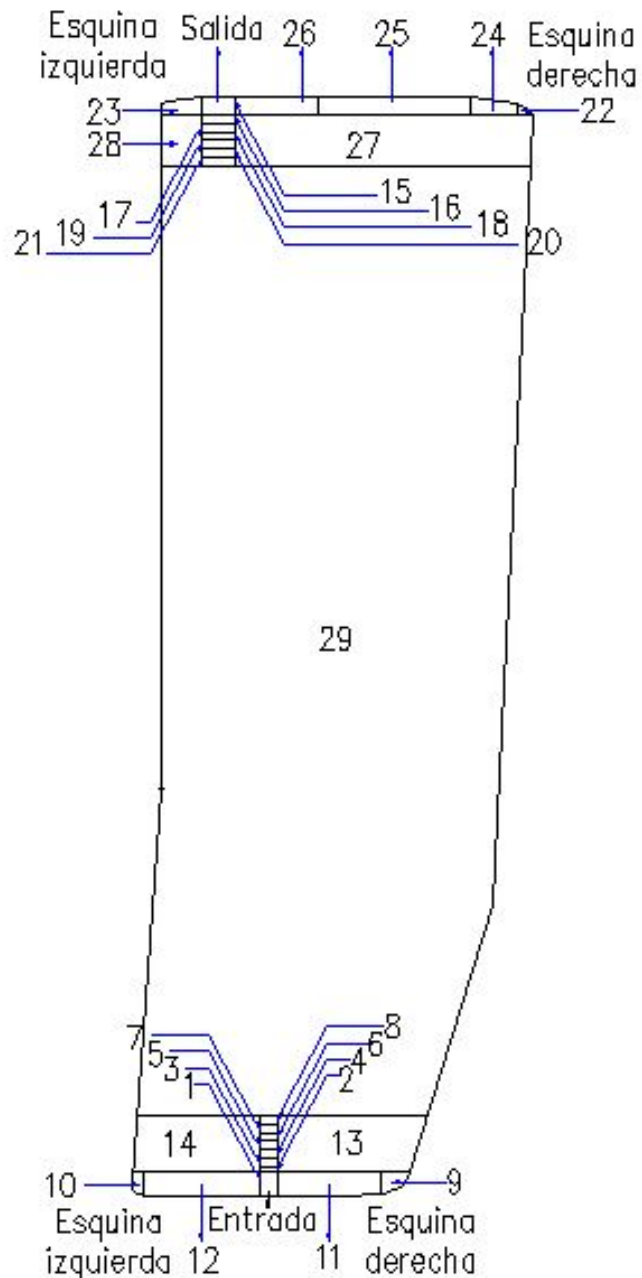


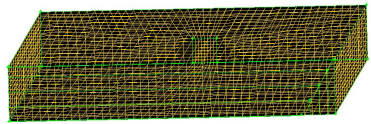
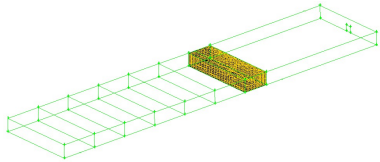
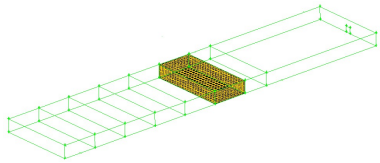
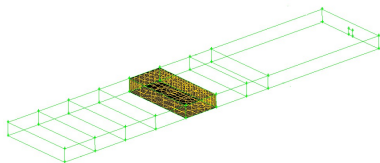
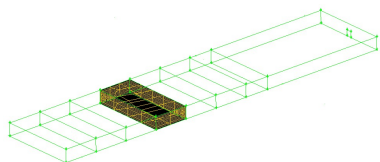
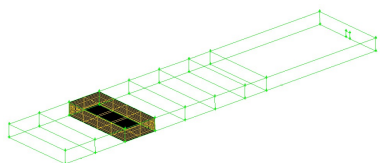
Figura A.22: Esquema de los volúmenes de discretización de la facultativa 2

A continuación se hace una descripción de cómo se realizó la discretización en cada zona de la laguna, indicando el número de volúmenes empleado así como el de los elementos.



Con el mismo criterio que en la laguna facultativa 1, se colocó varios volúmenes en la zona de entrada, salida y central. Se utilizaron similares alternativas para la realización de la grilla.

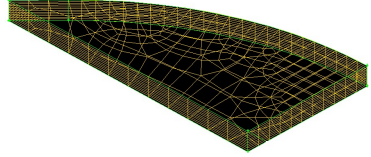
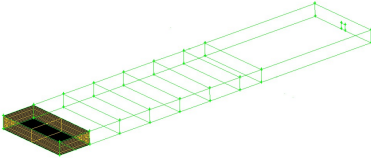
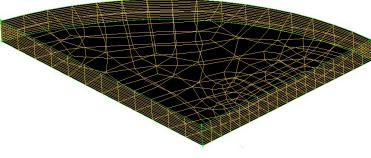
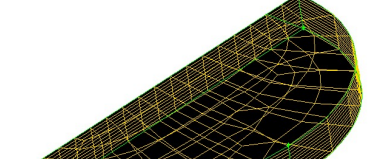
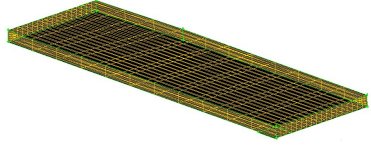
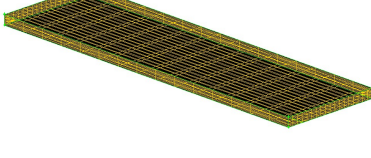
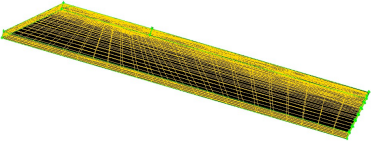
Zona de entrada: Se colocaron 14 volúmenes, de los cuales el volumen 1 corresponde a la zona de entrada, del volumen 2 hasta el 8 se colocaron para la transición entre la grilla en la zona de entrada y la del cuerpo de la laguna. El volumen 9 y 10 corresponde a la esquinas y los volúmenes del 11 al 14 se colocaron para completar la geometría de la zona de entrada. Todo esto se detalla en la siguiente tabla:

Volumen	Procedimiento	Elementos	Figura
1 Entrada	En la cara de entrada se realizó la grilla con un "map" de 0.10 m. Se restringió los lados correspondiente a la profundidad (eje y), con una separación de 0.15 m. Se aplicó al resto de la cara un "submap" cada 0.30 m. En el volumen 1 se aplicó un "submap" cada 1.00 m.	9072	
2	De los volúmenes 2 al 8 se discretizó primero la cara y luego se realizó un Cooper cada 0.15 m. Se tiene una eje restringido cada 0.30 m por lo que se restringió el eje paralelo cada 0.50 m, aplicando a continuación un "pave" cada 0.50 m.	3108	
3	En este volumen en particular, para que se conecte la grilla con las adyacentes a este volumen, se realizó un "map" cada 0.50 m.	2640	
4	Se aplicó una separación de 2.00 m al eje paralelo al que se encuentra restringido cada 0.50 m y se realizó un "map" cada 1.00 m.	1092	
5	Se toma una de las caras en la que ya se encuentra restringida el eje cada 2.00 m y al eje paralelo se restringió cada 3.00 m terminando la grilla al aplicar un "pave" cada 3.00 m.	132	
6	En el caso similar al volumen 3.00 m, se aplica en el volumen un "map" cada 3.00 m.	96	

Continúa en la siguiente página



Tabla A.7 – Continuación de la página anterior

Volumen	Procedimiento	Elementos	Figura
7	Tenemos un eje con grilla cada 3.00 m, por lo que restringimos al eje paralelo a este cada 5.00 m y aplicamos a toda la cara un "pave" cada 3.00 m.	84	
8	Se aplicó un "map" cada 5.00 m en el volumen.	24	
9 Esquina	Esta esquina corresponde a un arco de circunferencia. En el lado paralelo al eje x se restringió cada 2.00 m mientras que el lado que se encuentra paralelo al eje z se restringió cada 1.00 m, realizando en la cara un "pave" cada 2.00 m terminando con un cooper cada 0.15 m en el volumen.	1632	
10 Esquina	Tiene 4 lados, uno de ellos corresponde a un arco circunferencia, junto a este tenemos un eje no alineado a algún eje que limita a la laguna, una que es paralela al eje z y otra al eje x. El lado paralelo al eje z se restringió cada 1.00 m, en el arco de circunferencia se aplicó un doble radio e 0.80 con una separación de 2.00 m. En toda la cara se realizó un "pave" cada 2.00 m y luego un "cooper" cada 0.15 m en el volumen.	852	
11	Se aplicó un "map" cada 5.00 m, sabiendo que los lados que se encuentran paralelos al eje z ya se encuentran restringidos cada 1.00 m y los paralelos al eje y tienen una restricción cada 0.15 m.	2376	
12	Con el criterio similar al volumen 9 se aplicó un "map" cada 5.00 m.	3240	
13	En el volumen 13 y 14 se probaron con diferentes radios y separaciones en los ejes que limitan a la laguna para poder aplicar una "map" en el volumen. En el volumen 13 se restringió el lado con una radio de 0.9 y una separación de 1.00 m, con lo cual finalmente se aplicó un "map" cada 5.00 m.	8556	

Continúa en la siguiente página



Tabla A.7 – Continuación de la página anterior

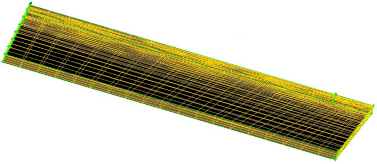
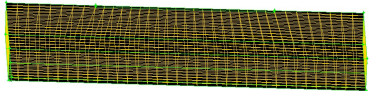
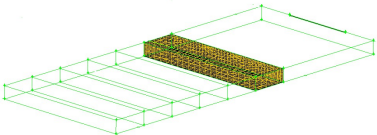
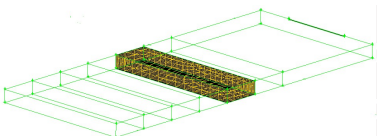
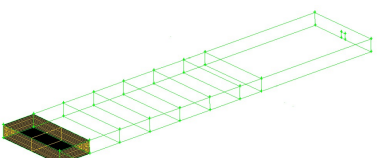
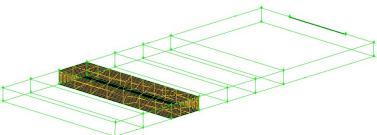
Volumen	Procedimiento	Elementos	Figura
14	Se restringió el eje con una radio de 1.1 y una separación de 1.20 m, terminando con un "map" en el volumen cada 5.00 m.	6612	

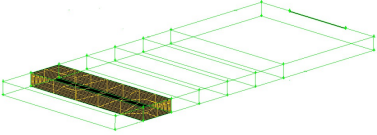
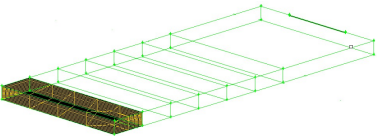
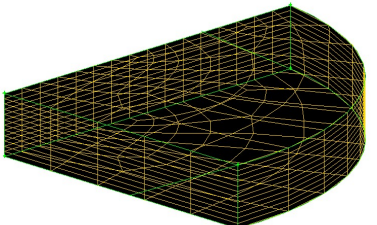
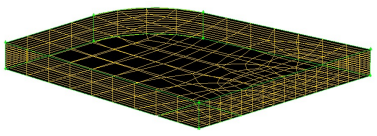
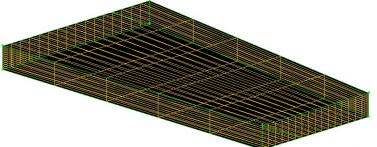
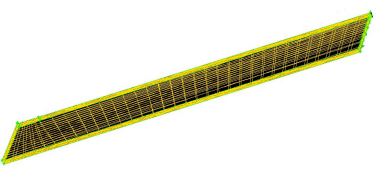
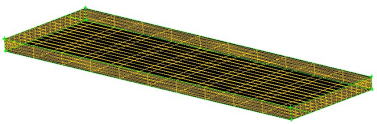
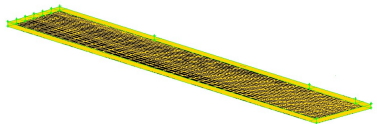
Tabla A.7: Discretización en la zona de entrada (Facultativa 2)

Zona de salida: Se colocaron 14 volúmenes de los cuales el volumen 15 corresponde a la zona de salida, del 16 al 21 son los de transición entre la zona central de la laguna y la salida, el volumen 22 y 23 son los volúmenes de las esquinas y los volúmenes del 24 a 28 complementan la geometría de la zona de salida. El detalle de cada volumen se puede ver en la siguiente tabla.

Volumen	Procedimiento	Elementos	Figura
15 Entrada	En la cara que corresponde al vertedero se aplicó un map de 0.50 m. Se restringió los ejes correspondiente a la profundidad, con una separación de 0.15 m. Se aplicó al resto de la cara un "submap" cada 0.60 m. Se aplicó un "submap" cada 1.00 m en el volumen.	6912	
16	De los volúmenes se discretizó primero la cara y luego se realiza un "cooper" cada 0.15 m. Se tiene un eje restringido cada 0.60 m por lo que restringo el eje paralelo cada 1.00 m, aplicando a continuación un pave cada 1.00 m.	1944	
17	Se restringe el eje cada 1.50 m que se encuentra paralelo al que tiene la separación cada 1.00 m y se aplicó un "pave" cada 1.50 m.	792	
18	Se aplicó una separación de 2.00 m al eje paralelo al que se encuentra restringido cada 1.50 m y se realizó un "pave" cada 2.00 m.	408	
19	Se toma una de las caras en la que ya se encuentra restringido el eje cada 2.00 m y al eje paralelo lo restringo cada 3.00 m terminando la grilla al aplicar un "pave" cada 3.00 m.	264	

Continúa en la siguiente página

**Tabla A.8** – Continuación de la página anterior

Volumen	Procedimiento	Elementos	Figura
20	Se restringió el eje paralelo al que tiene una separación cada 3.00 m con una distancia de 4.00 m y se aplicó un "pave" cada 3.00 m.	120	
21	Este volumen es el que se une con la zona central de la laguna por la cual necesita que el eje que este en contacto con esta zona se encuentre restringido cada 5.00 m después del cual se aplicó un "pave" cada 5.00 m.	72	
22 Esquina	Se tiene en la esquina un arco de circunferencia. En el lado paralelo al eje z se restringió cada 1.00 m, realizando en la cara un "pave" cada 2.00 m y terminando con un "cooper" cada 0.15 m en el volumen.	708	
23 Esquina	Este volumen contiene 5 lados. Un arco de circunferencia, un eje paralelo al eje x, dos lados no alineados a un eje que limitan la laguna y uno paralelo al eje z. El lado de la cara que es paralela al eje x se restringió cada 1.00 m. Se aplicó en la cara un "pave" cada 2.00 m y luego un "cooper" cada 0.15 m en el volumen.	1200	
24	Se aplicó un "map" cada 5.00 m, sabiendo que los lados que se encuentran paralelos al eje z ya se encuentran restringidos cada 1.00 m y los paralelos al eje y tienen una restricción cada 0.15 m.	960	
25	Con el criterio similar al volumen 24 se aplicó un "map" cada 5.00 m.	3072	
26	Se aplicó un "map" cada 5.00 m.	1920	
27	Se aplicó un "map" cada 5.00 m.	1920	

Continúa en la siguiente página



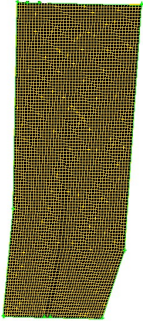
Volumen	Procedimiento	Elementos	Figura
29 Cuerpo	Se aplicó un "map" cada 5.00 m en el volumen.	58608	

Tabla A.9: Discretización en la zona central (Facultativa 2)

Tabla A.8 – Continuación de la página anterior

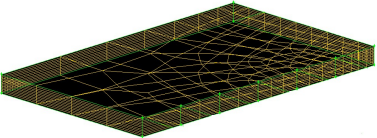
Volumen	Procedimiento	Elementos	Figura
28	Se aplicó un "pave" cada 5.00 m. Se debe considerar que la grilla de éste volumen fue la última que se realizó.	1032	

Tabla A.8: Discretización en la zona de salida (Facultativa 2)

Zona central: Se le asignó el volumen 29, la discretización se indica en la siguiente tabla:
 El total de los elementos en la laguna es de 126168, cuyo peor elemento presenta un factor forma de 0.485 y se encuentra en el volumen 4.



A.7 PROGRAMA PRUEBA.M

```

clear all
file=input('Cual es el nombre del archivo de volúmenes: ','s');
volumenes= xlsread(file,Á2:H15');
n=size(volumenes,1);
para=input('Cual es el nombre del archivo de parámetros: ','s');
hoja=input('Parámetro ingresado ','s');
parametros= xlsread(para,-1);
nn=size(parametros,1);
desc=[{'Volumen'},{'strcat('Valor Promedio ',hoja)}];
estado = xlswrite('400000ele.xlsx',desc,hoja,'A1');
for i=1:1:n,
maxx=volumenes(i,1);
minx=volumenes(i,1);
maxy=volumenes(i,2);
miny=volumenes(i,2);
for j=1:1:3,
if(maxx<volumenes(i,2*j+1))
maxx=volumenes(i,2*j+1);
end
if(minx>volumenes(i,2*j+1))
minx=volumenes(i,2*j+1);
end
if(maxy<volumenes(i,2*j+2))
maxy=volumenes(i,2*j);
end
if(miny>volumenes(i,2*j+2))
miny=volumenes(i,2*j);
end end
p=1;
for ii=1:1:nn
if((minx<parametros(ii,1)) && (parametros(ii,1)<maxx) )

```



```
if((miny<parametros(ii,3)) && (parametros(ii,3)<maxy) )
val(p)=parametros(ii,4);
x(p,i)=parametros(ii,1);
y(p,i)=parametros(ii,3);
p=p+1;
end
end
end
prom(i)=mean(val);
clear p maxx minx miny maxy val
end
prom=prom';
estado = xlswrite('400000ele.xlsx',prom,hoja,'B2');
vol=[1:1:14];
vol=vol';
estado = xlswrite('400000ele.xlsx',vol,hoja,'A2');
clear p maxx minx miny maxy val estado vol prom maxx maxy minx miny
```



A.8 CONFIABILIDAD DE LA GRILLA

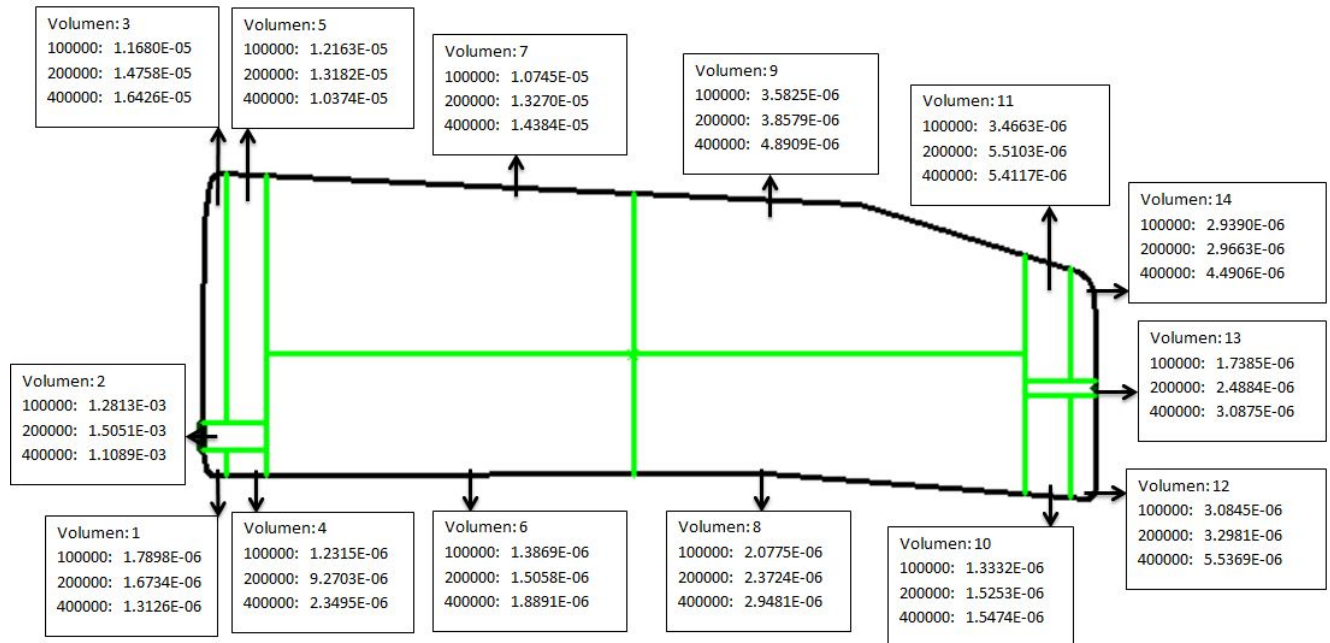


Figura A.23: Promedio de Energía Cinética Turbulenta (k) en superficie

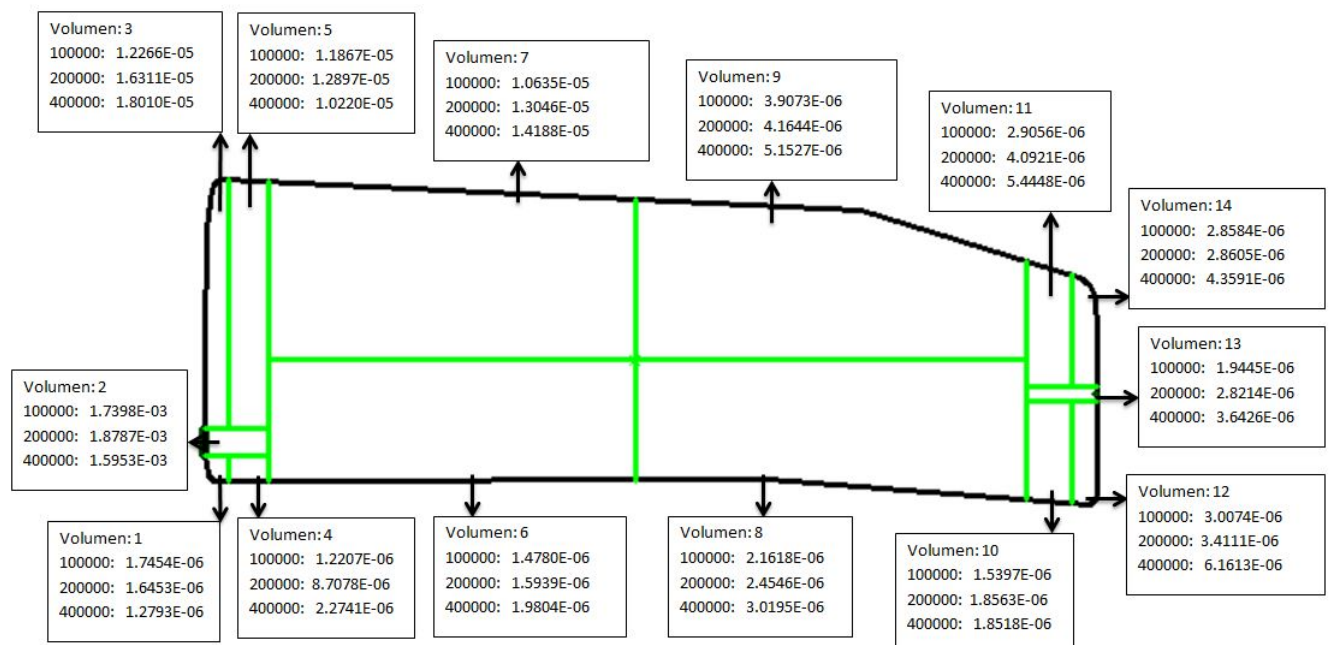


Figura A.24: Promedio de Energía Cinética Turbulenta (k) a dos tercios de profundidad

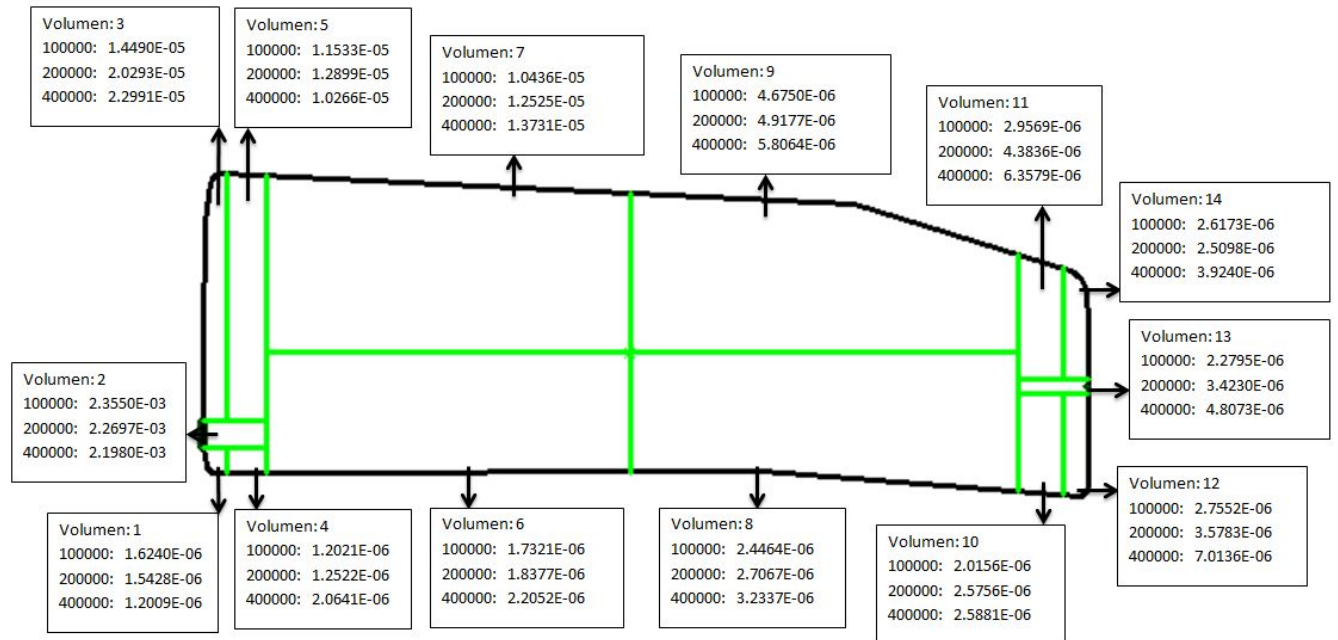


Figura A.25: Promedio de Energía Cinética Turbulenta (k) a un tercio de profundidad

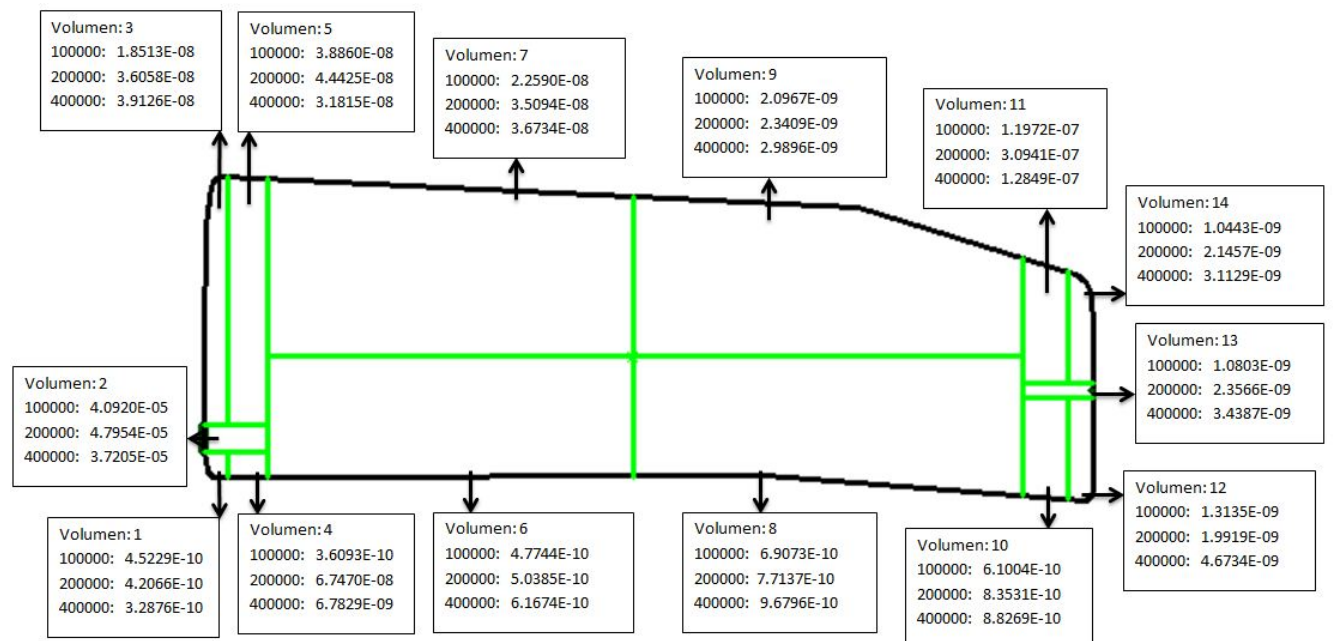


Figura A.26: Promedio de Tasa de disipación turbulenta (ϵ en superficie)

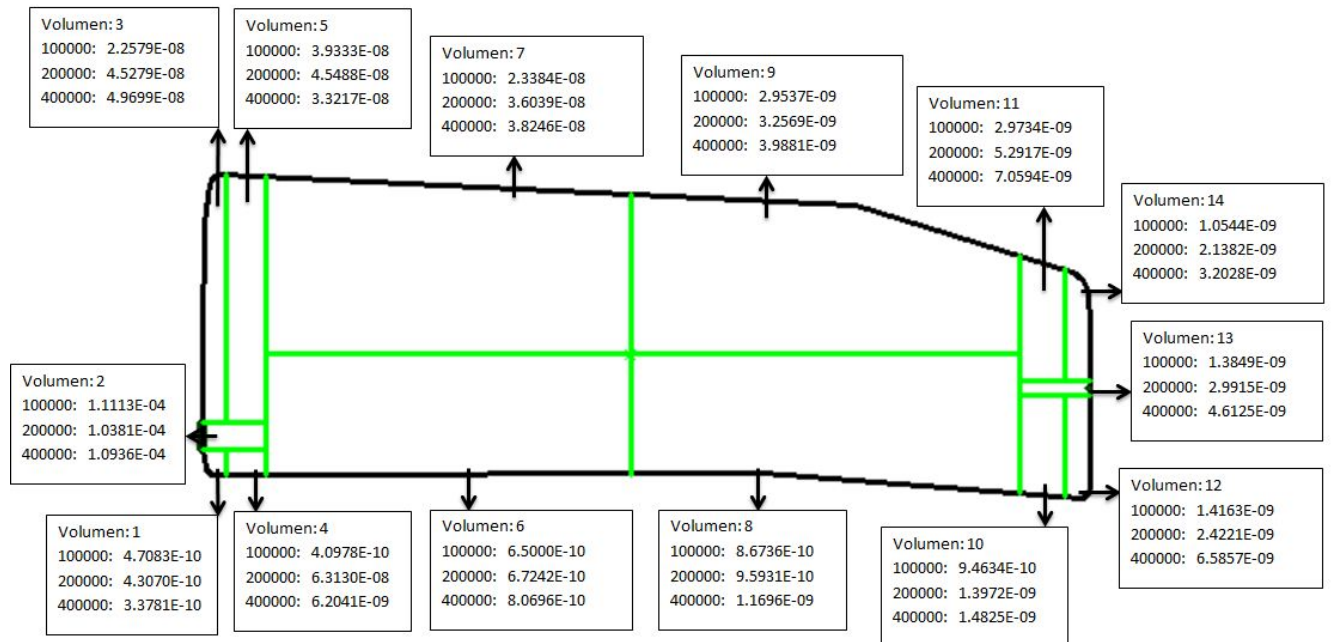


Figura A.27: Promedio de Tasa de disipación turbulenta (ϵ a dos tercios de profundidad)

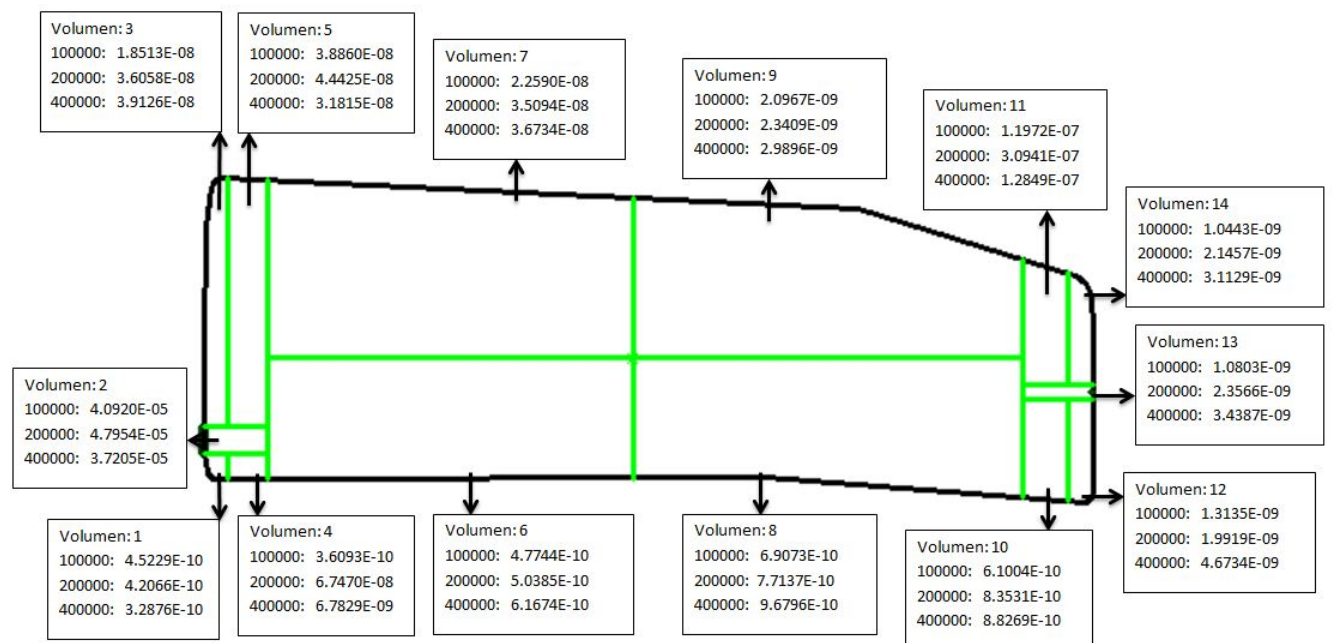


Figura A.28: Promedio de Tasa de disipación turbulenta (ϵ a un tercios de profundidad)

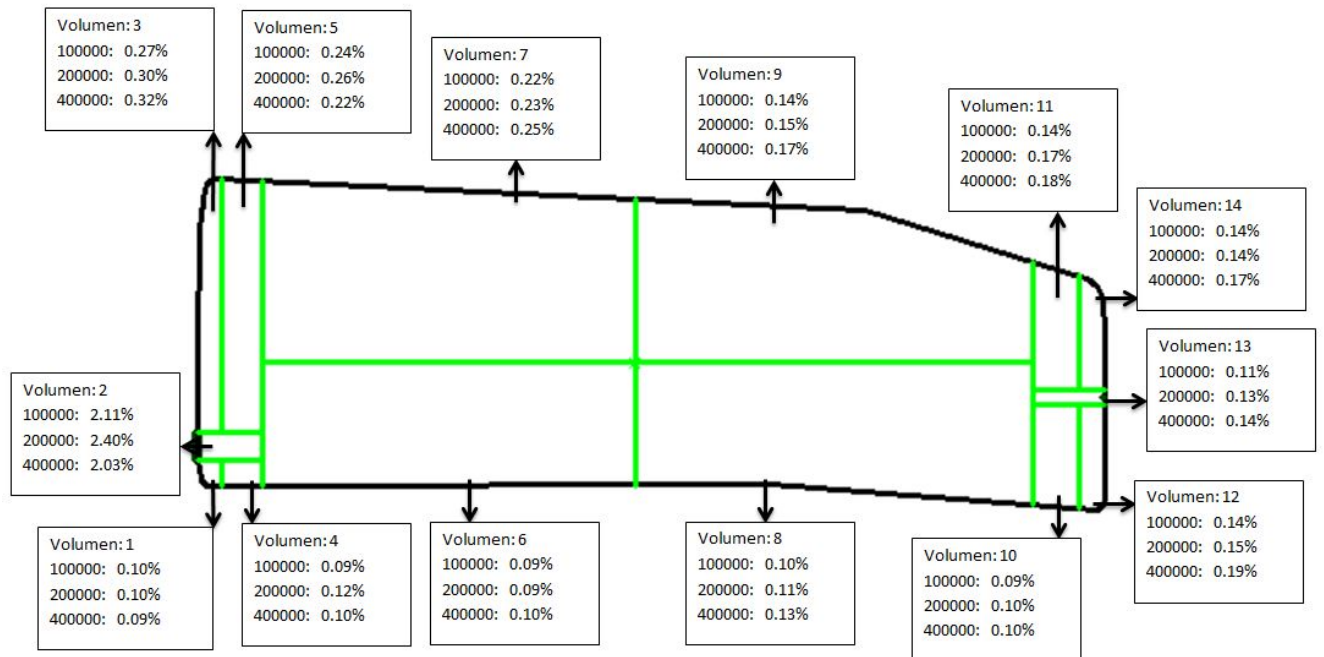


Figura A.29: Promedio de Intensidad de turbulencia (I) en superficie

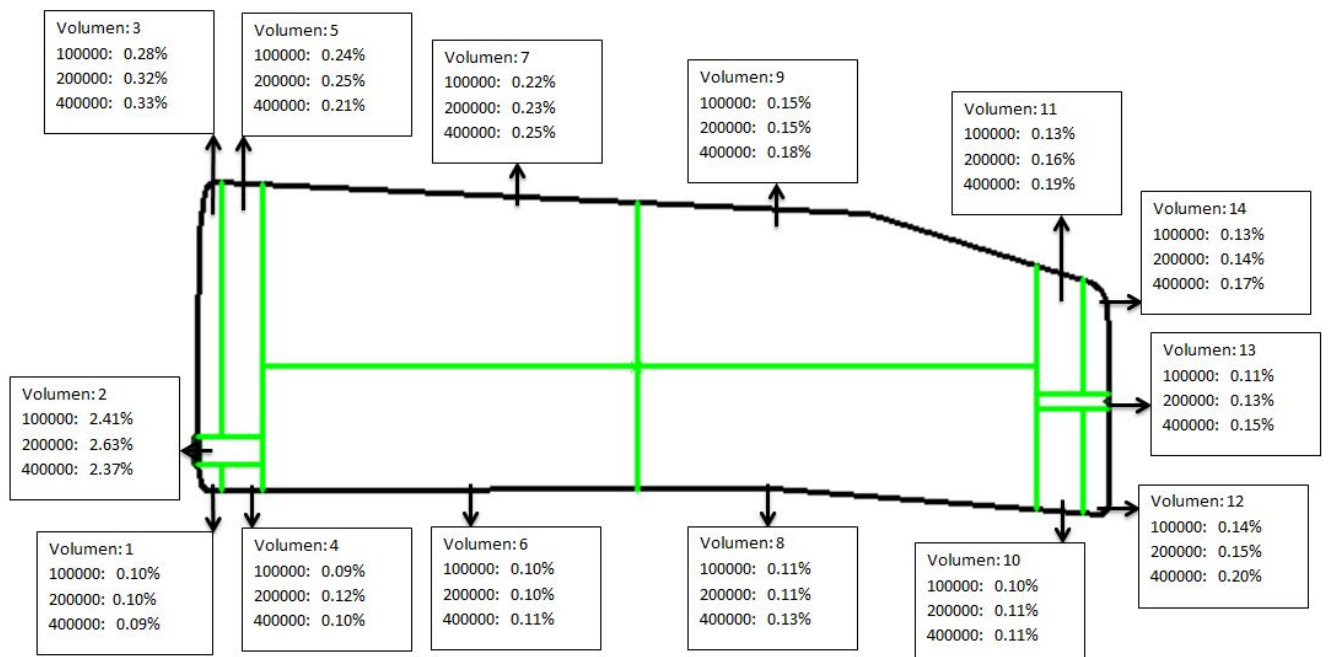


Figura A.30: Promedio de Intensidad de turbulencia (I) a dos tercios de profundidad

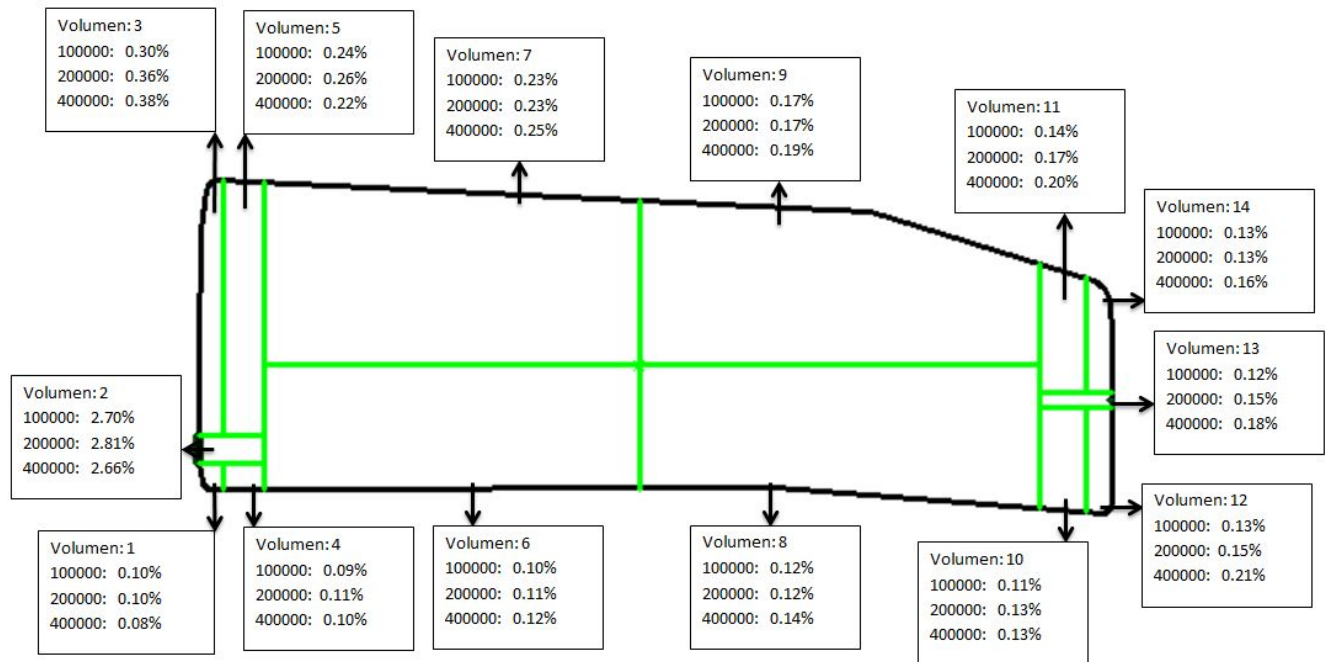


Figura A.31: Promedio de Intensidad de turbulencia (I) a un tercio de profundidad

Volumen	1/3	2/3	Superficie
1	26.06 %	26.70 %	26.66 %
2	6.67 %	8.31 %	13.46 %
3	58.66 %	46.83 %	40.63 %
4	71.70 %	86.29 %	90.77 %
5	10.98 %	13.88 %	14.71 %
6	27.31 %	33.99 %	36.21 %
7	31.57 %	33.41 %	33.86 %
8	32.18 %	39.67 %	41.91 %
9	24.20 %	31.87 %	36.52 %
10	28.40 %	20.27 %	16.06 %
11	115.02 %	87.39 %	56.12 %
12	154.56 %	104.87 %	79.51 %
13	110.89 %	87.33 %	77.60 %
14	49.93 %	52.50 %	52.79 %

Tabla A.10: Diferencia en % de las lagunas de 100000 y 400000 con respecto a k



Volumen	1/3	2/3	Superficie
1	22.16%	22.24%	21.56%
2	3.16%	15.09%	26.32%
3	13.29%	10.42%	11.30%
4	64.83%	73.88%	74.66%
5	20.41%	20.76%	21.30%
6	20.00%	24.25%	25.46%
7	9.63%	8.76%	8.39%
8	19.47%	23.01%	24.27%
9	18.07%	23.73%	26.78%
10	0.48%	0.24%	1.45%
11	45.04%	33.06%	1.79%
12	96.00%	80.63%	67.88%
13	40.44%	29.11%	24.08%
14	56.35%	52.39%	51.39%

Tabla A.11: Diferencia en % de las lagunas de 200000 y 400000 con respecto a k

Volumen	1/3	2/3	Superficie
1	28.78%	28.25%	27.31%
2	0.82%	1.59%	9.08%
3	121.18%	120.11%	111.34%
4	593.44%	1414.01%	1779.27%
5	1.53%	15.55%	18.13%
6	11.83%	24.15%	29.17%
7	62.93%	63.56%	62.61%
8	19.04%	34.85%	40.14%
9	27.26%	35.02%	42.58%
10	66.86%	56.65%	44.69%
11	222.11%	137.42%	7.32%
12	547.81%	364.98%	255.79%
13	257.81%	233.06%	218.30%
14	220.13%	203.75%	198.10%

Tabla A.12: Diferencia en % de las lagunas de 100000 y 400000 con respecto a ϵ



Volumen	1/3	2/3	Superficie
1	18.56%	12.47%	21.85%
2	28.74%	9.72%	22.42%
3	16.98%	3.52%	8.51%
4	90.79%	15.38%	89.95%
5	21.48%	15.37%	28.38%
6	12.08%	11.05%	22.40%
7	11.45%	7.43%	4.67%
8	13.13%	12.77%	25.49%
9	16.32%	14.46%	27.71%
10	8.61%	1.86%	5.67%
11	67.92%	16.08%	58.47%
12	216.01%	35.04%	134.61%
13	68.85%	12.90%	45.92%
14	67.39%	22.95%	45.08%

Tabla A.13: Diferencia en % de las lagunas de 200000 y 400000 con respecto a ϵ

Volumen	1/3	2/3	Superficie
1	14.57%	14.78%	14.80%
2	1.47%	1.51%	3.61%
3	24.10%	19.55%	17.43%
4	12.83%	11.14%	9.97%
5	10.58%	10.79%	10.83%
6	10.24%	12.37%	12.84%
7	10.83%	12.90%	13.63%
8	15.70%	20.27%	21.83%
9	11.69%	16.44%	19.29%
10	10.23%	6.46%	5.14%
11	48.67%	39.97%	31.53%
12	60.86%	44.56%	35.12%
13	44.32%	34.63%	30.71%
14	23.06%	24.25%	24.36%

Tabla A.14: Diferencia en % de las lagunas de 100000 y 400000 con respecto a ϵ



Volumen	1/3	2/3	Superficie
1	12.44 %	12.47 %	12.05 %
2	5.57 %	9.72 %	15.54 %
3	4.34 %	3.52 %	3.96 %
4	11.45 %	15.38 %	17.12 %
5	15.90 %	15.37 %	15.40 %
6	9.01 %	11.05 %	11.48 %
7	6.86 %	7.43 %	7.63 %
8	10.65 %	12.77 %	13.71 %
9	11.38 %	14.46 %	16.27 %
10	1.83 %	1.86 %	0.44 %
11	20.52 %	16.08 %	6.74 %
12	43.68 %	35.04 %	29.75 %
13	18.34 %	12.90 %	10.41 %
14	24.27 %	22.95 %	22.62 %

Tabla A.15: Diferencia en % de las lagunas de 200000 y 400000 con respecto a l

Apéndice B

RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE TRAZADORES

B.1 PRUEBA DE TRAZADORES EN LA LAGUNA FACULTATIVA 2



Muestra	Fecha	Hora	Lectura 1	Lectura 2	Promedio corregido	Ai	tmi (dias)	Ai*tmi	Ai*tmi ²
1	09/09/2010	11:08:32	2.100	1.999	0.037	0.2	0.0	0.0	0.0
2	09/09/2010	11:13:32	2.066	2.119	0.080	0.3	0.0	0.0	0.0
3	09/09/2010	11:18:32	2.220	2.187	0.191	0.7	0.0	0.0	0.0
4	09/09/2010	11:23:32	2.085	2.085	0.073	0.7	0.0	0.0	0.0
5	09/09/2010	11:28:32	2.107	2.285	0.184	0.6	0.0	0.0	0.0
6	09/09/2010	11:33:32	2.330	2.414	0.360	1.4	0.0	0.0	0.0
7	09/09/2010	11:38:32	2.004	2.017	0.000	0.9	0.0	0.0	0.0
8	09/09/2010	11:43:32	2.182	2.145	0.151	0.4	0.0	0.0	0.0
9	09/09/2010	11:48:32	1.930	1.899	0.000	0.4	0.0	0.0	0.0
10	09/09/2010	11:53:32	2.109	2.046	0.065	0.2	0.0	0.0	0.0
11	09/09/2010	11:58:32	1.681	1.789	0.000	0.2	0.0	0.0	0.0
12	09/09/2010	12:03:32	1.730	1.735	0.000	0.0	0.0	0.0	0.0
13	09/09/2010	12:08:32	1.552	1.559	0.000	0.0	0.0	0.0	0.0
14	09/09/2010	12:13:32	1.717	1.757	0.000	0.0	0.0	0.0	0.0
15	09/09/2010	12:18:32	1.863	1.856	0.000	0.0	0.0	0.0	0.0
16	09/09/2010	12:23:32	1.871	1.893	0.000	0.0	0.0	0.0	0.0
17	09/09/2010	12:28:32	1.657	1.733	0.000	0.0	0.0	0.0	0.0
18	09/09/2010	12:33:32	1.977	2.012	0.000	0.0	0.0	0.0	0.0
19	09/09/2010	12:38:32	1.814	1.839	0.000	0.0	0.0	0.0	0.0
20	09/09/2010	12:43:32	2.091	2.139	0.103	0.3	0.1	0.0	0.0
21	09/09/2010	12:48:32	2.270	2.232	0.239	0.9	0.1	0.1	0.0
22	09/09/2010	12:53:32	2.566	2.541	0.541	1.9	0.1	0.2	0.0
23	09/09/2010	12:58:32	2.166	2.261	0.201	1.9	0.1	0.1	0.0
24	09/09/2010	13:00:00	1.973	1.938	0.000	0.0	0.0	0.0	0.0
25	09/09/2010	13:05:00	1.629	1.655	0.000	0.0	0.0	0.0	0.0

Continúa en la siguiente página



Tabla B.1 – Continuación de la página anterior

Muestra	Fecha	Hora	Lectura 1	Lectura 2	Promedio corregido	Ai	tmi (días)	Ai*tmi	Ai*tmi ²
26	09/09/2010	13:10:00	1.901	1.973	0.000	0.0	0.0	0.0	0.0
27	09/09/2010	13:15:00	2.065	1.903	0.000	0.0	0.0	0.0	0.0
28	09/09/2010	13:20:00	2.125	2.153	0.127	0.0	0.0	0.0	0.0
29	09/09/2010	13:25:00	2.124	2.181	0.140	0.3	0.1	0.0	0.0
30	09/09/2010	13:30:00	2.423	2.468	0.433	0.7	0.1	0.1	0.0
31	09/09/2010	13:35:00	2.209	2.220	0.202	1.4	0.1	0.1	0.0
32	09/09/2010	13:40:00	1.957	1.974	0.000	1.6	0.1	0.2	0.0
33	09/09/2010	13:45:00	2.084	2.058	0.059	0.5	0.1	0.1	0.0
34	09/09/2010	13:50:00	2.048	2.022	0.023	0.1	0.1	0.0	0.0
35	09/09/2010	13:55:00	2.290	2.187	0.226	0.2	0.1	0.0	0.0
36	09/09/2010	14:00:00	2.297	2.286	0.279	0.6	0.1	0.1	0.0
37	09/09/2010	14:05:00	2.166	2.099	0.120	1.3	0.1	0.2	0.0
38	09/09/2010	14:10:00	2.053	2.179	0.104	1.0	0.1	0.1	0.0
39	09/09/2010	14:15:00	2.046	1.995	0.008	0.6	0.1	0.1	0.0
40	09/09/2010	14:20:00	2.045	2.071	0.046	0.3	0.1	0.0	0.0
41	09/09/2010	14:25:00	1.947	1.964	0.000	0.1	0.1	0.0	0.0
42	09/09/2010	14:30:00	2.097	2.027	0.050	0.1	0.1	0.0	0.0
43	09/09/2010	14:35:00	2.038	2.024	0.019	0.1	0.1	0.0	0.0
44	09/09/2010	14:40:00	2.104	2.076	0.078	0.2	0.1	0.0	0.0
45	09/09/2010	14:45:00	2.327	2.270	0.286	0.2	0.2	0.0	0.0
46	09/09/2010	14:50:00	2.466	2.319	0.380	0.9	0.2	0.1	0.0
47	09/09/2010	14:55:00	2.505	2.589	0.535	1.7	0.2	0.3	0.0
48	09/09/2010	15:00:00	2.469	2.424	0.434	2.3	0.2	0.4	0.1
49	09/09/2010	15:05:00	2.581	2.561	0.559	2.4	0.2	0.4	0.1
50	09/09/2010	15:10:00	3.120	3.616	1.356	2.5	0.2	0.4	0.1

Continúa en la siguiente página



Tabla B.1 – Continuación de la página anterior

Muestra	Fecha	Hora	Lectura 1	Lectura 2	Promedio corregido	Ai	tmi (días)	Ai*tmi	Ai*tmi ²
51	09/09/2010	15:15:00	2.982	3.058	1.008	4.8	0.2	0.8	0.1
52	09/09/2010	15:20:00	2.827	2.895	0.849	5.9	0.2	1.0	0.2
53	09/09/2010	15:25:00	2.482	2.476	0.467	4.6	0.2	0.8	0.1
54	09/09/2010	15:30:00	2.366	2.329	0.335	3.3	0.2	0.6	0.1
55	09/09/2010	15:35:00	2.183	2.032	0.095	2.0	0.2	0.4	0.1
56	09/09/2010	15:40:00	1.998	2.084	0.029	1.1	0.2	0.2	0.0
57	09/09/2010	15:45:00	1.980	2.094	0.025	0.3	0.2	0.1	0.0
58	09/09/2010	15:50:00	2.111	2.112	0.099	0.1	0.2	0.0	0.0
59	09/09/2010	15:55:00	2.149	2.184	0.154	0.3	0.2	0.1	0.0
60	09/09/2010	16:00:00	2.440	2.410	0.413	0.6	0.2	0.1	0.0
61	09/09/2010	16:05:00	2.038	2.195	0.104	1.4	0.2	0.3	0.1
62	09/09/2010	16:10:00	2.142	2.163	0.140	1.3	0.2	0.3	0.1
63	09/09/2010	16:15:00	2.110	2.192	0.139	0.6	0.2	0.1	0.0
64	09/09/2010	16:20:00	1.968	1.985	0.000	0.7	0.2	0.2	0.0
65	09/09/2010	16:25:00	1.984	2.008	0.000	0.3	0.2	0.1	0.0
66	09/09/2010	16:30:00	2.425	2.321	0.361	0.0	0.0	0.0	0.0
67	09/09/2010	16:35:00	2.113	2.094	0.091	0.9	0.2	0.2	0.0
68	09/09/2010	16:40:00	2.203	2.254	0.216	1.1	0.2	0.3	0.1
69	09/09/2010	16:45:00	2.368	2.285	0.314	0.8	0.2	0.2	0.0
70	09/09/2010	16:50:00	2.196	2.171	0.171	1.3	0.2	0.3	0.1
71	09/09/2010	16:55:00	2.326	2.257	0.279	1.2	0.2	0.3	0.1
72	09/09/2010	17:00:00	2.291	2.282	0.274	1.1	0.2	0.3	0.1
73	09/09/2010	17:05:00	2.027	2.019	0.011	1.4	0.2	0.3	0.1
74	09/09/2010	17:10:00	2.466	2.477	0.459	0.7	0.3	0.2	0.0
75	09/09/2010	17:15:00	2.467	2.502	0.472	1.2	0.3	0.3	0.1

Continúa en la siguiente página



Tabla B.1 – Continuación de la página anterior

Muestra	Fecha	Hora	Lectura 1	Lectura 2	Promedio corregido	Ai	tmi (días)	Ai*tmi	Ai*tmi ²
76	09/09/2010	17:20:00	2.762	2.706	0.722	2.3	0.3	0.6	0.2
77	09/09/2010	17:25:00	2.651	2.612	0.619	3.0	0.3	0.8	0.2
78	09/09/2010	17:30:00	2.737	2.768	0.740	3.4	0.3	0.9	0.2
79	09/09/2010	17:35:00	2.943	2.866	0.892	3.4	0.3	0.9	0.2
80	09/09/2010	17:40:00	2.838	2.889	0.851	4.1	0.3	1.1	0.3
81	09/09/2010	17:45:00	2.968	2.954	0.949	4.4	0.3	1.2	0.3
82	09/09/2010	17:50:00	2.974	2.964	0.957	4.5	0.3	1.3	0.4
83	09/09/2010	17:55:00	3.405	3.371	1.376	4.8	0.3	1.3	0.4
84	09/09/2010	18:00:00	3.679	3.687	1.671	5.8	0.3	1.7	0.5
85	09/09/2010	18:05:00	3.931	3.893	1.900	7.6	0.3	2.2	0.6
86	09/09/2010	18:10:00	4.394	4.449	2.409	8.9	0.3	2.6	0.8
87	09/09/2010	18:15:00	4.887	4.752	2.807	10.8	0.3	3.2	0.9
88	09/09/2010	18:20:00	4.856	4.953	2.892	13.0	0.3	3.9	1.2
89	09/09/2010	18:25:00	4.891	4.832	2.849	14.2	0.3	4.3	1.3
90	09/09/2010	18:30:00	4.767	4.704	2.723	14.4	0.3	4.4	1.4
91	09/09/2010	18:35:00	5.391	5.261	3.314	13.9	0.3	4.3	1.3
92	09/09/2010	18:40:00	5.224	5.211	3.205	15.1	0.3	4.7	1.5
93	09/09/2010	18:45:00	5.185	5.285	3.223	16.3	0.3	5.2	1.6
94	09/09/2010	18:50:00	5.381	5.426	3.391	16.1	0.3	5.2	1.7
95	09/09/2010	18:55:00	5.739	5.744	3.729	16.5	0.3	5.4	1.7
96	09/09/2010	19:05:00	5.410	5.385	3.385	17.8	0.3	5.8	1.9
97	09/09/2010	19:15:00	5.621	5.667	3.632	35.6	0.3	11.8	3.9
98	09/09/2010	19:25:00	5.290	5.264	3.265	35.1	0.3	11.9	4.1
99	09/09/2010	19:35:00	5.257	5.130	3.181	34.5	0.3	12.0	4.2
100	09/09/2010	19:45:00	4.338	4.332	2.323	32.2	0.4	11.4	4.0

Continúa en la siguiente página



Tabla B.1 – Continuación de la página anterior

Muestra	Fecha	Hora	Lectura 1	Lectura 2	Promedio corregido	Ai	tmi (días)	Ai*tmi	Ai*tmi ²
101	09/09/2010	19:55:00	4.298	4.245	2.259	27.5	0.4	9.9	3.6
102	09/09/2010	20:05:00	4.126	4.122	2.112	22.9	0.4	8.4	3.1
103	09/09/2010	20:15:00	4.202	4.219	2.198	21.9	0.4	8.2	3.1
104	09/09/2010	20:25:00	4.033	4.103	2.056	21.5	0.4	8.2	3.1
105	09/09/2010	20:35:00	3.842	3.883	1.850	21.3	0.4	8.3	3.2
106	09/09/2010	20:45:00	5.810	5.852	3.819	19.5	0.4	7.7	3.1
107	09/09/2010	20:55:00	7.438	7.311	5.362	28.3	0.4	11.4	4.6
108	09/09/2010	21:05:00	7.380	7.217	5.286	45.9	0.4	18.8	7.7
109	09/09/2010	21:15:00	7.105	7.126	5.103	53.2	0.4	22.2	9.2
110	09/09/2010	21:25:00	6.726	6.859	4.780	51.9	0.4	22.0	9.3
111	09/09/2010	21:35:00	6.828	6.823	4.813	49.4	0.4	21.3	9.2
112	09/09/2010	21:45:00	6.633	6.598	4.603	48.0	0.4	21.0	9.2
113	09/09/2010	21:55:00	6.724	6.730	4.715	47.1	0.4	20.9	9.3
114	09/09/2010	22:05:00	6.436	6.422	4.417	46.6	0.5	21.0	9.5
115	09/09/2010	22:15:00	6.373	6.403	4.376	45.7	0.5	20.9	9.6
116	09/09/2010	22:25:00	6.397	6.330	4.351	44.0	0.5	20.5	9.5
117	09/09/2010	22:35:00	6.782	6.701	4.729	43.6	0.5	20.6	9.7
118	09/09/2010	22:45:00	6.411	6.322	4.354	45.4	0.5	21.8	10.4
119	09/09/2010	22:55:00	6.711	6.621	4.654	45.4	0.5	22.1	10.7
120	09/09/2010	23:05:00	3.817	3.752	1.772	45.0	0.5	22.2	11.0
121	09/09/2010	23:15:00	3.894	3.882	1.876	32.1	0.5	16.0	8.0
122	09/09/2010	23:25:00	4.061	4.138	2.087	18.2	0.5	9.2	4.7
123	09/09/2010	23:35:00	4.145	4.072	2.096	19.8	0.5	10.2	5.2
124	09/09/2010	23:45:00	3.748	3.671	1.697	20.9	0.5	10.9	5.7
125	09/09/2010	23:55:00	3.993	3.826	1.897	19.0	0.5	10.0	5.3

Continúa en la siguiente página



Tabla B.1 – Continuación de la página anterior

Muestra	Fecha	Hora	Lectura 1	Lectura 2	Promedio corregido	Ai	tmi (días)	Ai*tmi	Ai*tmi ²
126	10/09/2010	0:05:00	3.772	3.894	1.821	18.0	0.5	9.6	5.1
127	10/09/2010	0:15:00	3.849	3.834	1.829	18.6	0.5	10.1	5.5
128	10/09/2010	0:25:00	3.915	3.938	1.914	18.2	0.5	10.0	5.5
129	10/09/2010	0:35:00	4.050	4.000	2.013	18.7	0.6	10.4	5.8
130	10/09/2010	0:45:00	3.860	3.900	1.868	19.6	0.6	11.0	6.2
131	10/09/2010	0:55:00	3.932	4.044	1.976	19.4	0.6	11.0	6.3
132	10/09/2010	1:05:00	4.290	4.225	2.245	19.2	0.6	11.1	6.4
133	10/09/2010	1:15:00	4.535	4.521	2.516	21.1	0.6	12.3	7.2
134	10/09/2010	1:25:00	4.397	4.425	2.399	23.8	0.6	14.1	8.3
135	10/09/2010	1:35:00	4.523	4.548	2.523	24.6	0.6	14.7	8.8
136	10/09/2010	1:45:00	4.854	4.803	2.816	24.6	0.6	14.9	9.0
137	10/09/2010	1:55:00	4.818	4.770	2.782	26.7	0.6	16.3	10.0
138	10/09/2010	2:05:00	4.914	4.977	2.933	28.0	0.6	17.3	10.7
139	10/09/2010	2:15:00	4.753	4.715	2.722	28.6	0.6	17.9	11.2
140	10/09/2010	2:25:00	4.569	4.526	2.535	28.3	0.6	17.9	11.3
141	10/09/2010	2:35:00	4.470	4.557	2.501	26.3	0.6	16.8	10.7
142	10/09/2010	2:45:00	4.355	4.384	2.357	25.2	0.6	16.3	10.5
143	10/09/2010	2:55:00	4.557	4.449	2.491	24.3	0.7	15.9	10.3
144	10/09/2010	3:05:00	3.904	3.845	1.862	24.2	0.7	16.0	10.6
145	10/09/2010	3:15:00	3.403	3.305	1.342	21.8	0.7	14.5	9.7
146	10/09/2010	3:25:00	3.232	3.318	1.263	16.0	0.7	10.8	7.3
147	10/09/2010	3:35:00	3.487	3.391	1.427	13.0	0.7	8.9	6.0
148	10/09/2010	3:45:00	4.065	4.156	2.098	13.4	0.7	9.2	6.4
149	10/09/2010	3:55:00	3.612	3.556	1.572	17.6	0.7	12.2	8.5
150	10/09/2010	4:05:00	3.471	3.479	1.463	18.3	0.7	12.9	9.0

Continúa en la siguiente página



Tabla B.1 – Continuación de la página anterior

Muestra	Fecha	Hora	Lectura 1	Lectura 2	Promedio corregido	Ai	tmi (días)	Ai*tmi	Ai*tmi ²
151	10/09/2010	4:15:00	3.333	3.319	1.314	15.2	0.7	10.7	7.6
152	10/09/2010	4:25:00	3.318	3.236	1.265	13.9	0.7	9.9	7.1
153	10/09/2010	4:35:00	3.225	3.186	1.193	12.9	0.7	9.3	6.7
154	10/09/2010	4:45:00	3.405	3.325	1.353	12.3	0.7	9.0	6.5
155	10/09/2010	4:55:00	3.338	3.250	1.282	12.7	0.7	9.4	6.9
156	10/09/2010	5:05:00	3.354	3.328	1.329	13.2	0.7	9.8	7.3
157	10/09/2010	5:15:00	3.391	3.331	1.349	13.1	0.8	9.8	7.3
158	10/09/2010	5:25:00	3.200	3.336	1.256	13.4	0.8	10.1	7.7
159	10/09/2010	5:35:00	3.330	3.350	1.328	13.0	0.8	9.9	7.6
160	10/09/2010	5:45:00	3.381	3.487	1.422	12.9	0.8	10.0	7.7
161	10/09/2010	5:55:00	3.234	3.392	1.301	13.7	0.8	10.7	8.3
162	10/09/2010	6:05:00	3.410	3.434	1.410	13.6	0.8	10.7	8.4
163	10/09/2010	6:15:00	3.469	3.382	1.413	13.6	0.8	10.7	8.5
164	10/09/2010	6:25:00	3.647	3.747	1.685	14.1	0.8	11.3	9.0
165	10/09/2010	6:35:00	3.524	3.513	1.506	15.5	0.8	12.5	10.1
166	10/09/2010	6:45:00	3.617	3.687	1.640	16.0	0.8	13.0	10.5
167	10/09/2010	6:55:00	3.700	3.828	1.752	15.7	0.8	12.9	10.6
168	10/09/2010	7:10:00	3.355	3.340	1.335	17.0	0.8	14.0	11.6
169	10/09/2010	7:20:00	3.463	3.429	1.434	23.2	0.8	19.3	16.1
170	10/09/2010	7:30:00	3.305	3.411	1.346	13.8	0.8	11.7	9.9
171	10/09/2010	7:40:00	3.454	3.437	1.433	13.9	0.9	11.8	10.1
172	10/09/2010	7:50:00	3.660	3.675	1.655	13.9	0.9	11.9	10.2
173	10/09/2010	8:00:00	3.653	3.594	1.611	15.4	0.9	13.4	11.5
174	10/09/2010	8:10:00	3.444	3.302	1.361	16.3	0.9	14.2	12.4
175	10/09/2010	8:20:00	3.281	3.146	1.201	14.9	0.9	13.1	11.5

Continúa en la siguiente página



Tabla B.1 – Continuación de la página anterior

Muestra	Fecha	Hora	Lectura 1	Lectura 2	Promedio corregido	Ai	tmi (días)	Ai*tmi	Ai*tmi ²
176	10/09/2010	8:30:00	3.023	3.057	1.028	12.8	0.9	11.3	10.0
177	10/09/2010	8:40:00	2.970	2.930	0.938	11.1	0.9	9.9	8.9
178	10/09/2010	8:50:00	2.994	3.036	1.003	9.8	0.9	8.8	7.9
179	10/09/2010	9:00:00	3.019	3.132	1.063	9.7	0.9	8.8	8.0
180	10/09/2010	9:10:00	3.429	3.377	1.391	10.3	0.9	9.4	8.6
181	10/09/2010	9:20:00	3.251	3.123	1.175	12.3	0.9	11.3	10.4
182	10/09/2010	9:30:00	3.432	3.586	1.497	12.8	0.9	11.9	11.0
183	10/09/2010	9:40:00	3.467	3.330	1.386	13.4	0.9	12.5	11.7
184	10/09/2010	9:50:00	3.402	3.348	1.363	14.4	0.9	13.6	12.8
185	10/09/2010	10:00:00	3.432	3.431	1.419	13.7	0.9	13.0	12.3
186	10/09/2010	10:10:00	3.287	3.291	1.277	13.9	1.0	13.3	12.7
187	10/09/2010	10:20:00	3.202	3.301	1.239	13.5	1.0	13.0	12.5
188	10/09/2010	10:30:00	3.747	3.881	1.802	12.6	1.0	12.2	11.8
189	10/09/2010	10:40:00	3.813	3.894	1.841	15.2	1.0	14.8	14.5
190	10/09/2010	10:50:00	3.733	3.752	1.730	18.2	1.0	17.9	17.6
191	10/09/2010	11:00:00	3.270	3.389	1.317	17.9	1.0	17.7	17.5
192	10/09/2010	11:10:00	3.552	3.620	1.574	15.2	1.0	15.2	15.1
193	10/09/2010	11:20:00	3.463	3.449	1.444	14.5	1.0	14.5	14.6
194	10/09/2010	11:30:00	3.247	3.261	1.242	15.1	1.0	15.2	15.4
195	10/09/2010	11:40:00	2.932	2.914	0.911	13.4	1.0	13.7	13.9
196	10/09/2010	11:50:00	3.172	3.091	1.119	10.8	1.0	11.0	11.3
197	10/09/2010	12:00:00	3.007	3.000	0.991	10.1	1.0	10.5	10.8
198	10/09/2010	12:10:00	3.494	3.440	1.455	10.6	1.0	11.0	11.4
199	10/09/2010	12:20:00	3.453	3.338	1.383	12.2	1.0	12.8	13.4
200	10/09/2010	12:30:00	3.495	3.510	1.490	14.2	1.1	14.9	15.7

Continúa en la siguiente página



Tabla B.1 – Continuación de la página anterior

Muestra	Fecha	Hora	Lectura 1	Lectura 2	Promedio corregido	Ai	tmi (días)	Ai*tmi	Ai*tmi ²
201	10/09/2010	12:40:00	3.613	3.701	1.645	14.4	1.1	15.2	16.1
202	10/09/2010	12:50:00	3.665	3.595	1.618	15.7	1.1	16.7	17.8
203	10/09/2010	13:00:00	3.762	3.618	1.678	16.3	1.1	17.5	18.8
204	10/09/2010	13:10:00	3.499	3.387	1.431	16.5	1.1	17.8	19.2
205	10/09/2010	13:20:00	3.861	3.783	1.810	15.5	1.1	16.9	18.4
206	10/09/2010	13:30:00	3.722	3.713	1.705	16.2	1.1	17.7	19.4
207	10/09/2010	13:40:00	3.840	3.812	1.814	17.6	1.1	19.3	21.3
208	10/09/2010	13:50:00	3.691	3.712	1.689	17.6	1.1	19.5	21.6
209	10/09/2010	14:00:00	3.215	3.219	1.205	17.5	1.1	19.5	21.8
210	10/09/2010	14:10:00	3.126	3.232	1.167	14.5	1.1	16.2	18.2
211	10/09/2010	14:20:00	3.139	3.171	1.143	11.9	1.1	13.4	15.1
212	10/09/2010	14:30:00	3.179	3.005	1.080	11.5	1.1	13.1	14.9
213	10/09/2010	14:40:00	3.320	3.231	1.263	11.1	1.1	12.7	14.5
214	10/09/2010	14:50:00	3.406	3.352	1.367	11.7	1.1	13.5	15.5
215	10/09/2010	15:00:00	3.117	3.259	1.176	13.1	1.2	15.2	17.6
216	10/09/2010	15:10:00	3.780	3.739	1.747	12.7	1.2	14.8	17.2
217	10/09/2010	15:20:00	3.555	3.553	1.542	14.6	1.2	17.1	20.0
218	10/09/2010	15:30:00	4.103	4.101	2.090	16.4	1.2	19.4	22.8
219	10/09/2010	15:40:00	4.222	4.224	2.211	18.2	1.2	21.5	25.5
220	10/09/2010	15:50:00	3.707	3.651	1.667	21.5	1.2	25.6	30.5
221	10/09/2010	16:00:00	3.962	3.939	1.938	19.4	1.2	23.2	27.8
222	10/09/2010	16:10:00	4.063	4.127	2.083	18.0	1.2	21.7	26.2
223	10/09/2010	16:20:00	4.027	4.112	2.057	20.1	1.2	24.4	29.5
224	10/09/2010	16:30:00	3.695	3.735	1.703	20.7	1.2	25.2	30.7
225	10/09/2010	16:40:00	3.862	3.767	1.802	18.8	1.2	23.0	28.2

Continúa en la siguiente página



Tabla B.1 – Continuación de la página anterior

Muestra	Fecha	Hora	Lectura 1	Lectura 2	Promedio corregido	Ai	tmi (días)	Ai*tmi	Ai*tmi ²
226	10/09/2010	16:50:00	3.500	3.543	1.509	17.5	1.2	21.6	26.6
227	10/09/2010	17:00:00	4.108	4.046	2.065	16.6	1.2	20.5	25.4
228	10/09/2010	17:10:00	3.732	3.716	1.712	17.9	1.2	22.3	27.8
229	10/09/2010	17:20:00	3.897	3.873	1.873	18.9	1.3	23.7	29.7
230	10/09/2010	17:30:00	4.323	4.335	2.317	17.9	1.3	22.6	28.5
231	10/09/2010	17:40:00	4.568	4.648	2.596	20.9	1.3	26.5	33.7
232	10/09/2010	17:50:00	3.692	3.751	1.709	24.6	1.3	31.3	39.9
233	10/09/2010	18:00:00	4.082	4.081	2.069	21.5	1.3	27.6	35.3
234	10/09/2010	18:10:00	3.872	3.978	1.913	18.9	1.3	24.3	31.4
235	10/09/2010	18:20:00	3.963	3.971	1.955	19.9	1.3	25.8	33.4
236	10/09/2010	18:30:00	4.241	4.237	2.227	19.3	1.3	25.2	32.8
237	10/09/2010	18:40:00	4.073	4.080	2.064	20.9	1.3	27.4	35.8
238	10/09/2010	18:50:00	3.888	3.933	1.898	21.5	1.3	28.2	37.2
239	10/09/2010	19:00:00	4.041	4.081	2.049	19.8	1.3	26.2	34.7
240	10/09/2010	19:15:00	2.961	3.018	0.977	19.7	1.3	26.2	34.9
241	10/09/2010	19:30:00	3.047	3.163	1.093	22.7	1.3	30.3	40.5
242	10/09/2010	19:45:00	3.098	2.922	0.998	15.5	1.3	20.9	28.3
243	10/09/2010	20:00:00	3.093	3.075	1.072	15.7	1.4	21.3	29.0
244	10/09/2010	20:15:00	2.954	2.902	0.916	15.5	1.4	21.3	29.1
245	10/09/2010	20:30:00	3.187	3.127	1.145	14.9	1.4	20.6	28.4
246	10/09/2010	20:45:00	2.959	2.839	0.887	15.5	1.4	21.5	29.9
247	10/09/2010	21:00:00	3.167	3.205	1.174	15.2	1.4	21.3	29.9
248	10/09/2010	21:15:00	2.671	2.710	0.678	15.5	1.4	21.8	30.8
249	10/09/2010	21:30:00	3.034	3.082	1.046	13.9	1.4	19.7	28.1
250	10/09/2010	21:45:00	2.994	2.938	0.954	12.9	1.4	18.5	26.5

Continúa en la siguiente página



Tabla B.1 – Continuación de la página anterior

Muestra	Fecha	Hora	Lectura 1	Lectura 2	Promedio corregido	Ai	tmi (días)	Ai*tmi	Ai*tmi ²
251	10/09/2010	22:00:00	2.969	2.980	0.962	15.0	1.4	21.6	31.2
252	10/09/2010	22:15:00	3.065	2.940	0.990	14.4	1.5	20.9	30.3
253	10/09/2010	22:30:00	2.926	2.979	0.940	14.6	1.5	21.4	31.4
254	10/09/2010	22:45:00	2.730	2.719	0.712	14.5	1.5	21.3	31.4
255	10/09/2010	23:00:00	3.003	3.052	1.015	12.4	1.5	18.4	27.3
256	10/09/2010	23:15:00	2.601	2.684	0.630	13.0	1.5	19.4	29.0
257	10/09/2010	23:30:00	2.833	2.961	0.885	12.3	1.5	18.6	27.9
258	10/09/2010	23:45:00	2.632	2.690	0.649	11.4	1.5	17.2	26.1
259	11/09/2010	0:00:00	2.698	2.717	0.695	11.5	1.5	17.5	26.8
260	11/09/2010	0:15:00	2.659	2.706	0.670	10.1	1.5	15.5	23.8
261	11/09/2010	0:30:00	2.721	2.729	0.713	10.2	1.5	15.8	24.5
262	11/09/2010	0:45:00	2.703	2.773	0.726	10.4	1.6	16.2	25.2
263	11/09/2010	1:00:00	2.755	2.744	0.737	10.8	1.6	16.9	26.5
264	11/09/2010	1:15:00	3.029	3.055	1.030	11.0	1.6	17.3	27.3
265	11/09/2010	1:30:00	2.855	2.883	0.857	13.3	1.6	21.1	33.4
266	11/09/2010	1:45:00	3.291	3.269	1.268	14.1	1.6	22.6	36.2
267	11/09/2010	2:00:00	2.800	2.838	0.807	15.9	1.6	25.6	41.3
268	11/09/2010	2:15:00	2.855	2.842	0.836	15.6	1.6	25.2	40.8
269	11/09/2010	2:30:00	2.930	3.129	1.017	12.3	1.6	20.1	32.7
270	11/09/2010	2:45:00	3.089	3.011	1.038	13.9	1.6	22.8	37.4
271	11/09/2010	3:00:00	3.077	3.093	1.073	15.4	1.7	25.4	42.0
272	11/09/2010	3:15:00	2.992	2.854	0.911	15.8	1.7	26.3	43.7
273	11/09/2010	3:30:00	3.168	3.263	1.203	14.9	1.7	24.9	41.6
274	11/09/2010	3:45:00	3.035	3.013	1.012	15.9	1.7	26.7	44.9
275	11/09/2010	4:00:00	3.261	3.262	1.249	16.6	1.7	28.1	47.6

Continúa en la siguiente página



Tabla B.1 – Continuación de la página anterior

Muestra	Fecha	Hora	Lectura 1	Lectura 2	Promedio corregido	Ai	tmi (días)	Ai*tmi	Ai*tmi ²
276	11/09/2010	4:15:00	2.779	2.822	0.788	17.0	1.7	28.9	49.2
277	11/09/2010	4:30:00	3.151	3.187	1.157	15.3	1.7	26.2	44.8
278	11/09/2010	4:45:00	3.140	3.070	1.093	14.6	1.7	25.1	43.4
279	11/09/2010	5:00:00	3.329	3.363	1.334	16.9	1.7	29.3	50.7
280	11/09/2010	5:15:00	3.232	3.251	1.229	18.2	1.7	31.8	55.4
281	11/09/2010	5:30:00	2.934	3.022	0.966	19.2	1.8	33.7	59.2
282	11/09/2010	5:45:00	3.214	3.174	1.182	16.5	1.8	29.1	51.3
283	11/09/2010	6:00:00	3.337	3.214	1.263	16.1	1.8	28.6	50.8
284	11/09/2010	6:15:00	3.441	3.398	1.407	18.3	1.8	32.8	58.5
285	11/09/2010	6:30:00	3.217	3.159	1.176	20.0	1.8	36.0	64.7
286	11/09/2010	6:45:00	3.182	3.220	1.189	19.4	1.8	35.0	63.3
287	11/09/2010	7:00:00	3.275	3.259	1.255	17.7	1.8	32.2	58.6
288	11/09/2010	7:15:00	3.539	3.465	1.490	18.3	1.8	33.5	61.2
289	11/09/2010	7:30:00	3.175	3.144	1.147	20.6	1.8	37.8	69.6
290	11/09/2010	7:45:00	3.422	3.358	1.378	19.8	1.8	36.6	67.6
291	11/09/2010	8:00:00	3.206	3.264	1.223	18.9	1.9	35.2	65.5
292	11/09/2010	8:15:00	3.520	3.434	1.465	19.5	1.9	36.5	68.2
293	11/09/2010	8:30:00	3.386	3.281	1.321	20.2	1.9	37.9	71.3
294	11/09/2010	8:45:00	3.775	3.639	1.695	20.9	1.9	39.5	74.7
295	11/09/2010	9:00:00	3.203	3.157	1.168	22.6	1.9	43.0	81.8
296	11/09/2010	9:15:00	3.389	3.289	1.327	21.5	1.9	41.0	78.4
297	11/09/2010	9:30:00	3.394	3.368	1.369	18.7	1.9	36.0	69.1
298	11/09/2010	9:45:00	3.404	3.333	1.356	20.2	1.9	39.1	75.5
299	11/09/2010	10:00:00	3.582	3.501	1.529	20.4	1.9	39.7	77.1
300	11/09/2010	10:15:00	3.337	3.295	1.304	21.6	2.0	42.3	82.6

Continúa en la siguiente página



Tabla B.1 – Continuación de la página anterior

Muestra	Fecha	Hora	Lectura 1	Lectura 2	Promedio corregido	Ai	tmi (días)	Ai*tmi	Ai*tmi ²
301	11/09/2010	10:30:00	3.512	3.456	1.472	21.2	2.0	41.7	81.9
302	11/09/2010	10:45:00	3.796	3.760	1.766	20.8	2.0	41.1	81.1
303	11/09/2010	11:00:00	3.307	3.295	1.289	24.3	2.0	48.2	95.6
304	11/09/2010	11:15:00	3.550	3.470	1.498	22.9	2.0	45.7	91.1
305	11/09/2010	11:30:00	2.785	2.779	0.770	20.9	2.0	41.9	84.0
306	11/09/2010	11:45:00	2.899	2.831	0.853	17.0	2.0	34.3	69.0
307	11/09/2010	12:00:00	2.727	2.623	0.663	12.2	2.0	24.7	49.9
308	11/09/2010	12:15:00	2.650	2.655	0.640	11.4	2.0	23.1	47.1
309	11/09/2010	12:30:00	2.529	2.626	0.565	9.8	2.0	20.0	40.9
310	11/09/2010	12:45:00	2.872	2.787	0.817	9.0	2.1	18.6	38.3
311	11/09/2010	13:00:00	2.447	2.402	0.412	10.4	2.1	21.4	44.3
312	11/09/2010	13:15:00	2.269	2.292	0.268	9.2	2.1	19.2	39.8
313	11/09/2010	13:30:00	2.050	2.126	0.076	5.1	2.1	10.7	22.2
314	11/09/2010	13:45:00	2.010	2.031	0.008	2.6	2.1	5.4	11.3
315	11/09/2010	14:00:00	2.290	2.212	0.239	0.6	2.1	1.3	2.8
316	11/09/2010	14:15:00	2.346	2.354	0.338	1.9	2.1	3.9	8.3
317	11/09/2010	14:30:00	2.151	2.197	0.162	4.3	2.1	9.2	19.6
318	11/09/2010	14:45:00	2.418	2.485	0.439	3.7	2.1	8.0	17.1
319	11/09/2010	15:00:00	2.602	2.630	0.604	4.5	2.2	9.7	20.9
320	11/09/2010	15:15:00	2.551	2.594	0.560	7.8	2.2	16.9	36.5
321	11/09/2010	15:30:00	2.570	2.543	0.544	8.7	2.2	19.0	41.2
322	11/09/2010	15:45:00	2.690	2.640	0.653	8.3	2.2	18.1	39.4
323	11/09/2010	16:00:00	2.636	2.586	0.599	9.0	2.2	19.7	43.2
324	11/09/2010	16:15:00	2.936	2.882	0.897	9.4	2.2	20.7	45.5
325	11/09/2010	16:30:00	2.729	2.747	0.726	11.2	2.2	24.8	55.0

Continúa en la siguiente página



Tabla B.1 – Continuación de la página anterior

Muestra	Fecha	Hora	Lectura 1	Lectura 2	Promedio corregido	Ai	tmi (días)	Ai*tmi	Ai*tmi ²
326	11/09/2010	16:45:00	2.744	2.612	0.666	12.2	2.2	27.1	60.2
327	11/09/2010	17:00:00	2.962	2.904	0.921	10.4	2.2	23.3	52.1
328	11/09/2010	17:15:00	2.840	2.880	0.848	11.9	2.2	26.7	60.0
329	11/09/2010	17:30:00	3.076	3.011	1.031	13.3	2.3	29.9	67.4
330	11/09/2010	17:45:00	3.010	2.955	0.970	14.1	2.3	31.9	72.3
331	11/09/2010	18:00:00	2.910	2.927	0.906	15.0	2.3	34.2	77.8
332	11/09/2010	18:15:00	3.099	3.011	1.043	14.1	2.3	32.2	73.6
333	11/09/2010	18:30:00	3.096	3.033	1.052	14.6	2.3	33.6	77.1
334	11/09/2010	18:45:00	3.078	3.005	1.029	15.7	2.3	36.2	83.6
335	11/09/2010	19:00:00	3.073	3.008	1.028	15.6	2.3	36.2	83.8
336	11/09/2010	19:15:00	2.116	2.075	0.083	15.4	2.3	35.9	83.6
337	11/09/2010	19:30:00	2.085	1.979	0.020	8.3	2.3	19.5	45.5
338	11/09/2010	19:45:00	2.323	2.296	0.297	0.8	2.3	1.8	4.2
339	11/09/2010	20:00:00	2.104	2.218	0.149	2.4	2.4	5.6	13.2
340	11/09/2010	20:15:00	2.269	2.237	0.241	3.3	2.4	7.9	18.8
341	11/09/2010	20:30:00	2.385	2.297	0.329	2.9	2.4	6.9	16.5
342	11/09/2010	20:45:00	2.439	2.328	0.371	4.3	2.4	10.2	24.4
343	11/09/2010	21:00:00	2.197	2.073	0.123	5.2	2.4	12.6	30.3
344	11/09/2010	21:15:00	2.354	2.309	0.319	3.7	2.4	8.9	21.5
345	11/09/2010	21:30:00	2.205	2.197	0.189	3.3	2.4	8.0	19.4
346	11/09/2010	21:45:00	2.479	2.401	0.428	3.8	2.4	9.3	22.5
347	11/09/2010	22:00:00	2.329	2.464	0.384	4.6	2.4	11.3	27.6
348	11/09/2010	22:15:00	2.348	2.482	0.403	6.1	2.5	14.9	36.6
349	11/09/2010	22:30:00	2.315	2.293	0.292	5.9	2.5	14.5	35.8
350	11/09/2010	22:45:00	2.390	2.258	0.312	5.2	2.5	12.9	31.9

Continúa en la siguiente página



Tabla B.1 – Continuación de la página anterior

Muestra	Fecha	Hora	Lectura 1	Lectura 2	Promedio corregido	Ai	tmi (días)	Ai*tmi	Ai*tmi ²
351	11/09/2010	23:00:00	2.445	2.465	0.443	4.5	2.5	11.2	27.9
352	11/09/2010	23:15:00	2.237	2.153	0.183	5.7	2.5	14.1	35.2
353	11/09/2010	23:30:00	2.370	2.421	0.383	4.7	2.5	11.7	29.4
354	11/09/2010	23:45:00	2.339	2.271	0.293	4.2	2.5	10.7	26.9
355	12/09/2010	0:00:00	2.448	2.348	0.386	5.1	2.5	12.8	32.3
356	12/09/2010	0:15:00	2.703	2.631	0.655	5.1	2.5	12.9	32.7
357	12/09/2010	0:30:00	2.597	2.431	0.502	7.8	2.5	19.9	50.6
358	12/09/2010	0:45:00	2.496	2.453	0.462	8.7	2.6	22.2	56.7
359	12/09/2010	1:00:00	2.398	2.526	0.450	7.2	2.6	18.6	47.7
360	12/09/2010	1:15:00	2.168	2.279	0.211	6.8	2.6	17.6	45.4
361	12/09/2010	1:30:00	2.561	2.450	0.493	5.0	2.6	12.8	33.2
362	12/09/2010	1:45:00	2.422	2.495	0.446	5.3	2.6	13.7	35.7
363	12/09/2010	2:00:00	2.674	2.619	0.634	7.0	2.6	18.4	48.0
364	12/09/2010	2:15:00	2.556	2.682	0.607	8.1	2.6	21.2	55.6
365	12/09/2010	2:30:00	2.359	2.230	0.282	9.3	2.6	24.5	64.4
366	12/09/2010	2:45:00	2.656	2.520	0.576	6.7	2.6	17.6	46.5
367	12/09/2010	3:00:00	2.579	2.465	0.510	6.4	2.7	17.1	45.2
368	12/09/2010	3:15:00	2.575	2.534	0.542	8.1	2.7	21.7	57.6
369	12/09/2010	3:30:00	2.435	2.503	0.457	7.9	2.7	21.1	56.3
370	12/09/2010	3:45:00	2.707	2.657	0.670	7.5	2.7	20.1	53.9
371	12/09/2010	4:00:00	2.824	2.995	0.897	8.4	2.7	22.7	61.3
372	12/09/2010	4:15:00	2.935	2.845	0.878	11.8	2.7	31.8	85.9
373	12/09/2010	4:30:00	2.554	2.558	0.544	13.3	2.7	36.1	98.0
374	12/09/2010	4:45:00	2.459	2.574	0.504	10.7	2.7	29.0	79.1
375	12/09/2010	5:00:00	3.090	2.947	1.006	7.9	2.7	21.5	58.8

Continúa en la siguiente página



Tabla B.1 – Continuación de la página anterior

Muestra	Fecha	Hora	Lectura 1	Lectura 2	Promedio corregido	Ai	tmi (días)	Ai*tmi	Ai*tmi ²
376	12/09/2010	5:15:00	3.077	2.908	0.980	11.3	2.7	31.1	85.4
377	12/09/2010	5:30:00	3.248	3.302	1.263	14.9	2.8	41.0	113.1
378	12/09/2010	5:45:00	3.204	3.392	1.286	16.8	2.8	46.5	128.7
379	12/09/2010	6:00:00	2.734	2.723	0.716	19.1	2.8	53.1	147.3
380	12/09/2010	6:15:00	2.945	2.927	0.924	15.0	2.8	41.8	116.5
381	12/09/2010	6:30:00	3.476	3.482	1.467	12.3	2.8	34.4	96.2
382	12/09/2010	6:45:00	3.131	3.212	1.159	17.9	2.8	50.3	141.3
383	12/09/2010	7:00:00	2.580	2.514	0.535	19.7	2.8	55.5	156.3
384	12/09/2010	7:15:00	2.391	2.413	0.390	12.7	2.8	35.9	101.6
385	12/09/2010	7:30:00	3.481	3.553	1.505	6.9	2.8	19.7	55.8
386	12/09/2010	7:45:00	2.871	2.990	0.918	14.2	2.8	40.5	115.4
387	12/09/2010	8:00:00	2.615	2.727	0.659	18.2	2.9	51.9	148.5
388	12/09/2010	8:15:00	3.554	3.609	1.569	11.8	2.9	33.9	97.4
389	12/09/2010	8:30:00	2.973	3.058	1.003	16.7	2.9	48.1	138.7
390	12/09/2010	8:45:00	3.043	3.102	1.060	19.3	2.9	55.8	161.2
391	12/09/2010	9:00:00	2.662	2.603	0.620	15.5	2.9	44.9	130.2
392	12/09/2010	9:15:00	3.354	3.367	1.348	12.6	2.9	36.7	106.8
393	12/09/2010	9:30:00	3.021	3.076	1.036	14.8	2.9	43.1	126.1
394	12/09/2010	9:45:00	3.193	3.205	1.187	17.9	2.9	52.4	153.7
395	12/09/2010	10:00:00	4.342	4.294	2.306	16.7	2.9	49.1	144.4
396	12/09/2010	10:15:00	4.054	4.013	2.021	26.2	3.0	77.4	228.5
397	12/09/2010	10:30:00	3.667	3.615	1.629	32.5	3.0	96.2	285.0
398	12/09/2010	10:45:00	3.031	2.926	0.966	27.4	3.0	81.4	242.1
399	12/09/2010	11:00:00	2.912	2.807	0.847	19.5	3.0	58.1	173.3
400	12/09/2010	11:15:00	2.476	2.477	0.464	13.6	3.0	40.7	122.0

Continúa en la siguiente página



Tabla B.1 – Continuación de la página anterior

Muestra	Fecha	Hora	Lectura 1	Lectura 2	Promedio corregido	Ai	tmi (días)	Ai*tmi	Ai*tmi ²
401	12/09/2010	11:30:00	2.475	2.387	0.419	9.8	3.0	29.5	88.8
402	12/09/2010	11:45:00	2.191	2.275	0.221	6.6	3.0	20.0	60.2
403	12/09/2010	12:00:00	2.090	2.031	0.048	4.8	3.0	14.5	43.9
404	12/09/2010	12:15:00	2.205	2.216	0.198	2.0	3.0	6.1	18.6
405	12/09/2010	12:30:00	2.241	2.202	0.209	1.8	3.0	5.6	17.2
406	12/09/2010	12:45:00	2.193	2.281	0.225	3.1	3.1	9.3	28.5
407	12/09/2010	13:00:00	2.069	2.043	0.044	3.3	3.1	10.0	30.6
408	12/09/2010	13:15:00	1.879	1.779	0.000	2.0	3.1	6.2	19.0
409	12/09/2010	13:30:00	1.719	1.822	0.000	0.3	3.1	1.0	3.1
410	12/09/2010	13:45:00	1.873	1.902	0.000	0.0	0.0	0.0	0.0
411	12/09/2010	14:00:00	1.761	1.820	0.000	0.0	0.0	0.0	0.0
412	12/09/2010	14:15:00	1.882	1.995	0.000	0.0	0.0	0.0	0.0
413	12/09/2010	14:30:00	2.130	2.068	0.087	0.0	0.0	0.0	0.0
414	12/09/2010	14:45:00	2.193	2.040	0.104	0.6	3.1	2.0	6.4
415	12/09/2010	15:00:00	2.483	2.593	0.526	1.4	3.2	4.5	14.2
416	12/09/2010	15:15:00	2.220	2.238	0.217	4.7	3.2	14.9	47.2
417	12/09/2010	15:30:00	2.463	2.574	0.506	5.6	3.2	17.7	56.0
418	12/09/2010	15:45:00	2.467	2.465	0.454	5.4	3.2	17.3	54.9
419	12/09/2010	16:00:00	2.434	2.399	0.404	7.2	3.2	23.0	73.4
420	12/09/2010	16:15:00	2.404	2.433	0.406	6.4	3.2	20.6	66.0
421	12/09/2010	16:30:00	2.673	2.698	0.673	6.1	3.2	19.5	62.8
422	12/09/2010	16:45:00	2.777	2.682	0.717	8.1	3.2	26.1	84.2
423	12/09/2010	17:00:00	2.865	2.787	0.814	10.4	3.2	33.7	109.1
424	12/09/2010	17:15:00	3.000	2.954	0.965	11.5	3.2	37.3	120.9
425	12/09/2010	17:30:00	2.779	2.763	0.759	13.3	3.3	43.4	141.3

Continúa en la siguiente página



Tabla B.1 – Continuación de la página anterior

Muestra	Fecha	Hora	Lectura 1	Lectura 2	Promedio corregido	Ai	tmi (días)	Ai*tmi	Ai*tmi ²
426	12/09/2010	17:45:00	2.866	2.895	0.868	12.9	3.3	42.2	137.8
427	12/09/2010	18:00:00	2.763	2.635	0.687	12.2	3.3	40.0	131.0
428	12/09/2010	18:15:00	2.998	2.898	0.936	11.7	3.3	38.3	125.9
429	12/09/2010	18:30:00	2.699	2.711	0.693	12.2	3.3	40.1	132.3
430	12/09/2010	18:45:00	2.672	2.764	0.706	12.2	3.3	40.4	133.6
431	12/09/2010	19:00:00	2.669	2.664	0.654	10.5	3.3	34.8	115.4
432	12/09/2010	19:15:00	2.631	2.651	0.629	10.2	3.3	33.9	113.0
433	12/09/2010	19:30:00	2.486	2.420	0.441	9.6	3.3	32.1	107.2
434	12/09/2010	19:45:00	2.424	2.329	0.364	8.0	3.3	26.9	89.9
435	12/09/2010	20:00:00	2.602	2.661	0.619	6.0	3.4	20.3	68.1
436	12/09/2010	20:15:00	2.690	2.544	0.605	7.4	3.4	24.9	83.8
437	12/09/2010	20:30:00	2.452	2.322	0.375	9.2	3.4	31.0	104.9
438	12/09/2010	20:45:00	2.725	2.446	0.573	7.3	3.4	24.9	84.4
439	12/09/2010	21:00:00	2.471	2.569	0.508	7.1	3.4	24.2	82.2
440	12/09/2010	21:15:00	2.793	2.506	0.637	8.1	3.4	27.7	94.3
441	12/09/2010	21:30:00	2.880	2.825	0.840	8.6	3.4	29.4	100.5
442	12/09/2010	21:45:00	2.485	2.652	0.556	11.1	3.4	38.0	130.5
443	12/09/2010	22:00:00	2.675	2.614	0.632	10.5	3.4	36.0	124.1
444	12/09/2010	22:15:00	2.812	2.834	0.811	8.9	3.5	30.8	106.3
445	12/09/2010	22:30:00	2.450	2.527	0.476	10.8	3.5	37.5	129.8
446	12/09/2010	22:45:00	2.369	2.316	0.330	9.7	3.5	33.5	116.4
447	12/09/2010	23:00:00	2.473	2.398	0.423	6.0	3.5	21.1	73.4
448	12/09/2010	23:15:00	2.625	2.527	0.564	5.6	3.5	19.7	69.0
449	12/09/2010	23:30:00	2.336	2.291	0.301	7.4	3.5	25.9	90.9
450	12/09/2010	23:45:00	2.250	2.378	0.302	6.5	3.5	22.8	80.1

Continúa en la siguiente página



Tabla B.1 – Continuación de la página anterior

Muestra	Fecha	Hora	Lectura 1	Lectura 2	Promedio corregido	Ai	tmi (días)	Ai*tmi	Ai*tmi ²
451	12/09/2010	0:00:00	2.138	2.206	0.160	4.5	3.5	15.9	56.2
452	13/09/2010	0:15:00	2.758	2.655	0.694	3.5	3.5	12.2	43.3
453	13/09/2010	0:30:00	2.387	2.392	0.377	6.4	3.5	22.7	80.6
454	13/09/2010	0:45:00	2.313	2.272	0.280	8.0	3.6	28.6	101.6
455	13/09/2010	1:00:00	2.399	2.317	0.346	4.9	3.6	17.6	62.7
456	13/09/2010	1:15:00	2.333	2.311	0.310	4.7	3.6	16.8	60.1
457	13/09/2010	1:30:00	2.229	2.375	0.290	4.9	3.6	17.6	63.3
458	13/09/2010	1:45:00	2.833	2.760	0.784	4.5	3.6	16.2	58.2
459	13/09/2010	2:00:00	2.994	2.996	0.983	8.1	3.6	29.1	105.0
460	13/09/2010	2:15:00	2.830	2.775	0.790	13.3	3.6	48.0	173.6
461	13/09/2010	2:30:00	3.065	3.037	1.039	13.3	3.6	48.3	175.2
462	13/09/2010	2:45:00	3.445	3.887	1.654	13.7	3.6	49.9	181.8
463	13/09/2010	3:00:00	3.069	2.915	0.980	20.2	3.7	73.7	269.2
464	13/09/2010	3:15:00	2.439	2.320	0.367	19.7	3.7	72.3	264.7
465	13/09/2010	3:30:00	2.317	2.385	0.339	10.1	3.7	37.1	136.1
466	13/09/2010	3:45:00	2.332	2.298	0.303	5.3	3.7	19.5	71.8
467	13/09/2010	4:00:00	2.334	2.243	0.276	4.8	3.7	17.8	65.6
468	13/09/2010	4:15:00	2.263	2.299	0.269	4.3	3.7	16.1	59.5
469	13/09/2010	4:30:00	2.263	2.204	0.221	4.1	3.7	15.2	56.3
470	13/09/2010	4:45:00	2.028	2.014	0.009	3.7	3.7	13.7	50.9
471	13/09/2010	5:00:00	2.259	2.391	0.313	1.7	3.7	6.4	24.0
472	13/09/2010	5:15:00	2.485	2.458	0.459	2.4	3.7	9.0	33.8
473	13/09/2010	5:30:00	2.018	1.949	0.000	5.8	3.8	21.7	81.6
474	13/09/2010	5:45:00	2.172	2.251	0.199	3.4	3.8	13.0	48.8
475	13/09/2010	6:00:00	2.157	2.048	0.090	1.5	3.8	5.6	21.3

Continúa en la siguiente página



Tabla B.1 – Continuación de la página anterior

Muestra	Fecha	Hora	Lectura 1	Lectura 2	Promedio corregido	Ai	tmi (días)	Ai*tmi	Ai*tmi ²
476	13/09/2010	6:15:00	2.193	2.228	0.198	2.2	3.8	8.2	31.1
477	13/09/2010	6:30:00	2.481	2.539	0.498	2.2	3.8	8.2	31.2
478	13/09/2010	6:45:00	2.234	2.316	0.263	5.2	3.8	19.9	75.7
479	13/09/2010	7:00:00	2.308	2.218	0.251	5.7	3.8	21.8	83.1
480	13/09/2010	7:15:00	1.972	1.950	0.000	3.8	3.8	14.7	56.4
481	13/09/2010	7:30:00	2.050	1.969	0.000	1.9	3.8	7.2	27.7
482	13/09/2010	7:45:00	1.929	1.860	0.000	0.0	0.0	0.0	0.0
483	13/09/2010	8:00:00	2.145	2.085	0.103	0.0	0.0	0.0	0.0
484	13/09/2010	8:15:00	2.111	2.035	0.061	0.8	3.9	3.0	11.5
485	13/09/2010	8:30:00	1.904	1.822	0.000	1.2	3.9	4.7	18.4
486	13/09/2010	8:45:00	1.899	1.989	0.000	0.5	3.9	1.8	6.9
487	13/09/2010	9:00:00	1.829	1.902	0.000	0.0	0.0	0.0	0.0
488	13/09/2010	9:15:00	1.952	1.870	0.000	0.0	0.0	0.0	0.0
489	13/09/2010	9:30:00	1.835	1.783	0.000	0.0	0.0	0.0	0.0
490	13/09/2010	9:45:00	1.825	1.780	0.000	0.0	0.0	0.0	0.0
491	13/09/2010	10:00:00	1.782	1.744	0.000	0.0	0.0	0.0	0.0
492	13/09/2010	10:15:00	1.893	1.876	0.000	0.0	0.0	0.0	0.0
493	13/09/2010	10:30:00	2.008	1.954	0.000	0.0	0.0	0.0	0.0
494	13/09/2010	10:45:00	1.935	1.874	0.000	0.0	0.0	0.0	0.0
495	13/09/2010	11:00:00	1.891	1.877	0.000	0.0	0.0	0.0	0.0
496	13/09/2010	11:15:00	2.103	2.011	0.045	0.0	0.0	0.0	0.0
497	13/09/2010	11:30:00	1.675	1.765	0.000	0.3	4.0	1.3	5.4
498	13/09/2010	11:45:00	1.773	1.866	0.000	0.3	4.0	1.3	5.4
499	13/09/2010	12:00:00	1.790	1.758	0.000	0.0	0.0	0.0	0.0
500	13/09/2010	12:15:00	1.889	1.886	0.000	0.0	0.0	0.0	0.0

Continúa en la siguiente página



Tabla B.1 – Continuación de la página anterior

Muestra	Fecha	Hora	Lectura 1	Lectura 2	Promedio corregido	Ai	tmi (días)	Ai*tmi	Ai*tmi ²
501	13/09/2010	12:30:00	1.853	1.747	0.000	0.0	0.0	0.0	0.0
502	13/09/2010	12:45:00	1.580	1.552	0.000	0.0	0.0	0.0	0.0
503	13/09/2010	13:00:00	1.631	1.611	0.000	0.0	0.0	0.0	0.0
504	13/09/2010	13:15:00	2.457	2.375	0.404	0.0	0.0	0.0	0.0
505	13/09/2010	13:30:00	2.464	2.446	0.443	3.0	4.1	12.4	50.6
506	13/09/2010	13:45:00	2.576	2.482	0.517	6.3	4.1	26.0	106.6
507	13/09/2010	14:00:00	2.557	2.443	0.488	7.2	4.1	29.6	121.5
508	13/09/2010	14:15:00	2.496	2.559	0.515	7.5	4.1	31.0	127.8
509	13/09/2010	14:30:00	2.590	2.639	0.602	7.5	4.1	31.1	128.3
510	13/09/2010	14:45:00	3.183	3.262	1.210	8.4	4.1	34.7	143.7
511	13/09/2010	15:00:00	3.315	3.248	1.269	13.6	4.2	56.4	234.3
512	13/09/2010	15:15:00	3.241	3.160	1.188	18.6	4.2	77.4	322.0
513	13/09/2010	15:30:00	3.240	3.232	1.224	18.4	4.2	76.9	320.7
514	13/09/2010	15:45:00	3.001	3.008	0.992	18.1	4.2	75.6	316.4
515	13/09/2010	16:00:00	3.598	3.463	1.518	16.6	4.2	69.7	292.1
516	13/09/2010	16:15:00	2.430	2.419	0.412	18.8	4.2	79.1	332.7
517	13/09/2010	16:30:00	2.117	2.212	0.152	14.5	4.2	61.0	256.9
518	13/09/2010	16:45:00	2.280	2.349	0.302	4.2	4.2	17.9	75.5
519	13/09/2010	17:00:00	2.551	2.554	0.540	3.4	4.2	14.4	61.1
520	13/09/2010	17:15:00	2.746	2.864	0.793	6.3	4.2	26.8	113.8
521	13/09/2010	17:30:00	2.494	2.532	0.501	10.0	4.3	42.5	181.0
522	13/09/2010	17:45:00	2.762	2.671	0.704	9.7	4.3	41.4	176.5
523	13/09/2010	18:00:00	2.613	2.619	0.604	9.0	4.3	38.6	165.2
524	13/09/2010	18:15:00	2.624	2.718	0.659	9.8	4.3	42.0	180.2
525	13/09/2010	18:30:00	2.800	2.709	0.742	9.5	4.3	40.7	174.8

Continúa en la siguiente página



Tabla B.1 – Continuación de la página anterior

Muestra	Fecha	Hora	Lectura 1	Lectura 2	Promedio corregido	Ai	tmi (días)	Ai*tmi	Ai*tmi ²
526	13/09/2010	18:45:00	2.882	2.711	0.784	10.5	4.3	45.3	194.9
527	13/09/2010	19:00:00	2.706	2.723	0.702	11.4	4.3	49.4	213.4
528	13/09/2010	19:15:00	2.154	2.217	0.173	11.1	4.3	48.2	208.8
529	13/09/2010	19:30:00	2.552	2.381	0.454	6.6	4.3	28.5	123.5
530	13/09/2010	19:45:00	2.750	2.558	0.642	4.7	4.3	20.5	89.0
531	13/09/2010	20:00:00	2.669	2.457	0.551	8.2	4.4	35.8	156.2
532	13/09/2010	20:15:00	2.565	2.670	0.605	8.9	4.4	39.1	170.7
533	13/09/2010	20:30:00	2.691	2.765	0.716	8.7	4.4	38.0	166.3
534	13/09/2010	20:45:00	2.746	2.690	0.706	9.9	4.4	43.5	191.0
535	13/09/2010	21:00:00	2.721	2.730	0.713	10.7	4.4	46.9	206.5
536	13/09/2010	21:15:00	2.725	2.518	0.609	10.6	4.4	46.9	207.1
537	13/09/2010	21:30:00	2.474	2.518	0.484	9.9	4.4	43.8	193.9
538	13/09/2010	21:45:00	2.554	2.536	0.533	8.2	4.4	36.3	161.0
539	13/09/2010	22:00:00	2.309	2.399	0.342	7.6	4.4	33.9	150.4
540	13/09/2010	22:15:00	2.569	2.618	0.581	6.6	4.5	29.2	130.0
541	13/09/2010	22:30:00	2.529	2.587	0.546	6.9	4.5	30.9	137.9
542	13/09/2010	22:45:00	2.754	2.515	0.622	8.5	4.5	37.8	169.1
543	13/09/2010	23:00:00	2.673	2.626	0.637	8.8	4.5	39.3	176.1
544	13/09/2010	23:15:00	2.722	2.793	0.745	9.4	4.5	42.5	190.8
545	13/09/2010	23:30:00	2.650	2.569	0.597	10.4	4.5	46.7	210.4
546	13/09/2010	23:45:00	2.814	2.897	0.843	10.1	4.5	45.5	205.3
547	14/09/2010	0:00:00	2.582	2.711	0.634	10.8	4.5	48.9	221.3
548	14/09/2010	0:15:00	3.050	2.972	0.999	11.1	4.5	50.3	228.0
549	14/09/2010	0:30:00	2.841	2.741	0.779	12.2	4.5	55.7	253.2
550	14/09/2010	0:45:00	2.921	2.980	0.938	13.3	4.6	60.7	276.8

Continúa en la siguiente página



Tabla B.1 – Continuación de la página anterior

Muestra	Fecha	Hora	Lectura 1	Lectura 2	Promedio corregido	Ai	tmi (días)	Ai*tmi	Ai*tmi ²
551	14/09/2010	1:00:00	2.839	2.801	0.808	12.9	4.6	58.8	268.7
552	14/09/2010	1:15:00	3.041	2.761	0.889	13.1	4.6	59.9	274.4
553	14/09/2010	1:30:00	3.090	2.771	0.918	12.7	4.6	58.4	267.9
554	14/09/2010	1:45:00	3.152	2.815	0.971	13.6	4.6	62.3	286.6
555	14/09/2010	2:00:00	2.975	3.089	1.020	14.2	4.6	65.3	301.1
556	14/09/2010	2:15:00	2.906	3.094	0.988	14.9	4.6	69.0	318.7
557	14/09/2010	2:30:00	3.398	3.033	1.203	15.1	4.6	69.7	322.7
558	14/09/2010	2:45:00	3.221	3.211	1.204	16.4	4.6	76.3	353.9
559	14/09/2010	3:00:00	2.944	2.942	0.931	18.1	4.7	84.0	390.5
560	14/09/2010	3:15:00	2.876	3.072	0.962	16.0	4.7	74.6	347.8
561	14/09/2010	3:30:00	3.047	2.950	0.986	14.2	4.7	66.3	309.8
562	14/09/2010	3:45:00	3.027	2.981	0.992	14.6	4.7	68.4	320.3
563	14/09/2010	4:00:00	3.257	3.020	1.126	14.8	4.7	69.6	326.6
564	14/09/2010	4:15:00	3.053	3.190	1.109	15.9	4.7	74.7	351.3
565	14/09/2010	4:30:00	3.276	3.107	1.179	16.8	4.7	79.0	372.5
566	14/09/2010	4:45:00	3.082	3.079	1.068	17.2	4.7	81.1	383.0
567	14/09/2010	5:00:00	3.453	3.339	1.384	16.9	4.7	79.8	377.8
568	14/09/2010	5:15:00	2.858	2.948	0.891	18.4	4.7	87.3	414.0
569	14/09/2010	5:30:00	2.885	2.771	0.816	17.1	4.8	81.1	385.6
570	14/09/2010	5:45:00	2.916	2.735	0.813	12.8	4.8	61.0	290.6
571	14/09/2010	6:00:00	3.053	3.153	1.091	12.2	4.8	58.3	278.6
572	14/09/2010	6:15:00	3.053	2.850	0.939	14.3	4.8	68.3	327.1
573	14/09/2010	6:30:00	3.060	3.100	1.068	15.2	4.8	73.0	350.3
574	14/09/2010	6:45:00	3.333	3.184	1.246	15.1	4.8	72.4	347.8
575	14/09/2010	7:00:00	3.252	3.037	1.132	17.4	4.8	83.6	402.8

Continúa en la siguiente página



Tabla B.1 – Continuación de la página anterior

Muestra	Fecha	Hora	Lectura 1	Lectura 2	Promedio corregido	Ai	tmi (días)	Ai*tmi	Ai*tmi ²
576	14/09/2010	8:00:00	2.362	2.436	0.387	17.8	4.8	86.1	415.8
577	14/09/2010	9:00:00	2.435	2.330	0.370	45.6	4.8	220.4	1066.3
578	14/09/2010	10:00:00	2.407	2.501	0.442	22.7	4.9	111.1	544.1
579	14/09/2010	11:00:00	2.162	2.135	0.136	24.4	4.9	120.3	593.8
580	14/09/2010	12:00:00	2.452	2.393	0.410	17.3	5.0	86.2	429.1
581	14/09/2010	13:00:00	2.292	2.314	0.291	16.4	5.0	82.3	413.7
582	14/09/2010	14:00:00	2.511	2.464	0.475	21.0	5.1	106.4	538.5
583	14/09/2010	15:00:00	2.428	2.460	0.432	23.0	5.1	117.3	598.9
584	14/09/2010	16:00:00	2.570	2.426	0.486	27.2	5.1	140.0	720.2
585	14/09/2010	17:00:00	2.558	2.705	0.619	27.5	5.2	142.8	740.6
586	14/09/2010	18:00:00	2.657	2.471	0.552	33.1	5.2	173.3	906.5
587	14/09/2010	19:00:00	2.685	2.542	0.601	35.1	5.3	185.1	975.6
588	14/09/2010	20:00:00	2.628	2.434	0.519	34.6	5.3	183.7	976.1
589	14/09/2010	21:00:00	2.482	2.629	0.543	33.6	5.4	179.8	962.8
590	14/09/2010	22:00:00	2.883	2.860	0.859	31.9	5.4	171.9	927.4
591	14/09/2010	23:00:00	2.806	2.927	0.854	42.1	5.4	228.8	1244.5
592	14/09/2010	0:00:00	2.558	2.531	0.532	51.4	5.5	281.6	1543.0
593	14/09/2010	1:00:00	2.723	2.714	0.706	41.6	5.5	229.5	1266.8
594	14/09/2010	2:00:00	3.021	2.973	0.985	37.1	5.6	206.7	1149.8
595	14/09/2010	3:00:00	2.767	2.950	0.846	50.7	5.6	284.3	1593.7
596	14/09/2010	4:00:00	2.859	2.994	0.914	54.9	5.6	310.1	1750.3
597	14/09/2010	5:00:00	2.814	2.860	0.825	52.8	5.7	300.4	1708.4
598	14/09/2010	6:00:00	2.886	2.719	0.790	52.2	5.7	298.8	1711.9
599	14/09/2010	7:00:00	2.550	2.806	0.666	48.4	5.8	279.5	1613.2
600	14/09/2010	8:00:00	3.113	3.266	1.177	43.7	5.8	253.8	1475.2

Continúa en la siguiente página



Tabla B.1 – Continuación de la página anterior

Muestra	Fecha	Hora	Lectura 1	Lectura 2	Promedio corregido	Ai	tmi (días)	Ai*tmi	Ai*tmi ²
601	14/09/2010	9:00:00	3.059	2.856	0.945	55.3	5.9	323.7	1895.8
602	14/09/2010	10:00:00	2.785	2.854	0.807	63.7	5.9	375.3	2212.6
603	14/09/2010	11:00:00	2.714	2.840	0.765	52.6	5.9	312.1	1852.9
604	14/09/2010	12:00:00	3.049	3.036	1.030	47.2	6.0	281.9	1685.6
605	14/09/2010	13:00:00	2.819	2.762	0.778	53.8	6.0	324.2	1952.5
606	14/09/2010	14:00:00	2.836	2.966	0.889	54.2	6.1	328.8	1993.2
607	14/09/2010	15:00:00	3.203	3.162	1.170	50.0	6.1	305.2	1863.4
608	14/09/2010	16:00:00	3.386	3.103	1.232	61.8	6.1	379.6	2333.6
609	14/09/2010	17:00:00	3.394	3.222	1.296	72.1	6.2	445.9	2759.3
610	14/09/2010	18:00:00	2.883	2.907	0.883	75.8	6.2	472.4	2942.6
611	14/09/2010	19:00:00	2.746	2.838	0.780	65.3	6.3	409.7	2568.6
612	14/09/2010	20:00:00	2.740	2.924	0.820	49.9	6.3	314.8	1986.8
613	14/09/2010	21:00:00	3.097	2.973	1.023	48.0	6.4	304.9	1937.2
614	14/09/2010	22:00:00	3.557	3.560	1.546	55.3	6.4	353.5	2261.3
615	14/09/2010	23:00:00	3.241	3.181	1.199	77.1	6.4	496.2	3195.0
616	15/09/2010	0:00:00	2.786	2.758	0.760	82.3	6.5	533.4	3455.8
617	15/09/2010	1:00:00	2.550	2.714	0.620	58.7	6.5	383.0	2496.8
618	15/09/2010	2:00:00	2.608	2.540	0.562	41.4	6.6	271.5	1781.6
619	15/09/2010	3:00:00	2.816	2.742	0.767	35.4	6.6	234.0	1545.4
620	15/09/2010	4:00:00	2.553	2.604	0.566	39.8	6.6	264.9	1760.5
621	15/09/2010	5:00:00	3.010	3.142	1.064	40.0	6.7	267.3	1787.6
622	15/09/2010	6:00:00	3.025	3.096	1.048	48.9	6.7	329.1	2215.3
623	15/09/2010	7:00:00	2.992	2.956	0.962	63.4	6.8	428.9	2904.3
624	15/09/2010	8:00:00	2.756	2.731	0.731	60.3	6.8	410.7	2797.9
625	15/09/2010	9:00:00	2.515	2.559	0.525	50.8	6.9	348.0	2385.1

Continúa en la siguiente página



Tabla B.1 – Continuación de la página anterior

Muestra	Fecha	Hora	Lectura 1	Lectura 2	Promedio corregido	Ai	tmi (días)	Ai*tmi	Ai*tmi ²
626	15/09/2010	10:00:00	2.524	2.624	0.562	37.7	6.9	259.7	1790.8
627	15/09/2010	11:00:00	2.422	2.633	0.515	32.6	6.9	226.1	1568.5
628	15/09/2010	12:00:00	2.430	2.330	0.368	32.3	7.0	225.4	1573.3
629	15/09/2010	13:00:00	2.496	2.526	0.499	26.5	7.0	185.9	1304.9
630	15/09/2010	14:00:00	2.902	2.904	0.891	26.0	7.1	183.6	1296.6
631	15/09/2010	15:00:00	2.481	2.401	0.429	41.7	7.1	296.2	2104.6
632	15/09/2010	16:00:00	2.568	2.669	0.606	39.6	7.1	282.7	2019.6
633	15/09/2010	17:00:00	2.588	2.553	0.558	31.0	7.2	223.2	1604.2
634	15/09/2010	18:00:00	2.397	2.435	0.404	34.9	7.2	252.5	1825.2
635	15/09/2010	19:00:00	2.464	2.596	0.518	28.9	7.3	209.7	1524.8
636	15/09/2010	20:00:00	2.783	2.905	0.832	27.6	7.3	202.1	1478.2
637	15/09/2010	21:00:00	2.870	2.716	0.781	40.5	7.4	297.7	2190.1
638	15/09/2010	22:00:00	2.777	3.038	0.895	48.4	7.4	357.7	2645.4
639	15/09/2010	23:00:00	2.817	2.656	0.724	50.3	7.4	373.9	2781.2
640	16/09/2010	0:00:00	2.434	2.496	0.453	48.6	7.5	363.3	2716.8
641	16/09/2010	1:00:00	2.359	2.583	0.459	35.3	7.5	265.4	1995.9
642	16/09/2010	2:00:00	2.418	2.323	0.358	27.3	7.6	206.7	1563.5
643	16/09/2010	3:00:00	2.520	2.567	0.531	24.5	7.6	186.3	1416.5
644	16/09/2010	4:00:00	2.604	2.656	0.618	26.7	7.6	204.0	1560.1
645	16/09/2010	5:00:00	2.469	2.439	0.442	34.5	7.7	264.9	2036.9
646	16/09/2010	6:00:00	2.336	2.271	0.291	31.8	7.7	245.6	1897.8
647	16/09/2010	7:00:00	2.455	2.516	0.473	22.0	7.8	170.8	1326.9
648	16/09/2010	8:00:00	3.090	2.952	1.009	22.9	7.8	179.2	1400.0
649	16/09/2010	9:00:00	3.045	2.944	0.982	44.5	7.9	349.2	2743.9
650	16/09/2010	10:00:00	2.769	2.808	0.776	59.7	7.9	471.6	3723.2

Continúa en la siguiente página



Tabla B.1 – Continuación de la página anterior

Muestra	Fecha	Hora	Lectura 1	Lectura 2	Promedio corregido	Ai	tmi (días)	Ai*tmi	Ai*tmi ²
651	16/09/2010	11:00:00	2.668	2.780	0.712	52.7	7.9	418.6	3322.6
652	16/09/2010	12:00:00	2.882	2.819	0.838	44.6	8.0	356.1	2841.4
653	16/09/2010	13:00:00	2.874	2.729	0.789	46.5	8.0	372.9	2991.4
654	16/09/2010	14:00:00	2.788	2.887	0.825	48.8	8.1	393.6	3173.1
655	16/09/2010	15:00:00	2.741	2.777	0.747	48.4	8.1	392.5	3180.7
656	16/09/2010	16:00:00	2.830	2.827	0.816	47.2	8.1	384.1	3128.5
657	16/09/2010	17:00:00	2.800	2.751	0.763	46.9	8.2	383.9	3143.0
658	16/09/2010	18:00:00	2.860	3.083	0.959	47.4	8.2	389.9	3208.2
659	16/09/2010	19:00:00	2.794	2.883	0.826	51.7	8.3	427.4	3535.1
660	16/09/2010	20:00:00	3.258	3.111	1.172	53.6	8.3	445.2	3700.2
661	16/09/2010	21:00:00	3.604	3.415	1.497	59.9	8.4	500.9	4185.0
662	16/09/2010	22:00:00	3.257	3.237	1.235	80.1	8.4	672.4	5645.8
663	16/09/2010	23:00:00	3.074	2.988	1.019	82.0	8.4	691.4	5833.4
664	17/09/2010	0:00:00	3.237	3.122	1.167	67.6	8.5	573.1	4859.2
665	17/09/2010	1:00:00	3.053	3.114	1.071	65.6	8.5	558.8	4761.4
666	17/09/2010	2:00:00	3.422	3.587	1.492	67.1	8.6	574.9	4922.6
667	17/09/2010	3:00:00	3.189	3.219	1.192	76.9	8.6	661.7	5694.3
668	17/09/2010	4:00:00	3.555	3.603	1.567	80.5	8.6	696.0	6017.2
669	17/09/2010	5:00:00	3.414	3.331	1.360	82.7	8.7	718.9	6246.5
670	17/09/2010	6:00:00	4.048	3.980	2.002	87.8	8.7	766.4	6689.6
671	17/09/2010	7:00:00	3.615	3.430	1.510	100.9	8.8	884.7	7760.7
672	17/09/2010	8:00:00	2.172	2.168	0.158	105.4	8.8	928.3	8179.9
673	17/09/2010	9:00:00	1.735	1.720	0.000	50.0	8.8	442.7	3917.3
674	17/09/2010	10:00:00	1.470	1.481	0.000	4.7	8.9	42.0	373.6
675	17/09/2010	11:00:00	2.070	1.905	0.000	0.0	0.0	0.0	0.0

Continúa en la siguiente página



Tabla B.1 – Continuación de la página anterior

Muestra	Fecha	Hora	Lectura 1	Lectura 2	Promedio corregido	Ai	tmi (días)	Ai*tmi	Ai*tmi ²
676	17/09/2010	12:00:00	1.452	1.544	0.000	0.0	0.0	0.0	0.0
677	17/09/2010	13:00:00	1.671	1.807	0.000	0.0	0.0	0.0	0.0
678	17/09/2010	14:00:00	1.779	1.457	0.000	0.0	0.0	0.0	0.0
679	17/09/2010	15:00:00	1.728	1.505	0.000	0.0	0.0	0.0	0.0
680	17/09/2010	16:00:00	1.839	1.963	0.000	0.0	0.0	0.0	0.0
681	17/09/2010	17:00:00	3.445	3.373	1.397	0.0	0.0	0.0	0.0
682	17/09/2010	18:00:00	2.668	2.419	0.531	41.9	9.2	387.0	3574.2
683	17/09/2010	19:00:00	3.139	3.171	1.143	57.8	9.3	536.0	4967.2
684	17/09/2010	20:00:00	2.178	2.076	0.115	50.2	9.3	467.7	4356.9
685	17/09/2010	21:00:00	1.601	1.575	0.000	37.7	9.3	352.6	3296.3
686	17/09/2010	22:00:00	2.171	2.184	0.165	3.4	9.4	32.3	303.1
687	17/09/2010	23:00:00	2.134	2.190	0.150	5.0	9.4	46.8	441.8
688	18/09/2010	0:00:00	1.559	1.313	0.000	9.4	9.5	89.5	848.4
689	18/09/2010	1:00:00	1.736	1.577	0.000	4.5	9.5	42.7	406.3
690	18/09/2010	2:00:00	1.759	1.839	0.000	0.0	0.0	0.0	0.0
691	18/09/2010	3:00:00	2.196	2.104	0.138	0.0	0.0	0.0	0.0
692	18/09/2010	4:00:00	1.691	1.917	0.000	4.1	9.7	39.9	384.7
693	18/09/2010	5:00:00	1.625	1.730	0.000	4.1	9.7	40.0	386.9
694	18/09/2010	6:00:00	1.823	1.557	0.000	0.0	0.0	0.0	0.0
695	18/09/2010	7:00:00	1.721	1.825	0.000	0.0	0.0	0.0	0.0
696	18/09/2010	8:00:00	3.592	3.491	1.529	0.0	0.0	0.0	0.0
697	18/09/2010	9:00:00	1.752	1.900	0.000	45.9	9.9	452.4	4460.8
698	18/09/2010	10:00:00	2.055	2.012	0.021	45.9	9.9	453.6	4486.0
699	18/09/2010	11:00:00	1.938	1.782	0.000	0.6	9.9	6.3	62.7
700	18/09/2010	12:00:00	1.699	1.707	0.000	0.6	10.0	6.3	63.0

Continúa en la siguiente página



Tabla B.1 – Continuación de la página anterior

Muestra	Fecha	Hora	Lectura 1	Lectura 2	Promedio corregido	Ai	tmi (días)	Ai*tmi	Ai*tmi ²
701	18/09/2010	13:00:00	1.743	1.874	0.000	0.0	0.0	0.0	0.0
702	18/09/2010	14:00:00	1.871	1.740	0.000	0.0	0.0	0.0	0.0
703	18/09/2010	15:00:00	2.402	2.253	0.315	0.0	0.0	0.0	0.0
704	18/09/2010	16:00:00	1.825	1.819	0.000	9.5	10.2	96.0	974.5
705	18/09/2010	17:00:00	1.664	1.793	0.000	9.5	10.2	96.2	979.8
706	18/09/2010	18:00:00	4.225	4.284	2.242	0.0	0.0	0.0	0.0
707	18/09/2010	19:00:00	3.984	3.816	1.888	67.3	10.3	691.3	7105.2
708	18/09/2010	20:00:00	2.889	2.648	0.756	123.9	10.3	1277.6	13174.1
709	18/09/2010	21:00:00	2.546	2.401	0.461	79.3	10.4	821.0	8498.1
710	18/09/2010	22:00:00	2.215	2.205	0.198	36.5	10.4	379.6	3945.3
711	18/09/2010	23:00:00	2.338	2.402	0.358	19.8	10.4	206.2	2151.8
712	19/09/2010	0:00:00	2.153	2.206	0.167	16.7	10.5	174.6	1829.9
713	19/09/2010	1:00:00	2.174	2.434	0.292	15.7	10.5	165.6	1741.6
714	19/09/2010	2:00:00	2.566	2.771	0.656	13.8	10.6	145.4	1535.9
715	19/09/2010	3:00:00	2.355	2.524	0.427	28.4	10.6	301.6	3198.8
716	19/09/2010	4:00:00	1.862	1.825	0.000	32.5	10.6	345.9	3682.0
717	19/09/2010	5:00:00	1.658	1.707	0.000	12.8	10.7	136.9	1461.7
718	19/09/2010	6:00:00	1.791	1.803	0.000	0.0			

Tabla B.1: Prueba de trazadores Facultativa 2



B.2 PRUEBA DE TRAZADORES EN LA LAGUNA FACULTATIVA 1



Muestra	Fecha	Hora	Lectura 1	Lectura 2	Promedio corregido	Ai	tmi (días)	Ai*tmi	Ai*tmi ²
1	27/12/2010	11:05:00	1.312	1.375	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	27/12/2010	11:10:00	0.718	0.652	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	27/12/2010	11:15:00	0.684	0.543	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	27/12/2010	11:20:00	0.631	0.596	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	27/12/2010	11:25:00	0.681	0.600	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	27/12/2010	11:30:00	0.449	0.530	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7	27/12/2010	11:35:00	0.574	0.510	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8	27/12/2010	11:40:00	0.666	0.549	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
9	27/12/2010	11:45:00	0.514	0.549	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	27/12/2010	11:50:00	0.439	0.554	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
11	27/12/2010	11:55:00	0.492	0.556	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
12	27/12/2010	12:00:00	0.710	0.658	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
13	27/12/2010	12:05:00	0.467	0.530	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
14	27/12/2010	12:10:00	0.666	0.607	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
15	27/12/2010	12:15:00	0.609	0.670	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
16	27/12/2010	12:20:00	0.734	0.618	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
17	27/12/2010	12:25:00	0.691	0.595	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
18	27/12/2010	12:30:00	0.766	0.784	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
19	27/12/2010	12:35:00	0.750	0.641	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
20	27/12/2010	12:40:00	0.590	0.595	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
21	27/12/2010	12:45:00	0.840	0.754	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
22	27/12/2010	12:50:00	0.686	0.710	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
23	27/12/2010	12:55:00	0.795	0.743	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
24	27/12/2010	13:00:00	1.169	1.086	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
25	27/12/2010	13:05:00	1.194	1.087	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Continúa en la siguiente página



Tabla B.2 – Continuation de la página anterior

Muestra	Fecha	Hora	Lectura 1	Lectura 2	Promedio corregido	Ai	tmi (días)	Ai*tmi	Ai*tmi ²
26	27/12/2010	13:10:00	1.078	1.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
27	27/12/2010	13:15:00	1.107	1.045	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
28	27/12/2010	13:20:00	1.020	1.190	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
29	27/12/2010	13:25:00	1.110	1.023	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
30	27/12/2010	13:30:00	1.023	0.913	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
31	27/12/2010	13:35:00	1.265	1.328	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
32	27/12/2010	13:40:00	0.951	1.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
33	27/12/2010	13:45:00	1.042	1.108	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
34	27/12/2010	13:50:00	0.886	0.806	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
35	27/12/2010	13:55:00	1.032	0.981	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
36	27/12/2010	14:00:00	1.271	1.131	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
37	27/12/2010	14:05:00	0.912	1.011	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
38	27/12/2010	14:10:00	1.038	0.946	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
39	27/12/2010	14:15:00	1.053	0.932	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
40	27/12/2010	14:20:00	1.285	1.285	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
41	27/12/2010	14:25:00	0.858	0.712	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
42	27/12/2010	14:30:00	1.190	1.113	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
43	27/12/2010	14:35:00	0.987	1.010	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
44	27/12/2010	14:40:00	0.791	0.787	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
45	27/12/2010	14:45:00	0.993	0.993	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
46	27/12/2010	14:50:00	1.489	1.343	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
47	27/12/2010	14:55:00	1.070	1.012	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
48	27/12/2010	15:00:00	0.721	0.655	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
49	27/12/2010	15:05:00	0.442	0.568	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
50	27/12/2010	15:10:00	0.526	0.645	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Continúa en la siguiente página



Tabla B.2 – Continuation de la página anterior

Muestra	Fecha	Hora	Lectura 1	Lectura 2	Promedio corregido	Ai	tmi (días)	Ai*tmi	Ai*tmi ²
51	27/12/2010	15:15:00	0.857	0.856	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
52	27/12/2010	15:20:00	0.793	0.694	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
53	27/12/2010	15:25:00	0.748	0.723	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
54	27/12/2010	15:30:00	0.858	0.800	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
55	27/12/2010	15:35:00	0.900	0.841	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
56	27/12/2010	15:40:00	1.233	1.177	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
57	27/12/2010	15:45:00	1.280	1.239	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
58	27/12/2010	15:50:00	1.083	0.935	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
59	27/12/2010	15:55:00	1.080	0.984	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
60	27/12/2010	16:00:00	1.034	1.049	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
61	27/12/2010	16:05:00	1.311	1.273	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
62	27/12/2010	16:10:00	1.104	1.214	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
63	27/12/2010	16:15:00	1.483	1.415	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
64	27/12/2010	16:20:00	1.205	1.124	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
65	27/12/2010	16:25:00	1.216	1.152	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
66	27/12/2010	16:30:00	1.309	1.294	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
67	27/12/2010	16:35:00	1.376	1.212	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
68	27/12/2010	16:40:00	1.241	1.165	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
69	27/12/2010	16:45:00	1.118	1.137	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
70	27/12/2010	16:50:00	1.012	1.180	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
71	27/12/2010	16:55:00	1.082	1.146	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
72	27/12/2010	17:00:00	1.116	1.074	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
73	27/12/2010	17:05:00	1.060	1.128	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
74	27/12/2010	17:10:00	1.297	1.389	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
75	27/12/2010	17:15:00	1.516	1.624	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Continúa en la siguiente página



Tabla B.2 – Continuación de la página anterior

Muestra	Fecha	Hora	Lectura 1	Lectura 2	Promedio corregido	Ai	tmi (días)	Ai*tmi	Ai*tmi ²
76	27/12/2010	17:20:00	2.028	1.901	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0
77	27/12/2010	17:25:00	2.264	2.176	0.4	0.4	0.3	0.1	0.0
78	27/12/2010	17:30:00	2.434	2.489	0.7	1.5	0.3	0.4	0.1
79	27/12/2010	17:35:00	4.489	4.368	2.6	2.7	0.3	0.7	0.2
80	27/12/2010	17:40:00	5.179	5.110	3.3	8.2	0.3	2.2	0.6
81	27/12/2010	17:45:00	5.608	5.520	3.8	14.9	0.3	4.1	1.1
82	27/12/2010	17:50:00	6.286	6.139	4.4	17.8	0.3	5.0	1.4
83	27/12/2010	17:55:00	6.529	6.618	4.8	20.4	0.3	5.8	1.6
84	27/12/2010	18:00:00	6.578	6.609	4.8	23.0	0.3	6.6	1.9
85	27/12/2010	18:05:00	6.781	6.782	5.0	23.9	0.3	6.9	2.0
86	27/12/2010	18:10:00	5.990	6.165	4.3	24.4	0.3	7.2	2.1
87	27/12/2010	18:15:00	7.086	7.163	5.3	23.1	0.3	6.9	2.0
88	27/12/2010	18:20:00	7.250	7.220	5.4	24.0	0.3	7.2	2.2
89	27/12/2010	18:25:00	7.320	7.253	5.5	26.9	0.3	8.2	2.5
90	27/12/2010	18:30:00	7.497	7.447	5.7	27.3	0.3	8.4	2.6
91	27/12/2010	18:35:00	6.513	6.627	4.8	27.9	0.3	8.7	2.7
92	27/12/2010	18:40:00	7.223	7.232	5.4	26.1	0.3	8.2	2.6
93	27/12/2010	18:45:00	8.216	8.172	6.4	25.5	0.3	8.1	2.6
94	27/12/2010	18:50:00	7.957	7.930	6.1	29.6	0.3	9.5	3.0
95	27/12/2010	18:55:00	7.990	7.967	6.2	31.3	0.3	10.2	3.3
96	27/12/2010	19:00:00	8.061	7.914	6.2	30.8	0.3	10.1	3.3
97	27/12/2010	19:10:00	8.948	9.102	7.2	30.9	0.3	10.3	3.4
98	27/12/2010	19:20:00	8.172	8.121	6.3	67.1	0.3	22.5	7.5
99	27/12/2010	19:30:00	7.976	8.045	6.2	67.9	0.3	23.3	8.0
100	27/12/2010	19:40:00	7.967	7.829	6.1	62.8	0.4	22.0	7.7

Continúa en la siguiente página



Tabla B.2 – Continuación de la página anterior

Muestra	Fecha	Hora	Lectura 1	Lectura 2	Promedio corregido	Ai	tmi (días)	Ai*tmi	Ai*tmi ²
101	27/12/2010	19:50:00	7.878	7.881	6.1	61.5	0.4	22.0	7.9
102	27/12/2010	20:00:00	7.489	7.391	5.6	60.9	0.4	22.2	8.1
103	27/12/2010	20:10:00	7.213	7.263	5.4	58.6	0.4	21.8	8.1
104	27/12/2010	20:20:00	7.354	7.219	5.5	55.4	0.4	21.0	7.9
105	27/12/2010	20:30:00	6.963	6.863	5.1	54.6	0.4	21.1	8.1
106	27/12/2010	20:40:00	6.650	6.717	4.9	53.0	0.4	20.8	8.2
107	27/12/2010	20:50:00	6.361	6.359	4.6	50.0	0.4	20.0	8.0
108	27/12/2010	21:00:00	6.797	6.762	5.0	47.2	0.4	19.2	7.8
109	27/12/2010	21:10:00	6.786	6.693	4.9	47.7	0.4	19.7	8.1
110	27/12/2010	21:20:00	6.682	6.600	4.8	49.6	0.4	20.8	8.8
111	27/12/2010	21:30:00	6.763	6.794	5.0	48.9	0.4	20.9	8.9
112	27/12/2010	21:40:00	6.738	6.805	5.0	49.1	0.4	21.3	9.2
113	27/12/2010	21:50:00	6.711	6.713	4.9	49.8	0.4	21.9	9.7
114	27/12/2010	22:00:00	7.185	7.064	5.3	49.4	0.4	22.1	9.9
115	27/12/2010	22:10:00	7.118	7.198	5.4	51.2	0.5	23.3	10.6
116	27/12/2010	22:20:00	7.275	7.289	5.5	53.4	0.5	24.7	11.4
117	27/12/2010	22:30:00	7.472	7.559	5.7	54.2	0.5	25.4	11.9
118	27/12/2010	22:40:00	7.538	7.554	5.7	56.0	0.5	26.6	12.7
119	27/12/2010	22:50:00	7.848	7.712	6.0	57.3	0.5	27.7	13.3
120	27/12/2010	23:00:00	7.934	7.983	6.2	58.6	0.5	28.7	14.1
121	27/12/2010	23:10:00	8.512	8.513	6.7	60.7	0.5	30.1	15.0
122	27/12/2010	23:20:00	8.786	8.693	6.9	64.4	0.5	32.4	16.3
123	27/12/2010	23:30:00	8.748	8.826	7.0	68.3	0.5	34.8	17.8
124	27/12/2010	23:40:00	8.692	8.721	6.9	69.6	0.5	36.0	18.6
125	27/12/2010	23:50:00	8.831	8.747	7.0	69.5	0.5	36.4	19.1

Continúa en la siguiente página



Tabla B.2 – Continuación de la página anterior

Muestra	Fecha	Hora	Lectura 1	Lectura 2	Promedio corregido	Ai	tmi (días)	Ai*tmi	Ai*tmi ²
126	28/12/2010	0:00:00	8.578	8.429	6.7	69.5	0.5	36.9	19.6
127	28/12/2010	0:10:00	8.397	8.399	6.6	68.5	0.5	36.8	19.8
128	28/12/2010	0:20:00	8.487	8.399	6.6	66.5	0.5	36.3	19.8
129	28/12/2010	0:30:00	8.500	8.467	6.7	66.2	0.6	36.6	20.2
130	28/12/2010	0:40:00	8.377	8.374	6.6	66.6	0.6	37.2	20.8
131	28/12/2010	0:50:00	8.442	8.476	6.7	66.3	0.6	37.5	21.2
132	28/12/2010	1:00:00	8.560	8.553	6.8	66.2	0.6	37.9	21.7
133	28/12/2010	1:10:00	8.371	8.333	6.6	67.1	0.6	38.9	22.6
134	28/12/2010	1:20:00	8.317	8.254	6.5	66.5	0.6	39.0	22.9
135	28/12/2010	1:30:00	7.924	7.902	6.1	65.2	0.6	38.7	23.0
136	28/12/2010	1:40:00	7.799	7.685	5.9	63.0	0.6	37.8	22.7
137	28/12/2010	1:50:00	7.689	7.714	5.9	60.3	0.6	36.6	22.3
138	28/12/2010	2:00:00	7.538	7.683	5.8	59.2	0.6	36.4	22.4
139	28/12/2010	2:10:00	7.744	7.752	5.9	58.6	0.6	36.4	22.6
140	28/12/2010	2:20:00	7.554	7.572	5.8	58.8	0.6	37.0	23.2
141	28/12/2010	2:30:00	7.733	7.669	5.9	58.6	0.6	37.2	23.6
142	28/12/2010	2:40:00	7.629	7.692	5.9	58.3	0.6	37.5	24.1
143	28/12/2010	2:50:00	7.586	7.578	5.8	58.8	0.6	38.2	24.8
144	28/12/2010	3:00:00	6.307	6.414	4.6	58.2	0.7	38.2	25.1
145	28/12/2010	3:10:00	6.131	6.129	4.3	51.7	0.7	34.3	22.7
146	28/12/2010	3:20:00	6.072	6.056	4.3	44.5	0.7	29.8	20.0
147	28/12/2010	3:30:00	5.810	5.802	4.0	43.0	0.7	29.1	19.7
148	28/12/2010	3:40:00	5.967	6.046	4.2	41.4	0.7	28.3	19.3
149	28/12/2010	3:50:00	5.999	5.886	4.1	41.1	0.7	28.4	19.6
150	28/12/2010	4:00:00	6.090	5.976	4.2	41.7	0.7	29.1	20.3

Continúa en la siguiente página



Tabla B.2 – Continuación de la página anterior

Muestra	Fecha	Hora	Lectura 1	Lectura 2	Promedio corregido	Ai	tmi (días)	Ai*tmi	Ai*tmi ²
151	28/12/2010	4:10:00	5.934	5.859	4.1	41.9	0.7	29.5	20.8
152	28/12/2010	4:20:00	5.891	5.944	4.1	41.6	0.7	29.6	21.1
153	28/12/2010	4:30:00	5.781	5.744	4.0	41.1	0.7	29.5	21.2
154	28/12/2010	4:40:00	6.484	6.411	4.6	40.4	0.7	29.3	21.3
155	28/12/2010	4:50:00	6.079	6.004	4.2	43.1	0.7	31.5	23.1
156	28/12/2010	5:00:00	6.096	6.098	4.3	44.4	0.7	32.9	24.3
157	28/12/2010	5:10:00	6.367	6.285	4.5	42.7	0.7	31.9	23.8
158	28/12/2010	5:20:00	6.046	6.027	4.2	44.1	0.8	33.2	25.0
159	28/12/2010	5:30:00	6.191	6.170	4.4	43.8	0.8	33.3	25.3
160	28/12/2010	5:40:00	6.198	6.121	4.4	43.1	0.8	33.1	25.4
161	28/12/2010	5:50:00	6.056	6.020	4.2	43.7	0.8	33.8	26.2
162	28/12/2010	6:00:00	6.084	5.976	4.2	43.0	0.8	33.6	26.2
163	28/12/2010	6:10:00	6.113	6.075	4.3	42.3	0.8	33.4	26.3
164	28/12/2010	6:20:00	6.273	6.232	4.5	42.6	0.8	33.9	26.9
165	28/12/2010	6:30:00	6.375	6.217	4.5	43.7	0.8	35.1	28.1
166	28/12/2010	6:40:00	6.335	6.245	4.5	44.7	0.8	36.2	29.3
167	28/12/2010	6:50:00	6.176	6.188	4.4	44.9	0.8	36.7	29.9
168	28/12/2010	7:00:00	6.370	6.450	4.6	44.4	0.8	36.5	30.0
169	28/12/2010	7:10:00	6.941	6.930	5.1	45.0	0.8	37.3	31.0
170	28/12/2010	7:20:00	7.044	6.992	5.2	48.7	0.8	40.8	34.1
171	28/12/2010	7:30:00	6.882	6.956	5.1	51.8	0.8	43.7	36.9
172	28/12/2010	7:40:00	6.493	6.494	4.7	51.7	0.9	44.0	37.4
173	28/12/2010	7:50:00	6.825	6.705	5.0	49.1	0.9	42.1	36.1
174	28/12/2010	8:00:00	6.689	6.780	4.9	48.3	0.9	41.8	36.1
175	28/12/2010	8:10:00	6.983	6.920	5.2	49.5	0.9	43.1	37.6

Continúa en la siguiente página



Tabla B.2 – Continuación de la página anterior

Muestra	Fecha	Hora	Lectura 1	Lectura 2	Promedio corregido	Ai	tmi (días)	Ai*tmi	Ai*tmi ²
176	28/12/2010	8:20:00	6.942	6.864	5.1	50.4	0.9	44.3	38.9
177	28/12/2010	8:30:00	6.894	6.992	5.1	51.3	0.9	45.4	40.2
178	28/12/2010	8:40:00	6.540	6.642	4.8	51.2	0.9	45.7	40.8
179	28/12/2010	8:50:00	6.691	6.661	4.9	49.7	0.9	44.7	40.2
180	28/12/2010	9:00:00	6.335	6.384	4.6	48.3	0.9	43.8	39.7
181	28/12/2010	9:10:00	6.328	6.425	4.6	47.2	0.9	43.1	39.3
182	28/12/2010	9:20:00	6.296	6.225	4.5	45.7	0.9	42.0	38.7
183	28/12/2010	9:30:00	6.317	6.464	4.6	45.2	0.9	41.9	38.8
184	28/12/2010	9:40:00	6.233	6.220	4.4	45.3	0.9	42.3	39.5
185	28/12/2010	9:50:00	6.382	6.418	4.6	45.1	0.9	42.4	39.9
186	28/12/2010	10:00:00	6.095	6.041	4.3	45.1	0.9	42.8	40.6
187	28/12/2010	10:10:00	6.056	5.968	4.2	44.3	1.0	42.3	40.4
188	28/12/2010	10:20:00	6.329	6.351	4.5	42.4	1.0	40.8	39.2
189	28/12/2010	10:30:00	6.038	5.939	4.2	43.8	1.0	42.4	41.1
190	28/12/2010	10:40:00	6.101	6.003	4.3	43.6	1.0	42.6	41.5
191	28/12/2010	10:50:00	5.966	6.008	4.2	42.2	1.0	41.5	40.8
192	28/12/2010	11:00:00	6.737	6.700	4.9	42.2	1.0	41.8	41.3
193	28/12/2010	11:10:00	6.235	6.302	4.5	45.5	1.0	45.4	45.2
194	28/12/2010	11:20:00	6.432	6.408	4.6	46.9	1.0	47.1	47.3
195	28/12/2010	11:30:00	6.361	6.371	4.6	45.4	1.0	45.9	46.4
196	28/12/2010	11:40:00	6.600	6.605	4.8	45.9	1.0	46.7	47.5
197	28/12/2010	11:50:00	6.783	6.717	5.0	46.8	1.0	48.0	49.2
198	28/12/2010	12:00:00	6.931	6.892	5.1	48.8	1.0	50.3	51.9
199	28/12/2010	12:10:00	6.917	6.811	5.1	50.3	1.0	52.2	54.2
200	28/12/2010	12:20:00	6.919	6.847	5.1	50.9	1.0	53.2	55.6

Continúa en la siguiente página



Tabla B.2 – Continuación de la página anterior

Muestra	Fecha	Hora	Lectura 1	Lectura 2	Promedio corregido	Ai	tmi (días)	Ai*tmi	Ai*tmi ²
201	28/12/2010	12:30:00	6.762	6.725	4.9	50.7	1.1	53.4	56.2
202	28/12/2010	12:40:00	7.023	7.001	5.2	50.1	1.1	53.1	56.2
203	28/12/2010	12:50:00	6.784	6.675	4.9	50.8	1.1	54.1	57.7
204	28/12/2010	13:00:00	6.120	6.188	4.4	50.7	1.1	54.4	58.4
205	28/12/2010	13:10:00	6.522	6.506	4.7	46.4	1.1	50.1	54.1
206	28/12/2010	13:20:00	6.387	6.420	4.6	45.3	1.1	49.3	53.6
207	28/12/2010	13:30:00	6.277	6.247	4.5	46.6	1.1	51.0	55.7
208	28/12/2010	13:40:00	6.115	6.100	4.3	45.3	1.1	49.9	54.9
209	28/12/2010	13:50:00	6.365	6.282	4.5	43.8	1.1	48.6	53.8
210	28/12/2010	14:00:00	6.508	6.446	4.7	44.2	1.1	49.2	54.9
211	28/12/2010	14:10:00	6.071	6.106	4.3	46.0	1.1	51.6	57.9
212	28/12/2010	14:20:00	6.414	6.301	4.6	44.8	1.1	50.6	57.1
213	28/12/2010	14:30:00	6.324	6.236	4.5	44.2	1.1	50.2	57.0
214	28/12/2010	14:40:00	6.056	6.049	4.3	45.2	1.1	51.6	59.0
215	28/12/2010	14:50:00	6.019	6.044	4.2	43.7	1.1	50.2	57.7
216	28/12/2010	15:00:00	5.978	5.956	4.2	42.4	1.2	49.0	56.7
217	28/12/2010	15:10:00	5.834	5.917	4.1	42.0	1.2	48.8	56.8
218	28/12/2010	15:20:00	5.520	5.442	3.7	41.2	1.2	48.2	56.4
219	28/12/2010	15:30:00	5.459	5.568	3.7	38.8	1.2	45.6	53.7
220	28/12/2010	15:40:00	5.542	5.412	3.7	37.0	1.2	43.8	51.8
221	28/12/2010	15:50:00	6.576	6.604	4.8	37.0	1.2	44.0	52.4
222	28/12/2010	16:00:00	5.574	5.689	3.8	42.3	1.2	50.7	60.8
223	28/12/2010	16:10:00	5.784	5.691	3.9	43.1	1.2	51.9	62.6
224	28/12/2010	16:20:00	5.984	5.918	4.2	38.8	1.2	47.1	57.0
225	28/12/2010	16:30:00	5.894	5.986	4.1	40.4	1.2	49.3	60.1

Continúa en la siguiente página



Tabla B.2 – Continuación de la página anterior

Muestra	Fecha	Hora	Lectura 1	Lectura 2	Promedio corregido	Ai	tmi (días)	Ai*tmi	Ai*tmi ²
226	28/12/2010	16:40:00	6.162	6.051	4.3	41.5	1.2	50.8	62.3
227	28/12/2010	16:50:00	5.731	5.807	4.0	42.2	1.2	52.1	64.2
228	28/12/2010	17:00:00	5.969	5.881	4.1	41.4	1.2	51.3	63.6
229	28/12/2010	17:10:00	6.252	6.154	4.4	40.5	1.2	50.4	62.9
230	28/12/2010	17:20:00	6.047	6.072	4.3	42.6	1.3	53.4	67.0
231	28/12/2010	17:30:00	6.160	6.209	4.4	43.3	1.3	54.6	68.8
232	28/12/2010	17:40:00	6.090	5.910	4.2	43.2	1.3	54.8	69.4
233	28/12/2010	17:50:00	5.973	6.006	4.2	42.9	1.3	54.7	69.7
234	28/12/2010	18:00:00	6.454	6.460	4.7	41.9	1.3	53.7	68.9
235	28/12/2010	18:10:00	6.214	6.286	4.5	44.2	1.3	57.0	73.4
236	28/12/2010	18:20:00	6.137	6.106	4.3	45.5	1.3	59.0	76.4
237	28/12/2010	18:30:00	5.952	6.068	4.2	43.9	1.3	57.1	74.4
238	28/12/2010	18:40:00	6.338	6.351	4.5	42.7	1.3	55.8	73.1
239	28/12/2010	18:50:00	6.100	6.052	4.3	43.8	1.3	57.6	75.8
240	28/12/2010	19:00:00	6.643	6.564	4.8	44.1	1.3	58.3	77.2
241	28/12/2010	19:15:00	6.463	6.310	4.6	45.4	1.3	60.4	80.3
242	28/12/2010	19:30:00	6.754	6.626	4.9	70.4	1.3	94.1	125.8
243	28/12/2010	19:45:00	6.239	6.270	4.5	71.1	1.3	95.9	129.3
244	28/12/2010	20:00:00	7.060	7.015	5.2	70.1	1.4	95.3	129.5
245	28/12/2010	20:15:00	6.556	6.495	4.7	72.7	1.4	99.6	136.4
246	28/12/2010	20:30:00	6.298	6.376	4.5	74.7	1.4	103.1	142.3
247	28/12/2010	20:45:00	6.607	6.582	4.8	69.5	1.4	96.6	134.3
248	28/12/2010	21:00:00	6.198	6.151	4.4	70.0	1.4	98.1	137.4
249	28/12/2010	21:15:00	6.389	6.327	4.6	68.8	1.4	97.1	137.0
250	28/12/2010	21:30:00	6.289	6.315	4.5	67.0	1.4	95.3	135.4

Continúa en la siguiente página



Tabla B.2 – Continuación de la página anterior

Muestra	Fecha	Hora	Lectura 1	Lectura 2	Promedio corregido	Ai	tmi (días)	Ai*tmi	Ai*tmi ²
251	28/12/2010	21:45:00	6.169	6.196	4.4	68.0	1.4	97.3	139.4
252	28/12/2010	22:00:00	6.656	6.773	4.9	66.6	1.4	96.1	138.7
253	28/12/2010	22:15:00	6.150	6.230	4.4	69.7	1.5	101.3	147.3
254	28/12/2010	22:30:00	6.416	6.349	4.6	69.8	1.5	102.1	149.5
255	28/12/2010	22:45:00	7.070	7.106	5.3	67.3	1.5	99.2	146.2
256	28/12/2010	23:00:00	6.731	6.748	4.9	74.0	1.5	109.9	163.1
257	28/12/2010	23:15:00	6.468	6.436	4.7	76.7	1.5	114.7	171.4
258	28/12/2010	23:30:00	6.687	6.598	4.8	71.9	1.5	108.3	163.0
259	28/12/2010	23:45:00	7.467	7.390	5.6	71.2	1.5	107.9	163.6
260	29/12/2010	0:00:00	6.536	6.487	4.7	78.5	1.5	119.9	182.9
261	29/12/2010	0:15:00	6.337	6.227	5.3	77.6	1.5	119.1	183.0
262	29/12/2010	0:30:00	7.181	7.077	4.8	75.3	1.5	116.5	180.2
263	29/12/2010	0:45:00	6.640	6.634	4.8	76.2	1.6	118.7	184.9
264	29/12/2010	1:00:00	6.742	6.644	4.9	72.6	1.6	113.7	178.3
265	29/12/2010	1:15:00	7.086	6.977	5.2	73.0	1.6	115.2	181.7
266	29/12/2010	1:30:00	7.361	7.227	5.5	75.9	1.6	120.6	191.6
267	29/12/2010	1:45:00	6.637	6.546	4.8	80.4	1.6	128.6	205.7
268	29/12/2010	2:00:00	7.443	7.225	5.5	77.1	1.6	124.1	199.8
269	29/12/2010	2:15:00	5.897	5.925	4.1	77.4	1.6	125.4	203.2
270	29/12/2010	2:30:00	6.152	6.017	4.3	72.3	1.6	117.9	192.2
271	29/12/2010	2:45:00	6.020	6.123	4.3	63.0	1.6	103.3	169.5
272	29/12/2010	3:00:00	5.734	5.805	4.0	64.2	1.7	105.9	174.9
273	29/12/2010	3:15:00	5.825	5.855	4.0	61.8	1.7	102.7	170.6
274	29/12/2010	3:30:00	6.217	6.123	4.4	60.1	1.7	100.4	167.9
275	29/12/2010	3:45:00	6.004	5.841	4.1	63.1	1.7	106.1	178.5

Continúa en la siguiente página



Tabla B.2 – Continuación de la página anterior

Muestra	Fecha	Hora	Lectura 1	Lectura 2	Promedio corregido	Ai	tmi (días)	Ai*tmi	Ai*tmi ²
276	29/12/2010	4:00:00	5.893	5.864	4.1	63.7	1.7	107.8	182.5
277	29/12/2010	4:15:00	5.695	5.554	3.8	61.5	1.7	104.8	178.4
278	29/12/2010	4:30:00	5.712	5.812	4.0	59.3	1.7	101.6	174.0
279	29/12/2010	4:45:00	5.897	5.876	4.1	58.4	1.7	100.7	173.6
280	29/12/2010	5:00:00	5.776	5.877	4.0	60.4	1.7	104.7	181.6
281	29/12/2010	5:15:00	5.758	5.614	3.9	60.8	1.7	106.2	185.2
282	29/12/2010	5:30:00	5.703	5.708	3.9	59.3	1.8	104.2	182.8
283	29/12/2010	5:45:00	5.824	5.943	4.1	58.4	1.8	103.2	182.2
284	29/12/2010	6:00:00	5.656	5.597	3.8	59.9	1.8	106.4	189.0
285	29/12/2010	6:15:00	5.944	5.984	4.2	59.3	1.8	106.0	189.3
286	29/12/2010	6:30:00	5.467	5.578	3.7	59.9	1.8	107.7	193.5
287	29/12/2010	6:45:00	5.264	6.394	4.0	59.1	1.8	106.9	193.2
288	29/12/2010	7:00:00	4.425	4.414	2.6	58.1	1.8	105.7	192.1
289	29/12/2010	7:15:00	5.374	5.376	3.6	49.9	1.8	91.1	166.6
290	29/12/2010	7:30:00	4.241	4.298	2.5	46.5	1.8	85.4	157.1
291	29/12/2010	7:45:00	4.859	4.784	3.0	45.3	1.8	83.8	154.9
292	29/12/2010	8:00:00	4.727	4.691	2.9	41.2	1.9	76.6	142.4
293	29/12/2010	8:15:00	4.586	4.533	2.8	44.5	1.9	83.2	155.5
294	29/12/2010	8:30:00	5.026	5.055	3.2	42.5	1.9	79.9	150.3
295	29/12/2010	8:45:00	5.303	5.302	3.5	45.0	1.9	85.1	160.9
296	29/12/2010	9:00:00	5.098	5.063	3.3	50.6	1.9	96.1	182.8
297	29/12/2010	9:15:00	4.885	4.909	3.1	50.9	1.9	97.2	185.9
298	29/12/2010	9:30:00	5.540	5.413	3.7	47.8	1.9	91.9	176.7
299	29/12/2010	9:45:00	5.139	5.062	3.3	50.8	1.9	98.2	189.7
300	29/12/2010	10:00:00	5.530	5.556	3.7	52.3	1.9	101.7	197.5

Continúa en la siguiente página



Tabla B.2 – Continuación de la página anterior

Muestra	Fecha	Hora	Lectura 1	Lectura 2	Promedio corregido	Ai	tmi (días)	Ai*tmi	Ai*tmi ²
301	29/12/2010	10:15:00	5.287	5.245	3.5	52.8	2.0	103.2	201.5
302	29/12/2010	10:30:00	4.854	4.794	3.0	54.1	2.0	106.2	208.4
303	29/12/2010	10:45:00	6.180	6.218	4.4	48.7	2.0	96.1	189.6
304	29/12/2010	11:00:00	5.045	4.926	3.2	55.7	2.0	110.5	219.3
305	29/12/2010	11:15:00	4.416	4.592	2.7	56.9	2.0	113.5	226.3
306	29/12/2010	11:30:00	4.251	4.194	2.4	44.2	2.0	88.6	177.6
307	29/12/2010	11:45:00	4.276	4.355	2.5	38.4	2.0	77.5	156.2
308	29/12/2010	12:00:00	4.363	4.393	2.6	37.0	2.0	75.0	152.0
309	29/12/2010	12:15:00	4.179	4.088	2.3	38.2	2.0	77.8	158.4
310	29/12/2010	12:30:00	4.211	4.246	2.4	36.8	2.0	75.4	154.3
311	29/12/2010	12:45:00	4.634	4.503	2.8	35.7	2.1	73.5	151.2
312	29/12/2010	13:00:00	5.596	5.423	3.7	39.0	2.1	80.6	166.7
313	29/12/2010	13:15:00	4.020	3.959	2.2	48.6	2.1	101.0	209.9
314	29/12/2010	13:30:00	4.442	4.399	2.6	44.2	2.1	92.4	192.9
315	29/12/2010	13:45:00	4.094	4.048	2.3	36.1	2.1	75.7	159.0
316	29/12/2010	14:00:00	4.255	4.185	2.4	36.7	2.1	77.4	163.2
317	29/12/2010	14:15:00	3.999	3.981	2.2	35.2	2.1	74.6	158.1
318	29/12/2010	14:30:00	4.196	4.235	2.4	34.6	2.1	73.6	156.9
319	29/12/2010	14:45:00	4.352	4.309	2.5	34.5	2.1	73.9	158.3
320	29/12/2010	15:00:00	4.670	4.503	2.8	37.1	2.2	79.8	171.6
321	29/12/2010	15:15:00	4.967	4.933	3.2	39.9	2.2	86.2	186.3
322	29/12/2010	15:30:00	4.570	4.425	2.7	44.5	2.2	96.7	210.0
323	29/12/2010	15:45:00	4.190	4.169	2.4	43.9	2.2	95.7	208.8
324	29/12/2010	16:00:00	4.238	4.107	2.4	38.1	2.2	83.5	183.1
325	29/12/2010	16:15:00	4.455	4.484	2.7	35.6	2.2	78.5	173.0

Continúa en la siguiente página



Tabla B.2 – Continuación de la página anterior

Muestra	Fecha	Hora	Lectura 1	Lectura 2	Promedio corregido	Ai	tmi (dias)	Ai*tmi	Ai*tmi ²
326	29/12/2010	16:30:00	4.294	4.101	2.4	37.8	2.2	83.7	185.3
327	29/12/2010	16:45:00	4.690	4.541	2.8	38.0	2.2	84.5	187.9
328	29/12/2010	17:00:00	3.908	3.938	2.1	39.1	2.2	87.4	195.2
329	29/12/2010	17:15:00	4.217	4.204	2.4	37.0	2.2	83.1	186.6
330	29/12/2010	17:30:00	3.815	3.732	2.0	34.0	2.3	76.7	172.9
331	29/12/2010	17:45:00	3.822	3.872	2.0	32.9	2.3	74.5	168.7
332	29/12/2010	18:00:00	4.119	4.264	2.4	30.2	2.3	68.6	156.2
333	29/12/2010	18:15:00	4.034	3.992	2.2	33.3	2.3	76.1	174.1
334	29/12/2010	18:30:00	3.982	3.919	2.2	34.5	2.3	79.3	182.2
335	29/12/2010	18:45:00	4.156	4.296	2.4	32.7	2.3	75.5	174.2
336	29/12/2010	19:00:00	3.763	3.749	2.0	34.3	2.3	79.6	184.4
337	29/12/2010	19:15:00	3.438	3.489	1.7	32.9	2.3	76.5	178.1
338	29/12/2010	19:30:00	3.364	3.370	1.6	27.1	2.3	63.5	148.4
339	29/12/2010	19:45:00	3.066	2.946	1.2	24.2	2.3	56.9	133.7
340	29/12/2010	20:00:00	3.064	3.014	1.2	20.8	2.4	49.1	115.8
341	29/12/2010	20:15:00	2.794	2.839	1.0	18.3	2.4	43.5	103.0
342	29/12/2010	20:30:00	2.590	2.540	0.8	16.9	2.4	40.3	95.8
343	29/12/2010	20:45:00	2.516	2.527	0.7	13.4	2.4	31.9	76.3
344	29/12/2010	21:00:00	2.582	2.602	0.8	11.1	2.4	26.8	64.3
345	29/12/2010	21:15:00	2.588	2.528	0.8	11.4	2.4	27.4	66.0
346	29/12/2010	21:30:00	2.525	2.549	0.7	11.6	2.4	28.2	68.2
347	29/12/2010	21:45:00	2.486	2.561	0.7	11.2	2.4	27.3	66.3
348	29/12/2010	22:00:00	2.222	2.296	0.5	11.0	2.4	26.8	65.4
349	29/12/2010	22:15:00	2.004	2.046	0.2	8.9	2.5	21.8	53.4
350	29/12/2010	22:30:00	1.983	2.099	0.2	5.1	2.5	12.6	31.1

Continúa en la siguiente página



Tabla B.2 – Continuación de la página anterior

Muestra	Fecha	Hora	Lectura 1	Lectura 2	Promedio corregido	Ai	tmi (días)	Ai*tmi	Ai*tmi ²
351	29/12/2010	22:45:00	2.097	2.162	0.3	3.5	2.5	8.6	21.4
352	29/12/2010	23:00:00	2.180	2.116	0.3	4.3	2.5	10.6	26.4
353	29/12/2010	23:15:00	2.199	2.145	0.4	5.1	2.5	12.7	31.6
354	29/12/2010	23:30:00	1.903	1.916	0.1	5.4	2.5	13.5	33.9
355	29/12/2010	23:45:00	2.142	2.066	0.3	3.6	2.5	9.1	22.8
356	30/12/2010	0:00:00	1.838	1.931	0.1	3.1	2.5	7.8	19.8
357	30/12/2010	0:15:00	1.939	1.916	0.1	2.9	2.5	7.4	18.7
358	30/12/2010	0:30:00	1.929	2.020	0.2	1.6	2.5	4.1	10.3
359	30/12/2010	0:45:00	1.914	1.966	0.1	2.3	2.6	5.8	14.8
360	30/12/2010	1:00:00	1.929	1.940	0.1	2.4	2.6	6.1	15.5
361	30/12/2010	1:15:00	1.966	1.912	0.1	2.1	2.6	5.3	13.7
362	30/12/2010	1:30:00	2.041	2.006	0.2	2.1	2.6	5.3	13.7
363	30/12/2010	1:45:00	2.213	2.137	0.4	2.7	2.6	7.1	18.4
364	30/12/2010	2:00:00	2.017	2.136	0.3	4.5	2.6	11.7	30.6
365	30/12/2010	2:15:00	2.342	2.246	0.5	4.9	2.6	12.8	33.5
366	30/12/2010	2:30:00	2.181	2.280	0.4	5.8	2.6	15.2	40.0
367	30/12/2010	2:45:00	2.287	2.270	0.5	6.9	2.6	18.3	48.3
368	30/12/2010	3:00:00	2.283	2.272	0.5	6.8	2.7	18.1	47.9
369	30/12/2010	3:15:00	2.311	2.341	0.5	7.2	2.7	19.1	50.8
370	30/12/2010	3:30:00	2.392	2.392	0.6	7.5	2.7	20.1	53.7
371	30/12/2010	3:45:00	2.706	2.899	1.0	8.4	2.7	22.5	60.3
372	30/12/2010	4:00:00	2.156	2.188	0.4	12.0	2.7	32.2	86.7
373	30/12/2010	4:15:00	2.405	2.476	0.6	10.3	2.7	27.9	75.3
374	30/12/2010	4:30:00	2.351	2.273	0.5	7.6	2.7	20.6	55.9
375	30/12/2010	4:45:00	2.395	2.399	0.6	8.6	2.7	23.5	64.1

Continúa en la siguiente página



Tabla B.2 – Continuación de la página anterior

Muestra	Fecha	Hora	Lectura 1	Lectura 2	Promedio corregido	Ai	tmi (días)	Ai*tmi	Ai*tmi ²
376	30/12/2010	5:00:00	2.642	2.645	0.8	8.3	2.7	22.7	62.2
377	30/12/2010	5:15:00	2.475	2.526	0.7	10.8	2.7	29.7	81.4
378	30/12/2010	5:30:00	2.392	2.378	0.6	11.6	2.8	31.9	87.9
379	30/12/2010	5:45:00	2.564	2.640	0.8	9.6	2.8	26.7	73.7
380	30/12/2010	6:00:00	2.475	2.483	0.7	10.4	2.8	28.9	80.2
381	30/12/2010	6:15:00	2.754	2.756	1.0	11.1	2.8	30.9	86.2
382	30/12/2010	6:30:00	2.638	2.641	0.8	12.3	2.8	34.3	95.9
383	30/12/2010	6:45:00	2.773	2.791	1.0	13.5	2.8	37.8	106.1
384	30/12/2010	7:00:00	3.145	3.256	1.4	13.7	2.8	38.5	108.5
385	30/12/2010	7:15:00	2.879	2.869	1.1	17.9	2.8	50.5	143.0
386	30/12/2010	7:30:00	3.193	3.158	1.4	18.6	2.8	52.7	149.5
387	30/12/2010	7:45:00	3.109	3.075	1.3	18.4	2.8	52.3	149.1
388	30/12/2010	8:00:00	3.217	3.262	1.4	20.0	2.9	57.2	163.6
389	30/12/2010	8:15:00	3.377	3.348	1.6	20.5	2.9	58.8	168.7
390	30/12/2010	8:30:00	3.127	3.181	1.4	22.5	2.9	64.8	186.8
391	30/12/2010	8:45:00	2.944	2.898	1.1	21.9	2.9	63.2	182.8
392	30/12/2010	9:00:00	2.856	2.990	1.1	18.6	2.9	53.8	156.2
393	30/12/2010	9:15:00	3.042	2.952	1.2	16.8	2.9	49.0	142.7
394	30/12/2010	9:30:00	2.915	2.953	1.1	17.4	2.9	50.8	148.6
395	30/12/2010	9:45:00	2.946	2.945	1.1	17.5	2.9	51.3	150.3
396	30/12/2010	10:00:00	2.631	2.706	0.9	17.1	2.9	50.3	148.0
397	30/12/2010	10:15:00	2.652	2.640	0.8	15.1	3.0	44.6	131.7
398	30/12/2010	10:30:00	2.977	2.973	1.2	12.9	3.0	38.1	112.9
399	30/12/2010	10:45:00	3.037	3.007	1.2	15.2	3.0	45.1	134.1
400	30/12/2010	11:00:00	2.919	2.929	1.1	18.0	3.0	53.7	160.1

Continúa en la siguiente página



Tabla B.2 – Continuación de la página anterior

Muestra	Fecha	Hora	Lectura 1	Lectura 2	Promedio corregido	Ai	tmi (días)	Ai*tmi	Ai*tmi ²
401	30/12/2010	11:15:00	3.118	3.049	1.3	17.6	3.0	52.7	157.8
402	30/12/2010	11:30:00	3.190	3.117	1.4	18.1	3.0	54.3	163.1
403	30/12/2010	11:45:00	2.860	2.864	1.1	19.8	3.0	59.6	179.9
404	30/12/2010	12:00:00	2.895	2.920	1.1	18.1	3.0	54.8	165.9
405	30/12/2010	12:15:00	2.776	2.864	1.0	16.3	3.0	49.4	150.0
406	30/12/2010	12:30:00	2.933	2.949	1.1	16.0	3.0	48.6	148.1
407	30/12/2010	12:45:00	2.945	2.834	1.1	16.2	3.1	49.6	151.5
408	30/12/2010	13:00:00	3.271	3.331	1.5	16.7	3.1	51.3	157.4
409	30/12/2010	13:15:00	3.301	3.308	1.5	19.4	3.1	59.8	184.1
410	30/12/2010	13:30:00	3.538	3.443	1.7	22.5	3.1	69.6	215.0
411	30/12/2010	13:45:00	3.499	3.541	1.7	24.0	3.1	74.3	230.1
412	30/12/2010	14:00:00	3.693	3.616	1.9	25.6	3.1	79.5	247.3
413	30/12/2010	14:15:00	3.330	3.319	1.5	26.8	3.1	83.6	260.9
414	30/12/2010	14:30:00	3.482	3.329	1.6	25.3	3.1	79.3	248.3
415	30/12/2010	14:45:00	3.460	3.378	1.6	23.5	3.1	73.7	231.6
416	30/12/2010	15:00:00	3.411	3.493	1.7	24.2	3.2	76.2	240.1
417	30/12/2010	15:15:00	3.526	3.655	1.8	24.5	3.2	77.6	245.2
418	30/12/2010	15:30:00	3.087	3.085	1.3	25.8	3.2	81.9	259.8
419	30/12/2010	16:00:00	3.357	3.222	1.5	23.1	3.2	73.4	233.6
420	30/12/2010	16:30:00	3.879	3.710	2.0	41.6	3.2	132.9	424.4
421	30/12/2010	17:00:00	3.449	3.455	1.7	52.3	3.2	168.2	541.6
422	30/12/2010	17:30:00	3.542	3.471	1.7	54.7	3.2	177.2	573.9
423	30/12/2010	18:00:00	3.661	3.500	1.8	50.4	3.3	164.3	535.5
424	30/12/2010	18:30:00	4.155	4.093	2.3	52.3	3.3	171.6	563.2
425	30/12/2010	19:00:00	3.950	3.947	2.1	61.6	3.3	203.3	671.5

Continúa en la siguiente página



Tabla B.2 – Continuación de la página anterior

Muestra	Fecha	Hora	Lectura 1	Lectura 2	Promedio corregido	Ai	tmi (días)	Ai*tmi	Ai*tmi ²
426	30/12/2010	19:30:00	4.010	4.014	2.2	67.1	3.3	222.9	740.7
427	30/12/2010	20:00:00	3.992	4.019	2.2	65.4	3.3	218.7	731.3
428	30/12/2010	20:30:00	3.824	3.715	2.0	66.3	3.4	222.9	750.1
429	30/12/2010	21:00:00	2.033	0.000	0.2	62.6	3.4	212.0	717.7
430	30/12/2010	21:30:00	4.074	4.083	2.3	33.0	3.4	112.4	382.7
431	30/12/2010	22:00:00	3.700	3.704	1.9	37.7	3.4	129.2	443.2
432	30/12/2010	22:30:00	4.210	4.170	2.4	62.7	3.4	216.2	745.3
433	30/12/2010	23:00:00	4.107	4.336	2.4	64.4	3.5	223.3	774.8
434	30/12/2010	23:30:00	3.587	3.467	1.7	72.2	3.5	251.9	878.9
435	31/12/2010	0:00:00	2.984	2.807	1.1	62.2	3.5	218.4	766.6
436	31/12/2010	0:30:00	3.244	3.341	1.5	42.3	3.5	149.5	527.7
437	31/12/2010	1:00:00	3.718	3.612	1.9	38.8	3.6	137.9	490.0
438	31/12/2010	1:30:00	3.313	3.495	1.6	50.4	3.6	180.0	643.1
439	31/12/2010	2:00:00	4.062	4.031	2.2	52.0	3.6	187.0	671.9
440	31/12/2010	2:30:00	3.841	3.824	2.0	57.8	3.6	208.8	754.9
441	31/12/2010	3:00:00	3.287	3.153	1.4	64.2	3.6	233.3	848.2
442	31/12/2010	3:30:00	4.149	4.127	2.3	51.8	3.7	189.3	692.1
443	31/12/2010	4:00:00	3.920	3.886	2.1	56.4	3.7	207.3	762.5
444	31/12/2010	4:30:00	3.528	3.501	1.7	66.6	3.7	246.3	910.8
445	31/12/2010	5:00:00	3.400	3.367	1.6	57.3	3.7	212.9	791.7
446	31/12/2010	5:30:00	3.582	3.427	1.7	49.5	3.7	185.0	691.8
447	31/12/2010	6:00:00	3.456	3.387	1.6	49.3	3.8	185.5	697.5
448	31/12/2010	6:30:00	3.454	3.356	1.6	49.9	3.8	188.6	713.3
449	31/12/2010	7:00:00	3.504	3.670	1.8	48.4	3.8	184.0	699.6
450	31/12/2010	7:30:00	3.449	3.433	1.6	50.9	3.8	194.5	743.7

Continúa en la siguiente página



Tabla B.2 – Continuación de la página anterior

Muestra	Fecha	Hora	Lectura 1	Lectura 2	Promedio corregido	Ai	tmi (días)	Ai*tmi	Ai*tmi ²
451	31/12/2010	8:00:00	3.509	3.527	1.7	51.4	3.8	197.6	759.6
452	31/12/2010	8:30:00	3.838	3.962	2.1	50.4	3.9	194.7	752.5
453	31/12/2010	9:00:00	3.709	3.689	1.9	57.3	3.9	222.5	864.7
454	31/12/2010	9:30:00	4.041	4.083	2.3	60.0	3.9	234.3	915.2
455	31/12/2010	10:00:00	4.118	4.051	2.3	62.4	3.9	245.1	962.7
456	31/12/2010	10:30:00	4.141	4.007	2.3	68.2	3.9	269.2	1062.9
457	31/12/2010	11:00:00	3.968	3.894	2.1	68.4	4.0	271.4	1077.0
458	31/12/2010	11:30:00	3.507	3.515	1.7	66.1	4.0	263.6	1051.6
459	31/12/2010	12:00:00	3.470	3.504	1.7	57.6	4.0	231.1	926.7
460	31/12/2010	12:30:00	4.204	4.218	2.4	51.0	4.0	205.5	828.3
461	31/12/2010	13:00:00	4.276	4.277	2.5	61.5	4.1	249.1	1009.6
462	31/12/2010	13:30:00	4.079	3.980	2.2	73.3	4.1	298.6	1216.2
463	31/12/2010	14:00:00	4.945	4.899	3.1	70.6	4.1	289.0	1182.9
464	31/12/2010	14:30:00	6.745	6.776	5.0	80.3	4.1	330.3	1359.4
465	31/12/2010	15:00:00	4.542	4.623	2.8	121.2	4.1	501.5	2074.2
466	31/12/2010	15:30:00	4.036	3.994	2.2	116.1	4.2	482.6	2005.4
467	31/12/2010	16:00:00	4.591	4.542	2.8	75.0	4.2	313.1	1307.7
468	31/12/2010	16:30:00	4.660	4.668	2.9	74.7	4.2	313.7	1317.0
469	31/12/2010	17:00:00	4.452	4.424	2.6	84.5	4.2	356.3	1503.2
470	31/12/2010	17:30:00	3.575	3.699	1.8	82.5	4.2	349.9	1483.3
471	31/12/2010	18:00:00	3.329	3.313	1.5	67.1	4.3	285.9	1218.0
472	31/12/2010	18:30:00	2.834	2.823	1.0	50.4	4.3	215.6	923.1
473	31/12/2010	19:00:00	2.603	2.664	0.8	38.2	4.3	164.5	707.6
474	31/12/2010	19:30:00	3.019	2.963	1.2	27.9	4.3	120.7	521.9
475	31/12/2010	20:00:00	2.518	2.589	0.8	30.4	4.3	131.9	573.1

Continúa en la siguiente página



Tabla B.2 – Continuación de la página anterior

Muestra	Fecha	Hora	Lectura 1	Lectura 2	Promedio corregido	Ai	tmi (días)	Ai*tmi	Ai*tmi ²
476	31/12/2010	20:30:00	2.701	2.639	0.9	29.2	4.4	127.3	555.4
477	31/12/2010	21:00:00	2.969	2.996	1.2	24.4	4.4	106.8	468.4
478	31/12/2010	21:30:00	2.914	2.935	1.1	30.8	4.4	135.7	597.9
479	31/12/2010	22:00:00	2.953	2.928	1.1	34.6	4.4	153.2	678.2
480	31/12/2010	22:30:00	3.187	3.066	1.3	34.0	4.4	151.1	672.2
481	31/12/2010	23:00:00	2.965	2.976	1.2	37.0	4.5	165.4	739.1
482	31/12/2010	23:30:00	3.286	3.267	1.5	37.5	4.5	168.1	754.9
483	1/1/2011	0:00:00	3.216	3.232	1.4	39.7	4.5	179.1	807.9
484	1/1/2011	0:30:00	3.829	3.740	2.0	43.5	4.5	197.1	893.3
485	1/1/2011	1:00:00	3.665	3.655	1.9	51.1	4.6	232.8	1059.7
486	1/1/2011	1:30:00	3.885	3.752	2.0	57.7	4.6	263.7	1205.9
487	1/1/2011	2:00:00	3.597	3.621	1.8	58.2	4.6	267.3	1227.8
488	1/1/2011	2:30:00	3.598	3.518	1.8	57.4	4.6	264.9	1222.5
489	1/1/2011	3:00:00	3.446	3.334	1.6	53.5	4.6	248.0	1149.6
490	1/1/2011	3:30:00	2.366	2.374	0.6	50.2	4.7	233.8	1088.7
491	1/1/2011	4:00:00	2.140	2.075	0.3	32.4	4.7	151.5	708.3
492	1/1/2011	4:30:00	1.746	1.894	0.0	13.2	4.7	61.8	290.4
493	1/1/2011	5:00:00	2.226	2.266	0.4	4.9	4.7	23.2	109.2
494	1/1/2011	5:30:00	2.015	2.167	0.3	7.0	4.7	33.2	157.2
495	1/1/2011	6:00:00	2.005	2.091	0.2	11.1	4.8	52.6	250.4
496	1/1/2011	6:30:00	2.270	2.190	0.4	8.1	4.8	38.7	184.8
497	1/1/2011	7:00:00	2.207	2.185	0.4	10.2	4.8	48.8	234.6
498	1/1/2011	7:30:00	2.417	2.463	0.6	12.4	4.8	59.8	288.2
499	1/1/2011	8:00:00	2.676	2.522	0.8	15.5	4.8	75.3	364.7
500	1/1/2011	8:30:00	2.236	2.367	0.5	21.6	4.9	105.0	510.9

Continúa en la siguiente página



Tabla B.2 – Continuación de la página anterior

Muestra	Fecha	Hora	Lectura 1	Lectura 2	Promedio corregido	Ai	tmi (días)	Ai*tmi	Ai*tmi ²
501	1/1/2011	9:00:00	2.328	2.213	0.5	19.5	4.9	95.3	465.4
502	1/1/2011	9:30:00	2.712	2.632	0.9	14.6	4.9	71.5	350.9
503	1/1/2011	10:00:00	2.775	2.672	0.9	20.1	4.9	99.2	489.1
504	1/1/2011	10:30:00	3.069	2.993	1.2	26.9	4.9	133.3	659.4
505	1/1/2011	11:00:00	3.166	3.146	1.4	32.3	5.0	160.6	798.0
506	1/1/2011	11:30:00	2.898	2.869	1.1	38.8	5.0	193.6	966.2
507	1/1/2011	12:00:00	2.907	2.987	1.1	36.6	5.0	183.3	918.5
508	1/1/2011	12:30:00	2.437	2.347	0.6	33.5	5.0	168.3	847.0
509	1/1/2011	13:00:00	2.560	2.613	0.8	26.1	5.1	131.8	665.5
510	1/1/2011	13:30:00	2.166	2.247	0.4	20.7	5.1	104.9	532.2
511	1/1/2011	14:00:00	2.148	2.157	0.4	17.9	5.1	91.1	464.1
512	1/1/2011	14:30:00	2.407	2.391	0.6	11.4	5.1	58.2	297.8
513	1/1/2011	15:00:00	3.460	3.490	1.7	14.3	5.1	73.3	376.5
514	1/1/2011	15:30:00	3.783	3.832	2.0	34.1	5.2	175.9	907.5
515	1/1/2011	16:00:00	4.829	4.824	3.0	55.2	5.2	286.0	1480.7
516	1/1/2011	16:30:00	4.781	4.725	3.0	75.5	5.2	392.5	2040.7
517	1/1/2011	17:00:00	4.082	4.196	2.3	89.7	5.2	468.1	2442.8
518	1/1/2011	17:30:00	2.931	3.071	1.2	79.4	5.2	415.9	2178.9
519	1/1/2011	18:00:00	2.424	2.453	0.6	53.1	5.3	279.3	1468.8
520	1/1/2011	18:30:00	2.331	2.277	0.5	27.6	5.3	145.7	769.3
521	1/1/2011	19:00:00	2.176	2.242	0.4	17.1	5.3	90.9	481.7
522	1/1/2011	19:30:00	2.084	2.147	0.3	13.7	5.3	72.9	388.0
523	1/1/2011	20:00:00	2.050	2.156	0.3	10.9	5.3	58.1	310.3
524	1/1/2011	20:30:00	2.100	2.019	0.3	9.3	5.4	49.8	267.0
525	1/1/2011	21:00:00	1.947	2.097	0.2	8.4	5.4	45.4	244.7

Continúa en la siguiente página



Tabla B.2 – Continuación de la página anterior

Muestra	Fecha	Hora	Lectura 1	Lectura 2	Promedio corregido	Ai	tmi (días)	Ai*tmi	Ai*tmi ²
526	1/1/2011	21:30:00	1.883	1.790	0.0	7.2	5.4	39.0	211.1
527	1/1/2011	22:00:00	0.000	0.000	0.0	3.9	5.4	21.0	114.1
528	1/1/2011	22:30:00	1.983	1.883	0.1	0.5	5.4	3.0	16.2
529	1/1/2011	23:00:00	2.127	2.056	0.3	2.0	5.5	10.9	59.7
530	1/1/2011	23:30:00	2.222	2.309	0.5	6.4	5.5	35.0	192.0
531	2/1/2011	0:00:00	2.173	2.146	0.4	11.4	5.5	62.6	344.9
532	2/1/2011	0:30:00	2.343	2.474	0.6	12.4	5.5	68.4	378.5
533	2/1/2011	1:00:00	2.372	2.314	0.5	14.5	5.6	80.6	447.7
534	2/1/2011	1:30:00	2.148	2.005	0.3	17.3	5.6	96.3	536.4
535	2/1/2011	2:00:00	2.372	2.308	0.5	12.3	5.6	68.7	384.5
536	2/1/2011	2:30:00	2.305	2.284	0.5	12.2	5.6	68.8	386.2
537	2/1/2011	3:00:00	2.332	2.354	0.5	15.5	5.6	87.4	492.8
538	2/1/2011	3:30:00	2.456	2.513	0.7	15.6	5.7	88.0	497.9
539	2/1/2011	4:00:00	2.163	2.080	0.3	18.4	5.7	104.5	593.5
540	2/1/2011	4:30:00	2.067	1.949	0.2	15.1	5.7	86.0	489.7
541	2/1/2011	5:00:00	1.949	1.921	0.1	7.9	5.7	45.4	259.7
542	2/1/2011	5:30:00	1.976	1.980	0.2	5.1	5.7	29.5	169.4
543	2/1/2011	6:00:00	2.099	1.954	0.2	4.7	5.8	27.0	155.8
544	2/1/2011	6:30:00	2.318	2.418	0.6	6.1	5.8	35.1	202.8
545	2/1/2011	7:00:00	2.367	2.425	0.6	11.9	5.8	69.2	401.4
546	2/1/2011	7:30:00	2.525	2.442	0.7	17.5	5.8	101.7	592.0
547	2/1/2011	8:00:00	2.763	2.727	0.9	19.2	5.8	112.2	655.5
548	2/1/2011	8:30:00	2.995	2.936	1.2	24.4	5.9	143.3	840.3
549	2/1/2011	9:00:00	2.482	2.462	0.7	31.7	5.9	186.3	1096.7
550	2/1/2011	9:30:00	2.449	2.331	0.6	27.6	5.9	162.8	961.2

Continúa en la siguiente página



Tabla B.2 – Continuación de la página anterior

Muestra	Fecha	Hora	Lectura 1	Lectura 2	Promedio corregido	Ai	tmi (días)	Ai*tmi	Ai*tmi ²
551	2/1/2011	10:00:00	2.176	2.210	0.4	18.9	5.9	112.2	665.0
552	2/1/2011	10:30:00	2.089	2.168	0.3	14.7	5.9	87.7	521.5
553	2/1/2011	11:00:00	1.824	1.939	0.1	10.8	6.0	64.6	385.5
554	2/1/2011	11:30:00	2.420	2.327	0.6	6.2	6.0	36.8	220.5
555	2/1/2011	12:00:00	2.266	2.185	0.4	9.8	6.0	59.1	355.2
556	2/1/2011	12:30:00	2.446	2.448	0.6	15.0	6.0	90.4	545.0
557	2/1/2011	13:00:00	2.040	1.918	0.2	16.1	6.1	97.4	589.4
558	2/1/2011	13:30:00	2.195	2.166	0.4	12.4	6.1	75.2	456.7
559	2/1/2011	14:00:00	2.586	2.612	0.8	8.4	6.1	51.2	311.8
560	2/1/2011	14:30:00	2.690	2.700	0.9	17.7	6.1	108.2	661.8
561	2/1/2011	15:00:00	2.703	2.851	1.0	25.4	6.1	155.9	956.6
562	2/1/2011	16:00:00	1.532	1.462	0.0	28.1	6.2	172.9	1064.3
563	2/1/2011	17:00:00	1.469	1.402	0.0	29.3	6.2	180.9	1117.1
564	2/1/2011	18:00:00	1.519	1.413	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
565	2/1/2011	19:00:00	1.141	1.099	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
566	2/1/2011	20:00:00	1.260	1.169	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
567	2/1/2011	21:00:00	0.989	1.044	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
568	2/1/2011	22:00:00	1.184	1.028	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
569	2/1/2011	23:00:00	0.999	0.935	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
570	3/1/2011	0:00:00	0.749	0.833	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
571	3/1/2011	1:00:00	0.654	0.675	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
572	3/1/2011	2:00:00	0.658	0.673	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
573	3/1/2011	3:00:00	0.577	0.536	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
574	3/1/2011	4:00:00	0.604	0.518	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
575	3/1/2011	5:00:00	0.516	0.661	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Continúa en la siguiente página



Tabla B.2 – Continuación de la página anterior

Muestra	Fecha	Hora	Lectura 1	Lectura 2	Promedio corregido	Ai	tmi (días)	Ai*tmi	Ai*tmi ²
576	3/1/2011	6:00:00	0.426	0.558	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
577	3/1/2011	7:00:00	0.552	0.628	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
578	3/1/2011	8:00:00	0.712	0.821	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
579	3/1/2011	9:00:00	1.020	1.023	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
580	3/1/2011	10:00:00	0.740	0.786	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
581	3/1/2011	11:00:00	0.995	0.889	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
582	3/1/2011	12:00:00	0.830	0.883	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
583	3/1/2011	13:00:00	1.088	0.951	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
584	3/1/2011	14:00:00	1.398	1.395	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
585	3/1/2011	15:00:00	1.495	1.327	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
586	3/1/2011	16:00:00	2.122	2.215	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0
587	3/1/2011	17:00:00	2.116	2.182	0.3	11.1	7.2	79.5	572.2
588	3/1/2011	18:00:00	2.997	2.866	1.1	21.5	7.2	155.6	1124.9
589	3/1/2011	19:00:00	2.685	2.673	0.9	44.4	7.3	323.1	2350.4
590	3/1/2011	20:00:00	2.205	2.175	0.4	60.3	7.3	441.0	3224.4
591	3/1/2011	21:00:00	1.373	1.338	0.0	38.1	7.4	279.9	2057.5
592	3/1/2011	22:00:00	1.138	1.198	0.0	11.7	7.4	86.5	638.8
593	3/1/2011	23:00:00	1.088	1.079	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
594	4/1/2011	0:00:00	1.115	1.002	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
595	4/1/2011	1:00:00	1.107	1.139	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
596	4/1/2011	2:00:00	0.983	0.824	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
597	4/1/2011	3:00:00	0.871	0.799	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
598	4/1/2011	4:00:00	0.000	0.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
599	4/1/2011	5:00:00	0.835	0.712	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
600	4/1/2011	6:00:00	0.866	0.965	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Continúa en la siguiente página



Tabla B.2 – Continuación de la página anterior

Muestra	Fecha	Hora	Lectura 1	Lectura 2	Promedio corregido	Ai	tmi (días)	Ai*tmi	Ai*tmi ²
601	4/1/2011	7:00:00	0.853	0.982	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
602	4/1/2011	8:00:00	1.410	1.404	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
603	4/1/2011	9:00:00	1.634	1.719	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
604	4/1/2011	10:00:00	1.972	1.918	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
605	4/1/2011	11:00:00	2.106	2.008	0.3	4.3	7.9	34.6	274.5
606	4/1/2011	12:00:00	1.655	1.618	0.0	12.1	8.0	96.3	768.2
607	4/1/2011	13:00:00	0.832	0.855	0.0	7.7	8.0	61.8	495.2
608	4/1/2011	14:00:00	3.020	2.997	1.2	0.0	0.0	0.0	0.0
609	4/1/2011	15:00:00	4.048	3.909	2.2	36.3	8.1	294.1	2385.2
610	4/1/2011	16:00:00	3.483	3.357	1.6	101.6	8.1	827.9	6745.6
611	4/1/2011	17:00:00	3.797	3.859	2.0	114.0	8.2	932.9	7637.1
612	4/1/2011	18:00:00	3.140	3.228	1.4	109.4	8.2	900.7	7412.6
613	4/1/2011	19:00:00	2.476	2.317	0.6	102.4	8.3	846.5	6999.9
614	4/1/2011	20:00:00	1.791	1.705	0.0	59.4	8.3	493.7	4102.7
615	4/1/2011	21:00:00	1.387	1.274	0.0	17.9	8.3	149.4	1246.9
616	4/1/2011	22:00:00	1.175	1.223	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
617	4/1/2011	23:00:00	1.081	1.082	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
618	5/1/2011	0:00:00	1.059	1.003	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
619	5/1/2011	1:00:00	0.970	1.088	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
620	5/1/2011	2:00:00	1.097	0.988	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
621	5/1/2011	3:00:00	1.116	1.121	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
622	5/1/2011	4:00:00	1.084	1.101	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
623	5/1/2011	5:00:00	1.234	1.204	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
624	5/1/2011	6:00:00	1.235	1.308	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
625	5/1/2011	7:00:00	1.324	1.367	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Continúa en la siguiente página



Tabla B.2 – Continuación de la página anterior

Muestra	Fecha	Hora	Lectura 1	Lectura 2	Promedio corregido	Ai	tmi (días)	Ai*tmi	Ai*tmi ²
626	5/1/2011	8:00:00	1.821	1.771	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
627	5/1/2011	9:00:00	1.990	1.892	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
628	5/1/2011	10:00:00	1.638	1.609	0.0	4.2	8.9	37.7	335.3
629	5/1/2011	11:00:00	1.444	1.508	0.0	4.2	8.9	37.8	337.4
630	5/1/2011	12:00:00	1.345	1.346	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
631	5/1/2011	13:00:00	1.062	1.030	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
632	5/1/2011	14:00:00	1.504	1.641	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
633	5/1/2011	15:00:00	1.404	1.413	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
634	5/1/2011	16:00:00	1.791	1.742	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
635	5/1/2011	17:00:00	1.597	1.629	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
636	5/1/2011	18:00:00	1.280	1.214	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
637	5/1/2011	19:00:00	1.276	1.240	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
638	5/1/2011	20:00:00	1.152	1.103	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
639	5/1/2011	21:00:00	1.180	1.217	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
640	5/1/2011	22:00:00	1.162	1.282	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
641	5/1/2011	23:00:00	1.183	1.198	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
642	6/1/2011	0:00:00	1.065	1.083	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
643	6/1/2011	1:00:00	0.898	0.883	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
644	6/1/2011	2:00:00	0.768	0.641	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
645	6/1/2011	3:00:00	0.660	0.562	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
646	6/1/2011	4:00:00	0.898	0.937	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
647	6/1/2011	5:00:00	1.005	0.906	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
648	6/1/2011	6:00:00	0.967	1.306	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
649	6/1/2011	7:00:00	1.204	1.199	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
650	6/1/2011	8:00:00	1.278	1.246	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Continúa en la siguiente página



Tabla B.2 – Continuación de la página anterior

Muestra	Fecha	Hora	Lectura 1	Lectura 2	Promedio corregido	Ai	tmi (días)	Ai*tmi	Ai*tmi ²
651	6/1/2011	9:00:00	1.340	1.385	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
652	6/1/2011	10:00:00	1.042	1.110	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
653	6/1/2011	11:00:00	1.216	1.275	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
654	6/1/2011	12:00:00	0.937	0.877	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
655	6/1/2011	13:00:00	0.944	1.068	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
656	6/1/2011	14:00:00	1.213	1.336	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
657	6/1/2011	15:00:00	1.098	0.945	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
658	6/1/2011	16:00:00	0.794	0.761	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
659	6/1/2011	17:00:00	0.770	0.727	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
660	6/1/2011	18:00:00	0.681	0.797	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
661	6/1/2011	19:00:00	1.229	1.371	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
662	6/1/2011	20:00:00	1.087	1.108	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
663	6/1/2011	21:00:00	0.940	0.895	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
664	6/1/2011	22:00:00	1.073	0.979	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
665	6/1/2011	23:00:00	0.958	1.049	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
666	7/1/2011	0:00:00	0.932	1.049	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
667	7/1/2011	1:00:00	1.235	1.211	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
668	7/1/2011	2:00:00	1.199	1.035	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
669	7/1/2011	3:00:00	1.255	1.352	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
670	7/1/2011	4:00:00	1.135	1.148	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
671	7/1/2011	5:00:00	1.113	1.039	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
672	7/1/2011	6:00:00	0.967	0.954	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
673	7/1/2011	7:00:00	1.479	1.648	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
674	7/1/2011	8:00:00	1.527	1.506	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
675	7/1/2011	9:00:00	1.286	1.395	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Continúa en la siguiente página



Tabla B.2 – Continuación de la página anterior

Muestra	Fecha	Hora	Lectura 1	Lectura 2	Promedio corregido	Ai	tmi (días)	Ai*tmi	Ai*tmi ²
676	7/1/2011	10:00:00	1.340	1.404	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
677	7/1/2011	11:00:00	1.403	1.412	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
678	7/1/2011	12:00:00	1.219	1.162	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
679	7/1/2011	13:00:00	1.248	1.154	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
680	7/1/2011	14:00:00	1.694	1.660	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
681	7/1/2011	15:00:00	1.533	1.473	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
682	7/1/2011	16:00:00	1.739	1.739	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
683	7/1/2011	17:00:00	1.806	1.846	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
684	7/1/2011	18:00:00	1.495	1.520	0.0	0.8	11.2	8.8	98.5
685	7/1/2011	19:00:00	1.516	1.585	0.0	0.8	11.3	8.8	99.0
686	7/1/2011	20:00:00	1.507	1.444	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
687	7/1/2011	21:00:00	1.411	1.514	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
688	7/1/2011	22:00:00	1.274	1.140	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
689	7/1/2011	23:00:00	1.226	1.392	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
690	8/1/2011	0:00:00	1.499	1.486	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
691	8/1/2011	1:00:00	1.213	1.285	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
692	8/1/2011	2:00:00	1.264	1.305	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
693	8/1/2011	3:00:00	1.389	1.411	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
694	8/1/2011	4:00:00	1.251	1.234	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
695	8/1/2011	5:00:00	1.237	1.233	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
696	8/1/2011	6:00:00	1.214	1.269	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
697	8/1/2011	7:00:00	1.768	1.633	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
698	8/1/2011	8:00:00	1.768	1.744	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
699	8/1/2011	9:00:00	1.999	1.926	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0
700	8/1/2011	10:00:00	1.853	1.845	0.0	4.9	11.9	58.0	690.7

Continúa en la siguiente página



Tabla B.2 – Continuación de la página anterior

Muestra	Fecha	Hora	Lectura 1	Lectura 2	Promedio corregido	Ai	tmi (días)	Ai*tmi	Ai*tmi ²
701	8/1/2011	11:00:00	1.835	1.739	0.0	6.3	11.9	75.7	903.6
702	8/1/2011	12:00:00	1.789	1.856	0.0	1.5	12.0	17.6	210.7
703	8/1/2011	13:00:00	1.493	1.395	0.0	0.7	12.0	8.1	97.7
704	8/1/2011	14:00:00	2.853	2.841	1.0	0.7	12.1	8.1	98.1
705	8/1/2011	15:00:00	1.800	1.856	0.0	31.4	12.1	380.4	4607.2
706	8/1/2011	16:00:00	1.416	1.476	0.0	32.3	12.1	391.5	4752.4
707	8/1/2011	17:00:00	1.440	1.597	0.0	0.8	12.2	10.2	124.6
708	8/1/2011	18:00:00	1.595	1.490	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
709	8/1/2011	19:00:00	1.256	1.238	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
710	8/1/2011	20:00:00	1.311	1.270	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
711	8/1/2011	21:00:00	1.381	1.295	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
712	8/1/2011	22:00:00	1.562	1.566	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
713	8/1/2011	23:00:00	1.322	1.360	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
714	9/1/2011	0:00:00	1.761	1.754	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
715	9/1/2011	1:00:00	1.762	1.705	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
716	9/1/2011	2:00:00	1.266	1.393	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
717	9/1/2011	3:00:00	1.396	1.228	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
718	9/1/2011	4:00:00	1.580	1.499	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
719	9/1/2011	5:00:00	1.928	1.839	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
720	9/1/2011	6:00:00	1.526	1.576	0.0	2.5	12.7	31.9	406.3
721	9/1/2011	7:00:00	1.676	1.641	0.0	2.5	12.8	32.0	408.1
722	9/1/2011	8:00:00	1.834	1.926	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
723	9/1/2011	9:00:00	2.264	2.172	0.4	2.4	12.9	30.9	397.0
724	9/1/2011	10:00:00	2.996	2.973	1.2	14.9	12.9	192.7	2486.4
725	9/1/2011	11:00:00	1.857	1.800	0.0	48.1	12.9	622.1	8050.9

Continúa en la siguiente página



Tabla B.2 – Continuación de la página anterior

Muestra	Fecha	Hora	Lectura 1	Lectura 2	Promedio corregido	Ai	tmi (días)	Ai*tmi	Ai*tmi ²
726	9/1/2011	12:30:00	1.463	1.480	0.0	36.4	13.0	472.1	6124.0
727	9/1/2011	14:00:00	1.213	1.119	0.0	1.3	13.0	16.7	217.2
728	9/1/2011	15:30:00	1.219	1.221	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
729	9/1/2011	17:00:00	0.980	0.953	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
730	9/1/2011	18:30:00	0.854	0.810	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
731	9/1/2011	20:00:00	1.279	1.248	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
732	9/1/2011	21:30:00	1.211	1.117	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
733	9/1/2011	23:00:00	1.032	1.099	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
734	10/1/2011	0:30:00	1.309	1.268	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
735	10/1/2011	2:00:00	1.204	1.178	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
736	10/1/2011	3:30:00	1.273	1.300	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
737	10/1/2011	5:00:00	1.213	1.216	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
738	10/1/2011	6:30:00	1.337	1.308	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
739	10/1/2011	8:00:00	1.631	1.659	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
740	10/1/2011	9:30:00	1.574	1.484	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
741	10/1/2011	11:00:00	1.335	1.245	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
742	10/1/2011	12:30:00	0.000	0.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
743	10/1/2011	14:00:00	1.111	1.209	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
744	10/1/2011	15:30:00	1.483	1.326	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
745	10/1/2011	17:00:00	0.943	1.007	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
746	10/1/2011	18:30:00	1.040	1.071	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
747	10/1/2011	20:00:00	1.218	1.149	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
748	10/1/2011	21:30:00	1.152	1.172	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
749	10/1/2011	23:00:00	1.653	1.715	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
750	11/1/2011	0:30:00	1.415	1.570	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Continúa en la siguiente página



Tabla B.2 – Continuación de la página anterior

Muestra	Fecha	Hora	Lectura 1	Lectura 2	Promedio corregido	Ai	tmi (días)	Ai*tmi	Ai*tmi ²
751	11/1/2011	2:00:00	1.363	1.448	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
752	11/1/2011	3:30:00	1.592	1.623	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
753	11/1/2011	5:00:00	1.851	1.754	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
754	11/1/2011	6:30:00	1.753	1.686	0.0	0.1	14.7	1.7	24.4
755	11/1/2011	8:00:00	1.933	1.993	0.2	0.1	14.8	1.7	24.5
756	11/1/2011	9:30:00	1.677	1.796	0.0	7.3	14.9	109.0	1618.4
757	11/1/2011	11:00:00	1.460	1.498	0.0	7.3	14.9	109.3	1627.5
758	11/1/2011	12:30:00	1.511	1.481	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
759	11/1/2011	14:00:00	1.601	1.572	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
760	11/1/2011	15:30:00	1.748	1.632	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
761	11/1/2011	17:00:00	1.420	1.453	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
762	11/1/2011	18:30:00	1.348	1.270	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
763	11/1/2011	20:00:00	1.515	1.653	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
764	11/1/2011	21:30:00	1.818	1.811	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
765	11/1/2011	23:00:00	1.850	1.819	0.0	0.7	15.4	10.1	155.1
766	12/1/2011	0:30:00	1.964	1.914	0.1	2.2	15.5	34.1	527.9
767	12/1/2011	2:00:00	2.229	2.217	0.4	7.8	15.5	121.3	1884.8
768	12/1/2011	3:30:00	2.204	2.135	0.4	25.3	15.6	394.5	6153.8
769	12/1/2011	5:00:00	2.184	2.206	0.4	35.7	15.7	558.3	8740.7
770	12/1/2011	6:30:00	2.065	2.068	0.3	34.4	15.7	540.8	8500.5
771	12/1/2011	8:00:00	2.305	2.225	0.5	29.8	15.8	469.7	7411.6
772	12/1/2011	9:30:00	2.339	2.311	0.5	32.9	15.8	521.6	8266.0

Tabla B.2: Prueba de trazadores Facultativa 1