

**MODELO MATEMATICO PARA LA DETERMINACION DE
ASENTAMIENTOS EN RELLENOS SANITARIOS.**

CLAUDIA EUGENIA ZAMBRANO VIVAS

**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL Y AMBIENTAL
BOGOTA, D.C. 2003**

**MODELO MATEMATICO PARA LA DETERMINACION DE
ASENTAMIENTOS EN RELLENOS SANITARIOS.**

CLAUDIA EUGENIA ZAMBRANO VIVAS

ASESOR: Dr. BERNARDO CAICEDO

**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL Y AMBIENTAL
BOGOTA, D.C. 2003**

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCION	1
1.1 ASPECTOS GENERALES	1
1.2 OBJETIVO GENERAL	2
1.3 OBJETIVOS ESPECIFICOS	2
1.4 ALCANCE	2
2. DESCRIPCION DEL MODELO NUMERICO	4
2.1 ASPECTOS GENERALES	4
2.2 HIPOTESIS	5
2.3 DESCRIPCION MICROSCOPICA DE LOS RSM	7
2.4 RELACIONES FENOMENOLOGICAS PARA EL MODELO BIOQUIMICO	9
2.5 RELACIONES FENOMENOLOGICAS PARA EL MODELO DE FLUJO	11
2.5.1 LEYES DE FLUJO	12
2.5.2 RELACIONES ENTRE FASES	12
2.5.3 LEYES QUE CONSTITUYEN LAS FASES	13
2.5.4 LEYES DE LOS GASES PERFECTOS	14
2.6 LEYES DE CONSERVACION	15
2.7 DERIVACION DEL COMPORTAMIENTO DE LAS ECUACIONES	15
2.8 SOLUCION NUMERICA METODO DIFERENCIAS FINITAS	18
2.9 CONDICIONES DE FRONTERA	20
2.10 DATOS DE ENTRADA	22
2.10.1 DATOS GENERALES	22
2.10.2 DATOS HIDRAULICOS	23
2.10.3 DATOS GEOMETRICOS	23
2.10.4 DATOS PARA EL TIEMPO	23
3 EJECUCION DEL MODELO NUMERICO	24
3.1 DATOS DE ENTRADA	24
3.2 EJECUCION DEL PROGRAMA	24
3.3 ANALISIS DE RESULTADOS	25
3.4 CODIFICACION DEL PROGRAMA	25
4 ANALISIS DE RESULTADOS	41
5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	43
5.1 CONCLUSIONES	43
5.2 RECOMENDACIONES	43
6 BIBLIOGRAFIA	45

ANEXOS

DATOS GENERALES	47
DATOS HIDRAULICOS	48
DATOS DE TIEMPO	49
FIGURA No. 1 ZONA II SIMULADA	52
FIGURA No. 2 PRESION DE LIXIVIADOS	53
FIGURA No. 3 PRESION DE GAS	54
FIGURA No. 4 PRESIONES A 1 AÑO	55
FIGURA No. 5 PRESIONES A 15 m Vs. PROFUNDIDAD	56
FIGURA No. 6 PRESIONES A 15 m Vs. PROFUNDIDAD	57
FIGURA No. 7 PRESIONES A 32 m Vs. PROFUNDIDAD	58
FIGURA No. 8 PRESIONES A 32 m Vs. PROFUNDIDAD	59
FIGURA No. 9 PRESIONES A 60 m Vs. PROFUNDIDAD	60
FIGURA No. 10 PRESIONES A 60 m Vs. PROFUNDIDAD	61
FIGURA No. 11 DIAGRAMA DE PRESION LIXIVIADOS	62
FIGURA No. 12 DIAGRAMA DE PRESION GASES	63
FIGURA No. 13 VARIACION MATERIA ORGANICA	64
FIGURA No. 14 MATERIA ORGANICA Vs. ASENTAMIENTO	65
FIGURA No. 15 MATERIA ORGANICA Vs. HUMEDAD	66
FIGURA No. 16 HUMEDAD Vs. ASENTAMIENTO	67
FIGURA No. 17 VARIACION DE FASES	68
FIGURA No. 18 PERMEABILIDAD Vs. SATURACION	69
FIGURA No. 19 PERMEABILIDAD Vs. SATURACION	70

1. INTRODUCCIÓN

1.1. ASPECTOS GENERALES

Debido a la gran heterogeneidad de los residuos sólidos en características como la estructura y otras propiedades que se ven influenciadas por factores externos de acuerdo a los lugares donde se producen, no es posible analizarlos de manera real utilizando formas o modelos matemáticos deducidos de suelos con características y problemas muy diferentes, sin embargo si podemos aprovechar algunas similitudes para obtener fórmulas matemáticas más aproximadas a las condiciones reales de dichos residuos.

Solo hasta hoy se ha dado la importancia requerida a los rellenos sanitarios y por lo tanto los Ingenieros Civiles no debemos ser ajenos al problema de las basuras; casos como el de la Ciudad de Bogotá D.C. ocurrido el 27 de Septiembre de 1997 en el relleno sanitario Doña Juana, donde se deslizaron en la zona II cerca de 800.000 m³ de residuos sólidos urbanos que habían sido allí dispuestos, afectando de manera negativa a la comunidad; un estudio realizado arroja que algunos causales técnicos que generaron dicha situación fueron: La acumulación de lixiviados generados por descomposición de material dispuesto debido al mal funcionamiento del drenaje, al igual que la acumulación de gases variando así las presiones internas y modificando la relación de vacíos; el incremento de estas condiciones conduce a la inestabilidad del relleno.

En la actualidad se generan cerca de 5.000 Ton/día de residuos sólidos, los cuales deben tener un sitio especial para su disposición, es de anotar que el incremento de esta cifra es alarmante debido a que el nivel de educación de las personas no

permite predecir que la tasa de generación de basura en nuestra sociedad tienda a disminuir.

1.2. OBJETIVO GENERAL

El propósito de este proyecto de investigación es continuar con el planteamiento del modelo matemático desarrollado para el relleno sanitario Doña Juana, que permita determinar los asentamientos a partir de la variación de vacíos generado por la extracción de gases y lixiviados o de cambios ocurridos por procesos de bioconsolidación.

1.3. OBJETIVOS ESPECIFICOS

Para satisfacer el objetivo general es necesario cumplir con los siguientes objetivos específicos:

- Analizar la variación en la densidad de vacíos debido al comportamiento de los gases y lixiviados en el interior del relleno sanitario.
- Calibrar el modelo matemático con datos obtenidos del relleno sanitario de Doña Juana, en el área conocida como La Mansión.

1.4. ALCANCE

Este proyecto de investigación concluye al entregar un modelo numérico donde se presenta el flujo de lixiviado y gas adaptado al cálculo de asentamientos en rellenos sanitarios.

No se pretende lograr un modelo definitivo sino continuar con el camino de investigación que llevará a un fortalecimiento del calculo de asentamientos en rellenos sanitarios a través de un proceso de retroalimentación que involucra a futuros investigadores.

2. DESCRIPCION DEL MODELO NUMERICO

2.1. ASPECTOS GENERALES

La generación de lixiviados y gases en rellenos sanitarios son procesos que se encuentran íntimamente relacionados, al igual que estos influyen de manera directa los asentamientos que se generan en los rellenos.

El proceso de generación de lixiviados y gases son principalmente dominados por el proceso de descomposición de la fracción orgánica biodegradable de los residuos sólidos dispuestos en un relleno sanitario.

Este proceso inicia con los microorganismos presentes en los residuos dispuestos en el relleno, los cuales consumen rápidamente el oxígeno que se encuentra atrapado en los vacíos, logrando así un ambiente anaeróbico. La descomposición de la materia orgánica es llevada a cabo por la fermentación causada por los microorganismos.

Estos microorganismos degradan la materia orgánica disolviendo las partículas, formando grandes cantidades de ácidos orgánicos como el ácido acético y desprendiendo sustancias como el amoníaco. Esta fase es llamada acidogénesis o etapa de fermentación.

La mayor parte de los ácidos orgánicos escapan en los lixiviados, los cuales traen consigo mal olor y un gran poder contaminante. La materia orgánica que sale con los lixiviados no está disponible para la generación de gas en el relleno.

La generación de ácidos, al lado de la tubería de salida de los lixiviados son también usados por otros microorganismos presentes en los residuos productores de gas. Estos microorganismos llamados metanogénicos, son los principales productores de gas metano, los cuales infortunadamente rara vez se encuentran

en el origen de los residuos sólidos. Debido a lo anterior, la producción de gas es lenta al comienzo, mientras que la población natural de los microorganismos metanogénicos se incrementa. Primero se presenta una interrupción entre los microorganismos productores de ácido y los microorganismos consumidores de ácido, así los microorganismos consumidores de ácido crecen y se incrementa su población, incrementándose considerablemente la tasa de producción de gas. Simultáneamente la concentración de ácido en el lixiviado disminuye. La velocidad de crecimiento de los microorganismos metanogénicos es algo baja y difiere en cada situación. Generalmente la producción de gas alcanza grandes volúmenes transcurridos varios años después de ser dispuestos los residuos.

En la formación de lixiviados es importante considerar que estos presentan dos (2) orígenes: Uno biológico el cual está asociado con la descomposición dentro del relleno de los residuos y otro hidrológico asociado con la cantidad de agua infiltrada en las capas del relleno sanitario.

En esta investigación se presenta un modelo acoplado a dos procesos: Descomposición de la materia orgánica y migración de lixiviado y gas utilizando la teoría para suelos parcialmente saturados. Varias variables serán tenidas en cuenta, como el grado de saturación y las leyes de deformación del material de acuerdo a la presión aplicada.

2.2. HIPOTESIS

El Comportamiento del modelo matemático del relleno sanitario consiste principalmente en el funcionamiento de dos (2) modelos: un modelo bioquímico para la generación de lixiviado y biogás y un modelo de flujo de agua y gas en un medio poroso deformable parcialmente saturado.

Las hipótesis para el modelo bioquímico también como para el modelo de flujo parcialmente saturado son las siguientes:

MODELO BIOQUIMICO

1. La masa de los residuos sólidos es especialmente homogénea para residuos del mismo año.
2. La descomposición de los desechos orgánicos en el relleno sanitario esta acoplado a dos (2) etapas: una de fermentación y otra de formación de metano.
3. La cinética de descomposición es de primer orden con respecto al limite del sustrato, relativo a lo sólidos volátiles biodegradables y los ácidos orgánicos.
4. La tasa de crecimiento de la población de los microorganismos en el relleno esta dada de acuerdo con la teoría clásica de la termodinámica y la cinética.
5. El escape de agua dentro del relleno no suministra amoniaco.

MODELO DE FLUJO

6. El material es considerado localmente homogéneo.
7. El agua, el gas y el medio poroso están en equilibrio termodinámico todo el tiempo.
8. La migración del agua es posible solamente en la fase liquida y es controlada por una ley similar a la ley de Darcy.

9. La migración del gas es controlada por la ley de Fick.
10. La razón entre la saturación y succión es única para el mismo suelo.
11. El transporte de difusión y dispersión no se tiene en cuenta.
12. La presión total en el suelo es controlado por la teoría de la elasticidad.
13. La deformación horizontal es cero.
14. Condiciones isotérmicas son aplicadas.

2.3. DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES

Los residuos sólidos municipales consisten principalmente en residuos inertes, residuos biodegradables, lixiviados y gas. Cada fase puede ser definida por su contenido volumétrico, θ_1 , θ_2 y θ_3 . La sumatoria de estas tres (3) fases tienen la equivalencia a uno (1); $\sum \theta_i = 1$. Donde cada fase está formada por diferentes componentes.

FASE SÓLIDA: La fase sólida está compuesta por tres (3) componentes: Sólidos inertes.

$\theta_{1,1}$ = Sólidos biodegradables.

$\theta_{1,2}$ = Microorganismos.

Se tiene que los microorganismos se encuentran divididos en dos (2) grupos.

$\theta_{1,3}$ = Microorganismos formadores de ácidos.

$\theta_{1,4}$ = Microorganismos metanogénicos.

La sumatoria de estos componentes equivalen al volumen de la fase sólida

$$\theta_1 = \sum \theta_{1,j}$$

FASE LIQUIDA: La fase liquida esta compuesta por tres (3) componentes:

$$\theta_{2,1} = \text{Agua.}$$

$$\theta_{2,2} = \text{Ácidos grasos.}$$

$$\theta_{2,3} = \text{Amoniaco.}$$

La sumatoria de estos tres (3) componentes equivale al volumen de la fase liquida

$$\theta_2 = \sum \theta_{2,j}$$

FASE GASEOSA: La fase gaseosa esta compuesta por tres (3) componentes:

$$\theta_{3,1} = \text{Aire}$$

$$\theta_{3,2} = \text{Metano CH}_4$$

$$\theta_{3,3} = \text{Dioxido de Carbono CO}_2$$

La sumatoria de estos tres (3) componentes equivale al volumen de la fase

$$\text{gaseosa } \theta_3 = \sum \theta_{3,j}$$

Se tiene que la porosidad (n) esta definida como $n = (1 - \theta_1)$ y la saturación (S_r)

$$\text{esta definida como } S_r = \frac{q_2}{1 - q_1}$$

Análogamente es posible definir la masa de cada fase como W_i y la masa de cada componente como $W_{i,j}$, donde los subíndices i,j corresponden a las definiciones anteriormente descritas.

La concentración del componente j en la fase i esta definida como: $C_{i,j} = \frac{W_{i,j}}{w_i}$

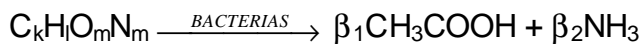
La densidad de cada fase y cada componente es definido como ρ_i y $\rho_{i,j}$ respectivamente. La densidad de cada fase esta dado por:

$\sum_{j=1}^M C_{i,j} * \rho_{i,j}$ donde M representa el número de componentes en cada fase.

2.4. RELACIONES FENOMENOLOGICAS PARA EL MODELO BIOQUIMICO

Las ecuaciones químicas que representan las dos etapas de descomposición de los residuos orgánicos en los rellenos sanitarios son los siguientes:

REACCION DE ACIDOGENESIS



Donde los coeficientes β_1 y β_2 dependen de los valores de k , l , m y n , los cuales dependen de la composición de los residuos sólidos.

REACCION DE METANOGENESIS



Los valores para β_3 y β_4 se obtienen de las reacciones estequimétricas considerando las ecuaciones químicas de la descomposición.

Considerando un elemento de volumen de residuos sólidos en el que no ocurra flujo de lixiviado y gas, el tiempo de evolución de cada uno de los diez (10)

componentes de los residuos sólidos puede ser expresada con las siguientes ecuaciones fenomenológicas:

1. El cambio de masa de los residuos sólidos inertes puede ser despreciable.

$$W_{1,1} = 0$$
2. El cambio de la masa de los sólidos biodegradables es proporcional a su propia masa y a la cantidad de microorganismos formadores de ácido.

$$W_{1,2} = -K_1 * W_{1,2} * W_{1,3}$$
3. El cambio de masa de los microorganismos formadores de ácido es proporcional a la cantidad de microorganismos de este tipo y a la masa de sólidos biodegradables. $W_{1,3} = Y_1 * K_1 * W_{1,3} * W_{1,2}$
4. El cambio de masa de los microorganismos metanogénicos es proporcional a la cantidad de microorganismos del mismo tipo y a la masa de los ácidos grasos. $W_{1,4} = Y_2 * K_2 * W_{2,2} * W_{1,4}$
5. El cambio de masa del agua es inversamente proporcional al crecimiento de los microorganismos. $W_{2,1} = -Y_3 * W_{1,3} - Y_4 * W_{1,4}$
6. Los ácidos grasos son producidos por los microorganismos formadores de ácido pero son consumidos por los microorganismos metanogénicos, lo que es expresado como: $W_{2,2} = \beta_1 * K_1 * W_{1,2} * W_{1,3} - K_2 * W_{2,2} * W_{1,4}$
7. El cambio de masa del amoníaco es proporcional a la masa de los sólidos biodegradables y a la cantidad de microorganismos formadores de ácido.

$$W_{2,3} = \beta_2 * K_1 * W_{1,2} * W_{1,3}$$

8. El cambio de masa del aire dentro de un volumen cerrado es despreciable, debido a que este modelo esta principalmente enfocado a la descomposición anaerobia. $W_{3,1} = 0$

9. La producción de gas metano y dioxido de carbono es proporcional a la masa de ácidos grasos y a la cantidad de microorganismos metanogenicos.

$$W_{3,2} = \beta_2 * K_2 * W_{2,2} * W_{1,4}$$

$$W_{3,3} = \beta_4 * K_2 * W_{2,2} * W_{1,4}$$

Donde $W_{i,j}$ representa la masa de los componentes de cada fase, K_i representa la tasa de consumo del sustrato, Y_i representa la tasa de producción de los microorganismos y β_i son los coeficientes estequiometricos.

10. En condiciones aisladas, donde no hay flujo dentro de los limites de los elementos cuyo volumen esta siendo considerado, el incremento de la masa equivale a cero: $W_{i,j} = 0$

2.5. RELACIONES FENOMENOLOGICAS PARA EL MODELO DE FLUJO DE LIXIVIADO Y GAS

El modelo de flujo de lixiviado y gas esta basado en el modelo de consolidación para suelos parcialmente saturados propuesto por Fredlund (1984). Las relaciones fenomenologicas utilizadas en este modelo son las siguientes:

2.5.1 LEYES DE FLUJO

En este modelo se asume que los componentes de los fluidos pueden ser mixtos, al ley de Darcy puede ser usada para la fase liquida y la ley de Fick para la fase gaseosa:

$$V_i = -K_i * S_r * \nabla h_i \quad i = 2,3$$

Donde V_i representa la velocidad de cada fase, S_r es el grado de saturación, donde h_i la potencia de cada una de las fases, la cual esta dado por:

$$h_2 = Z + \frac{m_2}{g * r_2}; \quad h_3 = \frac{m_3}{g * r_3}$$

Donde Z es la altura respecto a un nivel arbitrario, μ_i y ρ_i representan la presión y la densidad de cada una de las fases.

2.5.2 RELACIONES ENTRE FASES

La relación fenomenologica usada para el cálculo de presión y grado de saturación fue propuesto por Gardner (1958)

$$S_r = \frac{a}{a + |m_2 - m_3|^b}; \quad \mu_2 - \mu_3 < 0$$

Donde a y b son coeficientes que dependen del tipo de material.

2.5.3 LEYES QUE CONSTITUYEN LAS FASES

El modelo que se presenta utiliza las leyes propuestas por Fredlund (1984). Para el cálculo de la deformación de la fase sólida se utiliza la siguientes ecuación:

$$\varepsilon = m_1^s d(\gamma_2 - \mu_3) + m_2^s d(\mu_3 - \mu_2) + m_3^s dW_3$$

Donde m_1^s es la compresibilidad de la fase sólida cuando $d(\mu_3 - \mu_2)$ equivale a cero; m_2^s es la compresibilidad de la estructura del suelo cuando $d(\gamma_2 - \mu_3)$ equivale a cero; γ_2 representa la presión total vertical y m_3^s representa la compresibilidad de la estructura cuando ocurra un cambio en la masa sólida.

De la misma forma, la ley que constituye la fase líquida se define como:

$$d\theta_2 = m_1^w d(\gamma_2 - \mu_3) + m_2^w d(\mu_3 - \mu_2)$$

Donde m_1^w es la inclinación de la curva de la variación de la humedad volumétrica respecto a $d(\gamma_2 - \mu_3)$ y m_2^w es la inclinación de la curva de la variación de la humedad volumétrica respecto a $d(\mu_3 - \mu_2)$.

Finalmente se tiene que el comportamiento del gas esta definido por la siguiente ecuación:

$$d\theta_3 = m_1^a d(\gamma_2 - \mu_3) + m_2^a d(\mu_3 - \mu_2)$$

Donde m_1^a es la inclinación de la curva de la variación del volumen del gas respecto a $d(\gamma_2 - \mu_3)$ y $+ m_2^a$ es la inclinación de la curva de la variación del volumen del gas con respecto a $d(\mu_3 - \mu_2)$

2.5.4 LEYES DE LOS GASES PERFECTOS

La ley de los gases perfectos relativo a la densidad del gas, a la presión y a la temperatura se define como:

$$\rho_3 = \frac{w * P}{R * T * g}$$

Donde ρ_3 representa la densidad de la fase gaseosa, w el peso promedio molecular de la fase gaseosa, R es la constante universal de los gases perfectos, T es la temperatura absoluta y P es la presión absoluta del gas, la cual se define como:

$$P = \mu_3 + \mu_{atm}$$

Donde μ_{atm} es la presión atmosférica.

2.6. LEYES DE CONSERVACION

En el modelo que se presenta no se tienen en cuenta los efectos de difusión y dispersión, por lo que la ley de la conservación se puede definir de la siguiente manera: (J. Bear 1984)

$$\frac{d(\mathbf{r}_i * \mathbf{q}_i)}{dt} = \sum_{j=1}^M W_{ij} + \nabla \mathbf{r}_i * V_i$$

Donde $i = 1 \dots 3$ y $j = 1 \dots M$

2.7. DERIVACION DEL COMPORTAMIENTO DE LAS ECUACIONES

En esta investigación se considera inicialmente el proceso de la consolidación en el relleno sanitario en dos dimensiones. Asumiendo que la variación de la presión total vertical γ_z según el tiempo es cero o se tiene un valor conocido. Bajo las anteriores condiciones es posible resolver acoplando las ecuaciones para las fases líquidas y gaseosas e independientemente la ecuación para la fase sólida.

Los componentes que constituyen la fase líquida o los lixiviados tienen densidades cercanas a las del agua, las cuales se encuentran en concentraciones bajas (mg/l). Debido a lo anterior se tiene que el valor de la densidad del lixiviado es constante e igual a la densidad del agua.

En el caso del peso molecular del gas de cada componente, se tiene que este es diferente y se considera la variación de la densidad de la fase gaseosa de acuerdo a la concentración de cada componente.

Las ecuaciones acopladas para la fase líquida, la fase gaseosa y cada uno de los componentes se define como:

$$[A] \frac{\partial}{\partial t} [U] = \frac{\partial}{\partial t} [W] + [G] - [F] \frac{\partial \mathbf{s}z}{\partial t}$$

Donde cada una de las matrices tiene los siguientes valores:

$$[A] = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} \\ C_{31}a_{21} & C_{31}a_{22} & a_{33} & C_{31}a_{24} & C_{31}a_{25} \\ C_{32}a_{21} & C_{32}a_{22} & C_{32}a_{23} & a_{44} & C_{32}a_{25} \\ C_{33}a_{21} & C_{33}a_{22} & C_{33}a_{23} & C_{33}a_{24} & a_{55} \end{bmatrix}$$

Donde:

$$a_{11} = -\rho_2 m_2^w$$

$$a_{12} = \rho_2 (m_2^w - m_1^w)$$

$$a_{21} = -\rho_3 m_2^a$$

$$a_{22} = \frac{q_3}{RTg} (m_{31}C_{31} + M_{32}C_{32} + m_{33}C_{33}) - \rho_3 m_1^a + \rho_3 m_2^a$$

$$a_{23} = \frac{q_3}{RTg} m_{31} (\mu_3 + \mu_{atm})$$

$$a_{24} = \frac{q_3}{RTg} m_{32} (\mu_3 + \mu_{atm})$$

$$a_{25} = \frac{q_3}{RTg} m_{33} (\mu_3 + \mu_{atm})$$

$$a_{33} = \rho_3 \theta_3 + C_{31} a_{23}$$

$$a_{44} = \rho_3 \theta_3 + C_{32} a_{23}$$

$$a_{55} = \rho_3 \theta_3 + C_{33} a_{23}$$

$$[U] = \begin{bmatrix} u_2 \\ u_3 \\ C_{31} \\ C_{32} \\ C_{33} \end{bmatrix}$$

$$[W] = \begin{bmatrix} w_2 \\ w_3 \\ w_{31} \\ w_{32} \\ w_{33} \end{bmatrix}$$

$$[G] = \begin{bmatrix} \nabla \mathbf{r}_2 V_2 \\ \nabla \mathbf{r}_3 V_3 \\ \nabla \mathbf{r}_3 C_{31} V_3 \\ \nabla \mathbf{r}_3 C_{32} V_3 \\ \nabla \mathbf{r}_3 C_{33} V_3 \end{bmatrix}$$

$$[F] = \begin{bmatrix} \mathbf{r}_2 m_1^w \\ \mathbf{r}_3 m_1^a \\ \mathbf{r}_3 C_{31} m_1^a \\ \mathbf{r}_3 C_{32} m_1^a \\ \mathbf{r}_3 C_{33} m_1^a \end{bmatrix}$$

2.8. SOLUCION NUMERICA USANDO EL METODO DE DIFERENCIAS FINITAS

Las ecuaciones anteriores pueden resolverse utilizando el método de las diferencias finitas. En un primer lugar, es posible discretizar en dos dimensiones, formando la matriz [G].

$$[G] = [K][H]$$

$$k_{11} = \frac{(r_2 k_2)^{i-\frac{1}{2},j}}{\Delta z^2}$$

$$k_{12} = \frac{(r_2 k_2)^{i+\frac{1}{2},j}}{\Delta z^2}$$

$$k_{13} = \frac{(r_2 k_2)^{i,j-\frac{1}{2}}}{\Delta x^2}$$

$$k_{14} = \frac{(r_2 k_2)^{i,j+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2}$$

$$k_{15} = -(k_{11} + k_{12} + k_{13} + k_{14})$$

$$k_{21} = \frac{(r_3 k_3)^{i-\frac{1}{2},j}}{\Delta z^2}$$

$$k_{22} = \frac{(\mathbf{r}_3 k_3)^{i+\frac{1}{2},j}}{\Delta z^2}$$

$$k_{23} = \frac{(\mathbf{r}_3 k_3)^{i,j-\frac{1}{2}}}{\Delta x^2}$$

$$k_{24} = \frac{(\mathbf{r}_3 k_3)^{i,j+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2}$$

$$k_{25} = -(k_{21} + k_{22} + k_{23} + k_{24})$$

$$k_{k1} = \frac{(\mathbf{r}_3 C_{3,k-2} k_3)^{i-\frac{1}{2},j}}{\Delta z^2}$$

$$k_{k2} = \frac{(\mathbf{r}_3 C_{3,k-2} k_3)^{i+\frac{1}{2},j}}{\Delta z^2}$$

$$k_{k3} = \frac{(\mathbf{r}_3 C_{3,k-2} k_3)^{i,j-\frac{1}{2}}}{\Delta x^2}$$

$$k_{k4} = \frac{(\mathbf{r}_3 C_{3,k-2} k_3)^{i,j+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2}$$

$$k_{k5} = -(k_{k1} + k_{k2} + k_{k3} + k_{k4}), k = 3 \dots 5$$

Finalmente es posible discretizar en tiempo y en forma explícita la obtención del valor para la matriz [U], en un tiempo $t+\Delta t$.

$$[U] = \Delta t [A]^{-1} \left(\left[\frac{\Delta w}{\Delta t} \right] + [K][H] - [F] \left[\frac{\Delta g_z}{\Delta t} \right] \right) + [U]^t$$

Una vez resuelta la matriz [U], es posible calcular la deformación usando las anteriores ecuaciones.

2.9. CONDICIONES DE FRONTERA

Debido a que las condiciones de frontera permiten simular condiciones de presión en áreas de estudio tales como pozos de succión, chimeneas, taludes finales, materiales especiales de cobertura, entre otros. En el modelo que se presenta se tiene las siguientes condiciones de frontera:

CONDICION DE FRONTERA	NODOS				FLUJO
	Np(l,1)	Np(l,2)	Np(l,3)	Np(l,4)	
0	MEDIO COMPLETAMENTE SATURADO				
1	NODO	NODO	NODO	NODO	Cero nodo superior
2	NODO	NODO	NODO	NODO	Cero nodo derecho
3	NODO	NODO	NODO	NODO	Cero nodo inferior
4	NODO	NODO	NODO	NODO	Cero nodo izquierdo

5	NODO	NODO	NODO	NODO	Cero nodo superior y derecho
6	NODO	NODO	NODO	NODO	Cero nodo derecho e inferior
7	NODO	NODO	NODO	NODO	Cero nodo inferior e izquierdo
8	NODO	NODO	NODO	NODO	Cero nodo superior e izquierdo
9	CONDICION DE FRONTERA CONOCIDA				
10	CONDICION DE FRONTERA CONOCIDA				
11	NODO	NODO	NODO	NODO	

TABLA No. 1: CONDICIONES DE FRONTERA¹

1. MODELACION MATEMATICA DE TRANSPORTE DE GASES Y LIXIVIADOS, 1999, KARLOC CONTRERAS, UNIVERSIDAD DE LOS ANDES

2.10. DATOS DE ENTRADA

Para el desarrollo del modelo se toman algunos datos obtenidos del relleno sanitario Doña Juana, en el área conocida como La mansión, siendo estos datos de gran importancia por que de ellos depende en gran parte generar un modelo confiable el cual en un futuro puede ser usado en el campo de los rellenos sanitarios. En esta zona se tiene problemas de estabilidad debido a las altas presiones ejercidas por lixiviados y gases, los cuales se encuentran acumulados en las celdas que conforman el área.

En este sitio se encuentra el proyecto piloto de Extracción Activa de Biogas, en el cual se instalaron piezómetros Ineales entre dos pozos, (pozo M90-3 y pozo M90-4), los cuales permiten analizar el comportamiento de las presiones.

2.10.1 DATOS GENERALES

En esta tabla se definen los siguientes datos: Gravedad, densidad del lixiviado, presión atmosférica, constante universal de los gases, temperatura, peso molecular del gas, número de puntos el cual esta definido por la geometría del terreno y la malla que se tenga para el análisis, número de iteraciones, tipo de residuos, tiempo máximo de simulación, delta de tiempo.

En el modelo que se presenta se emplea una malla de celdas de 1 metro por 1 metro, las cuales se encuentran ubicadas entre los pozos M90-3 y M90-4.

2.10.2 DATOS HIDRAULICOS

Se definen los parámetros ASR y BSR los cuales son coeficientes empíricos que dependen del tipo de material que conforman el relleno (basura y arcilla), conductividad saturada del lixiviado, conductividad saturada del biogás, coeficiente de consolidación, porosidad de arcillas y basuras, producción de gases y lixiviados y BF la cual representa la fracción biodegradable del tipo de basuras que se depositan en el relleno sanitario Doña Juana.

2.10.3 DATOS GEOMETRICOS

Se presentan los datos de cada uno de las celdas, tales como distancia y profundidad a la que se encuentran cada una de ellas, porosidad, condiciones de frontera y el tipo de residuo.

2.10.4 DATOS PARA EL TIEMPO

En esta tabla se presenta el tiempo de simulación y el delta de tiempo el cual se estimó en horas. En el modelo se utilizaron intervalos de 1 mes, 3 meses, 6 meses, 9 meses y 12 meses. Se utiliza un delta de tiempo de 0.5 horas para calcular presiones de lixiviados, gas y asentamientos en la zona La Mansión.

3. EJECUCION DEL MODELO NUMERICO

Para correr el modelo para el cálculo de asentamientos en rellenos sanitarios, se siguen los siguientes pasos:

3.1 DATOS DE ENTRADA

Se introducen los datos de las tablas de los datos generales, hidráulicos, geométricos y del tiempo, los cuales describen de manera muy aproximada las características de la zona en estudio.

El modelo contiene los datos correspondientes a la zona La Mansión del relleno sanitario Doña Juana en la Ciudad de Bogotá. D.C. Se debe recordar que la zona en estudio se encuentra entre los pozos M90-3 y M90-4.

3.2 EJECUCION DEL PROGRAMA

Al terminar de introducir en las tablas los datos generales, hidráulicos, geométricos y de tiempo se procede a la ejecución del programa, desde la barra menú, en macros, se desplaza una ventana con macros de: colores, copia, imprimir, leer, main, reso, succión, tiempo, se da doble clic en el maro main el cual permite realizar la ejecución del programa y así generando las tablas de salida de datos.

Las tablas de salida de datos nos entregan de cada una de las celdas distancia en relación al eje X y profundidad, presión de lixiviados y de gases, cantidad de materia orgánica y el asentamiento total que se presenta en el relleno.

3.3 ANALISIS DE RESULTADOS

Con los resultados que se obtiene en las tablas de salida del programa se procede a graficar la presión de lixiviados, gases, cantidad de materia orgánica y asentamiento total en la zona estudiada respecto a la distancia a los diferentes pozos M90-3 y M90-4 y a una profundidad de 2792.23 m para diferentes tiempos, en nuestro caso para 1 mes, 3 meses, 6 meses, 9 meses y 12 meses. Con estas graficas se tiene las tendencias de los resultados facilitando así el estudio del comportamiento del relleno sanitario.

3.4 CODIFICACION DEL PROGRAMA

Option Explicit

Public Npoint As Double	'numero de nodos
Public NP(0 To 4000, 1 To 4) As Double	'Conectividad entre Nodos
Public i As Integer	'contador para el número de puntos, en Z
Public j As Integer	'contador para el número de puntos, en X
Public fila As Double	
Public NRes As Double	'No. de Tipos de Residuos
Public suc As Double	'succión
Public Ua(0 To 4000) As Double	'vector de presión de gas en el tiempo
Public Ua1(0 To 4000) As Double	'Presión del gas en $t + dt$
Public Uatm As Double	'presión atmosférica
Public G As Double	'Gravedad
Public R As Double	'constante universal de los gases
Public D As Double	'coeficiente de difusión
Public TE As Double	'Temperatura absoluta
Public w As Double	'peso molecular del gas

Public DEW As Double	'densidad del Lixiviado
Public Hw(0 To 4000) As Double	'Potencial del líquido en el tiempo
Public Hw1(0 To 4000) As Double	'Potencial del líquido en $t + dt$
Public SR(0 To 4000) As Double	'grado de saturación
Public ASR(0 To 10) As Double	'Factor de la curva de capilaridad de los Residuos
Public BSR(0 To 10) As Double	'Factor de la curva de capilaridad de los Residuos
Public CS(0 To 10) As Double	'Conductividad Saturada
Public CC(0 To 10) As Double	'Coeficiente de Consolidación
Public SIGM(0 To 4000) As Double	'Esfuerzo en Z de los Residuos (Peso)
Public AK(0 To 10) As Double	'En suelos 3 - 4; Residuos Mayor
Public CSG(0 To 10) As Double	'Conductividad Saturada del Gas
Public CLNS(0 To 4000) As Double	'Conductividad de Lixiviado No-saturado
Public CGNS(0 To 4000) As Double	'Conductividad de Gas No-saturado
Public TRes(0 To 4000) As Double	'Tipo de Residuo
Public EO As Double	'saturación
Public POR(0 To 4000) As Double	'porosidad
Public M1S As Double	'Módulo de expansión volumetrica del suelo en la dirección 1 (Compresibilidad del suelo)
Public M2S As Double	'Módulo de expansión volumétrica del suelo en la dirección 2 (igual que en la dirección 1)
Public M1W As Double	'Módulo de expansión volumetrica del agua en la dirección 1 (Compresibilidad del agua)
Public M2W As Double	'Módulo de expansión volumetrica del agua en la dirección 2 (Compresibilidad del agua)
Public M1A As Double	'Módulo de expansión volumetrica del aire en la dirección 1 (Compresibilidad del aire)

Public M2A As Double	'Módulo de expansión volumetrica del aire en la dirección 2 (Compresibilidad del aire)
Public CA(0 To 4000) As Double	'Constante interactiva asociada con la fase de aire
Public CM(0 To 4000) As Double	'Coeficiente de consolidación inicial respecto a la fase acuosa
Public Cva As Double	'Coeficiente de consolidación respecto a la fase acuosa
Public CvW As Double	'coeficiente de consolidación para el agua respecto a X y Z
Public CwX As Double	'Constante interactiva asociada con la fase líquida
Public CG As Double	'Coeficiente asociado a la gravedad
Public Beta1(0 To 4000) As Double	'Compresibilidad de Lixiviado
Public Beta2(0 To 4000) As Double	'Compresibilidad de Lixiviado
Public Beta3(0 To 4000) As Double	'Compresibilidad de Lixiviado
Public Beta4(0 To 4000) As Double	'Compresibilidad de Lixiviado
Public x(0 To 4000) As Double	'Coordenada X
Public Z(0 To 4000) As Double	'Coordenada Z
Public ALFAX As Double	
Public dX As Double	
Public ALFAZ As Double	
Public dZ As Double	
Public CW(0 To 4) As Double	
Public CKA(0 To 4) As Double	
Public IFRW(0 To 4000) As Double	'Condiciones de Fronteras del Lixiviado
Public IFRA(0 To 4000) As Double	'Condiciones de Fronteras del Gas
Public CRW(0 To 5) As Double	
Public CRA(0 To 5) As Double	
Public CCA1, CCA2, CCA3, CCA4, CCA0 As Double	

Public CCW1, CCW2, CCW3, CCW4, CCW0 As Double

Public dGdT(0 To 10) As Double

'Producción de gas

Public dWdT(0 To 10) As Double

'Producción de Lixiviado

Public Tlim(0 To 35) As Double

CC'Tiempo Límite

Public dTiemp(0 To 35) As Double

'Incremento de Tiempo

Public ITmax, it As Double

'Número de iteraciones

Public t, tmax As Double

'Timepo transcurrdio y tiempo máximo de

simulacion

Public dT As Double

'Incremento del tiempo

Public DTETA2(0 To 4000) As Variant

'LEY DE FASE LIQUIDA VARIACION

ASENTAMIENTO FASE LIQUIDA

Public DTETA3(0 To 4000) As Variant

'LEY DE FASE GASEOSA

VARIACION ASENTAMIENTO FASE GASEOSA

Public TETA2(0 To 4000) As Variant

'LEY DE FASE LIQUIDA VARIACION

ASENTAMIENTO FASE LIQUIDA

Public TETA3(0 To 4000) As Variant

'LEY DE FASE GASEOSA VARIACION

ASENTAMIENTO FASE GASEOSA

Sub leer()

'Leer generales

G = Sheets("generales").Cells(3, 2).Value

DEW = Sheets("generales").Cells(4, 2).Value

Uatm = Sheets("generales").Cells(5, 2).Value

R = Sheets("generales").Cells(6, 2).Value

D = Sheets("generales").Cells(7, 2).Value

TE = Sheets("generales").Cells(8, 2).Value

w = Sheets("generales").Cells(9, 2).Value

Npoint = Sheets("generales").Cells(10, 2).Value

ITmax = Sheets("generales").Cells(11, 2).Value

NRes = Sheets("generales").Cells(12, 2).Value

```
tmax = Sheets("generales").Cells(13, 2).Value
'Leer geometricos
i = 1
fila = 4
While i <= Npoint
    x(i) = Sheets("geometricos").Cells(fila, 2).Value
    Z(i) = Sheets("geometricos").Cells(fila, 3).Value
    Hw(i) = Sheets("geometricos").Cells(fila, 4).Value
    Ua(i) = Sheets("geometricos").Cells(fila, 5).Value
    SIGM(i) = Sheets("geometricos").Cells(fila, 6).Value
    POR(i) = Sheets("geometricos").Cells(fila, 7).Value
    NP(i, 1) = Sheets("geometricos").Cells(fila, 8).Value
    NP(i, 2) = Sheets("geometricos").Cells(fila, 9).Value
    NP(i, 3) = Sheets("geometricos").Cells(fila, 10).Value
    NP(i, 4) = Sheets("geometricos").Cells(fila, 11).Value
    IFRW(i) = Sheets("geometricos").Cells(fila, 12).Value
    IFRA(i) = Sheets("geometricos").Cells(fila, 13).Value
    TRes(i) = Sheets("geometricos").Cells(fila, 14).Value
    fila = fila + 1
    i = i + 1
Wend
'Leer hidraulicos
i = 1
fila = 4
While i <= NRes
    ASR(i) = Sheets("hidraulicos").Cells(fila, 2).Value
    BSR(i) = Sheets("hidraulicos").Cells(fila, 3).Value
    CS(i) = Sheets("hidraulicos").Cells(fila, 4).Value
    AK(i) = Sheets("hidraulicos").Cells(fila, 5).Value
```

```
CC(i) = Sheets("hidraulicos").Cells(fila, 6).Value
CSG(i) = Sheets("hidraulicos").Cells(fila, 7).Value
dGdT(i) = Sheets("hidraulicos").Cells(fila, 8).Value
dWdT(i) = Sheets("hidraulicos").Cells(fila, 9).Value
fila = fila + 1
i = i + 1
Wend
'Leer Tiempo
i = 1
fila = 4
While i <= ITmax
    Tlim(i) = Sheets("tiempo").Cells(fila, 2).Value
    dTiemp(i) = Sheets("tiempo").Cells(fila, 3).Value
    fila = fila + 1
    i = i + 1
Wend
End Sub

Sub main()
'Cálculo Incremental
t = 0
dT = Sheets("generales").Cells(14, 2).Value
    leer
While t <= tmax
    tiempo
    succion
    reso
Wend
imprimir
```

copia

End Sub

Sub tiempo()

'Sub Programa Tiempo

i = 1

While i <= ITmax

 If (t >= Tlim(i - 1)) And (t <= Tlim(i)) Then

 dT = dTiemp(i)

 Else

 End If

t = t + dT

i = i + 1

Wend

End Sub

Sub succion()

'cálculo de la succión

i = 1

While i <= Npoint

 suc = Ua(i) / (G * DEW) - Hw(i) / (G * DEW) + Z(i)

 SR(i) = 1

 CLNS(i) = CS(TRes(i))

 CGNS(i) = 0

 EO = POR(i) / (1 - POR(i))

 M1S = CC(TRes(i)) / (2.3 * (SIGM(i) - Ua(i)) * (1 + EO))

 M2S = M1S

 M2W = POR(i) * M1S

 M2A = 0

```
If (suc > 0.1) Then
  SR(i) = ASR(TRes(i)) / (ASR(TRes(i)) + suc ^ (BSR(TRes(i))))
  CLNS(i) = CS(TRes(i)) * SR(i) ^ (AK(TRes(i)))
  CGNS(i) = CSG(TRes(i)) * (1 - SR(i)) ^ 3 * (1 + SR(i)) ^ 3
  M2W = -POR(i) * (ASR(TRes(i)) * BSR(TRes(i)) * suc ^ (BSR(TRes(i)) - 1) *
(ASR(TRes(i)) + suc ^ (BSR(TRes(i)))) ^ -2) / (G * DEW)
  M2S = SR(i) * M1S
  M1A = M1S - M1W
  M2A = M2S - M2W
  CA(i) = M2A / (M2A - M1A + (1 - SR(i)) * POR(i) / (Ua(i) + Uatm))
  CM(i) = (-R * TE * D / w) * 1 / ((M2A - M1A) * (Ua(i) + Uatm) + (1 - SR(i)) *
POR(i))
  Cva = CM(i)
Else
End If
M1W = (SR(i) / (1 + EO) ^ 2) * CC(TRes(i)) / (2.3 * (SIGM(i) - Ua(i)))
If M1W <> 0 Then
  CwX = (M1W - M2W) * M2W
Else
  CwX = 1
End If
If M2W <> 0 Then
  CG = -1 / M2W
  CvW = 1 / (DEW * G * M2W)
Else
  CG = 0
  CvW = 1 / (DEW * G)
End If
Beta1(i) = CwX / (1 - CwX * CA(i))
```

```

    Beta2(i) = CwX * CM(i) / (1 - CwX * CA(i))
    Beta3(i) = 1 / (1 - CwX * CA(i))
    Beta4(i) = CG / (1 - CwX * CA(i))
i = i + 1
Wend
End Sub

Sub reso()
'Solucion del Laplaciano
i = 1
While i <= Npoint
    dX = (x(NP(i, 2)) - x(i))
    ALFAX = (x(i) - x(NP(i, 4))) / dX
    dZ = (Z(NP(i, 1)) - Z(i))
    ALFAZ = (Z(i) - Z(NP(i, 3))) / dZ
    j = 1
    While j <= 4
        CW(j) = (CLNS(i) * CLNS(NP(i, j))) ^ 0.5
        CKA(j) = (CGNS(i) * CGNS(NP(i, j))) ^ 0.5
    j = j + 1
    Wend

'Condiciones de frontera para el agua
    If (IFRW(i) = 1) Or (IFRW(i) = 5) Or (IFRW(i) = 8) Then
        CW(1) = CW(3)
        dZ = Z(i) - Z(NP(i, 3))
        ALFAZ = 1
    End If
    If (IFRW(i) = 2) Or (IFRW(i) = 5) Or (IFRW(i) = 6) Then

```

$$CW(2) = CW(4)$$

$$dX = x(i) - x(NP(i, 4))$$

$$ALFAX = 1$$

End If

If (IFRW(i) = 3) Or (IFRW(i) = 6) Or (IFRW(i) = 7) Then

$$CW(3) = CW(1)$$

$$dZ = Z(NP(i, 1)) - Z(i)$$

$$ALFAZ = 1$$

End If

If (IFRW(i) = 4) Or (IFRW(i) = 7) Or (IFRW(i) = 8) Then

$$CW(4) = CW(2)$$

$$dX = x(NP(i, 2)) - x(i)$$

$$ALFAX = 1$$

End If

If (IFRW(i) = 9) And (NP(i, 2) = 0) Then

$$CW(2) = CW(4)$$

$$dX = x(i) - x(NP(i, 4))$$

$$dZ = Z(i) - Z(NP(i, 3))$$

$$ALFAX = 1$$

$$ALFAZ = 1$$

End If

If (IFRW(i) = 9) And (NP(i, 4) = 0) Then

$$CW(4) = CW(2)$$

$$dX = x(NP(i, 2)) - x(i)$$

$$dZ = Z(NP(i, 1)) - Z(i)$$

$$ALFAX = 1$$

$$ALFAZ = 1$$

End If

If (IFRW(i) = 9) And (NP(i, 1) = 0) Then

$$CW(1) = CW(3)$$

$$dZ = Z(i) - Z(NP(i, 3))$$

$$ALFAZ = 1$$

End If

If (IFRW(i) = 9) And (NP(i, 3) = 0) Then

$$CW(3) = CW(1)$$

$$dZ = Z(NP(i, 1)) - Z(i)$$

$$ALFAZ = 1$$

End If

'Condiciones de frontera para el aire

If (IFRA(i) = 1) Or (IFRA(i) = 5) Or (IFRA(i) = 8) Then

$$CKA(1) = CKA(3)$$

$$dZ = Z(i) - Z(NP(i, 3))$$

$$ALFAZ = 1$$

End If

If (IFRA(i) = 2) Or (IFRA(i) = 5) Or (IFRA(i) = 6) Then

$$CKA(2) = CKA(4)$$

$$dX = x(i) - x(NP(i, 4))$$

$$ALFAX = 1$$

End If

If (IFRA(i) = 3) Or (IFRA(i) = 6) Or (IFRA(i) = 7) Then

$$CKA(3) = CKA(1)$$

$$dZ = Z(NP(i, 1)) - Z(i)$$

$$ALFAZ = 1$$

End If

If (IFRA(i) = 4) Or (IFRA(i) = 7) Or (IFRA(i) = 8) Then

$$CKA(4) = CKA(2)$$

$$dX = x(NP(i, 2)) - x(i)$$

$$\text{ALFAX} = 1$$

End If

'Fin definición de conductividades imagenes

$$dX = \text{Abs}(dX)$$

$$dZ = \text{Abs}(dZ)$$

$$\text{ALFAX} = \text{Abs}(\text{ALFAX})$$

$$\text{ALFAZ} = \text{Abs}(\text{ALFAZ})$$

$$\text{CCW1} = \text{CW}(1) * \text{Beta3}(i) / (dZ \wedge 2) * \text{ALFAZ} / (1 + \text{ALFAZ})$$

$$\text{CCW2} = \text{CW}(2) * \text{Beta3}(i) / (dX \wedge 2) * \text{ALFAX} / (1 + \text{ALFAX})$$

$$\text{CCW3} = \text{CW}(3) * \text{Beta3}(i) / (dZ \wedge 2) * 1 / (1 + \text{ALFAZ})$$

$$\text{CCW4} = \text{CW}(4) * \text{Beta3}(i) / (dX \wedge 2) * 1 / (1 + \text{ALFAX})$$

$$\text{CCW0} = -\text{CCW1} - \text{CCW2} - \text{CCW3} - \text{CCW4}$$

$$\text{CCA1} = \text{CKA}(1) * \text{Beta1}(i) / (dZ \wedge 2) * \text{ALFAZ} / (1 + \text{ALFAZ})$$

$$\text{CCA2} = \text{CKA}(2) * \text{Beta1}(i) / (dX \wedge 2) * \text{ALFAX} / (1 + \text{ALFAX})$$

$$\text{CCA3} = \text{CKA}(3) * \text{Beta1}(i) / (dZ \wedge 2) * 1 / (1 + \text{ALFAZ})$$

$$\text{CCA4} = \text{CKA}(4) * \text{Beta1}(i) / (dX \wedge 2) * 1 / (1 + \text{ALFAX})$$

$$\text{CCA0} = -\text{CCA1} - \text{CCA2} - \text{CCA3} - \text{CCA4}$$

$$\text{CRW}(1) = dT * \text{CCW1}$$

$$\text{CRW}(2) = dT * \text{CCW2}$$

$$\text{CRW}(3) = dT * \text{CCW3}$$

$$\text{CRW}(4) = dT * \text{CCW4}$$

$$\text{CRW}(5) = dT * \text{CCW0}$$

$$\text{CRA}(1) = dT * \text{CCA1}$$

$$\text{CRA}(2) = dT * \text{CCA2}$$

$$\text{CRA}(3) = dT * \text{CCA3}$$

$$\text{CRA}(4) = dT * \text{CCA4}$$

$$\text{CRA}(5) = dT * \text{CCA0}$$

'Modificación de frontera de agua

If (IFRW(i) = 1) Or (IFRW(i) = 5) Or (IFRW(i) = 8) Then

$$CRW(3) = dT * CCW3 + dT * CCW1$$

End If

If (IFRW(i) = 2) Or (IFRW(i) = 5) Or (IFRW(i) = 6) Then

$$CRW(4) = dT * CCW4 + dT * CCW2$$

End If

If (IFRW(i) = 3) Or (IFRW(i) = 6) Or (IFRW(i) = 7) Then

$$CRW(1) = dT * CCW1 + dT * CCW3$$

End If

If (IFRW(i) = 4) Or (IFRW(i) = 7) Or (IFRW(i) = 8) Then

$$CRW(2) = dT * CCW2 + dT * CCW4$$

End If

If (IFRW(i) = 9) And (NP(i, 2) = 0) Then

$$CRW(4) = dT * CCW4 + dT * CCW2$$

End If

If (IFRW(i) = 9) And (NP(i, 4) = 0) Then

$$CRW(2) = dT * CCW2 + dT * CCW4$$

End If

If (IFRW(i) = 9) And (NP(i, 3) = 0) Then

$$CRW(1) = dT * CCW3 + dT * CCW1$$

End If

If (IFRW(i) = 9) And (NP(i, 1) = 0) Then

$$CRW(3) = dT * CCW1 + dT * CCW3$$

End If

'Modificación de frontera de aire

If (IFRA(i) = 1) Or (IFRA(i) = 5) Or (IFRA(i) = 8) Then

$$CRA(3) = dT * CCA3 + dT * CCA1$$

End If

If (IFRA(i) = 2) Or (IFRA(i) = 5) Or (IFRA(i) = 6) Then

$$CRA(4) = dT * CCA4 + dT * CCA2$$

End If

If (IFRA(i) = 3) Or (IFRA(i) = 6) Or (IFRA(i) = 7) Then

$$CRA(1) = dT * CCA3 + dT * CCA1$$

End If

If (IFRA(i) = 4) Or (IFRA(i) = 7) Or (IFRA(i) = 8) Then

$$CRA(2) = dT * CCA2 + dT * CCA4$$

End If

'Solución para T + dT

If (SR(i) < 1) Or (IFRW(i) <> 0) Then

$$Hw1(i) = CRW(5) * Hw(i) + CRA(5) * Ua(i)$$

$$Ua1(i) = CRA(5) * Ua(i)$$

j = 1

While j <= 4

$$Hw1(i) = Hw1(i) + CRW(j) * Hw(NP(i, j)) + CRA(j) * Ua(NP(i, j))$$

$$Ua1(i) = Ua1(i) + CRA(j) * Ua(NP(i, j))$$

j = j + 1

Wend

$$Hw1(i) = Hw1(i) + Beta2(i) * dT * dGdT(TRes(i)) / (G * DEW) + Beta4(i) * dT * dWdT(TRes(i)) / (G * DEW) + Hw(i)$$

$$Ua1(i) = Ua1(i) + CM(i) * dT * dGdT(TRes(i)) + CA(i) * (Hw1(i) - Hw(i)) * (G * DEW) + Ua(i)$$

Else

'Caso Saturado

If IFRW(i) = 0 Then

j = 1

```
    While j <= 4
      Hw1(i) = Hw(NP(i, j))
      Ua1(i) = 0
      j = j + 1
    Wend
    Hw1(i) = Hw1(i) / 4
  End If
End If
If IFRW(i) = 10 Then
  Hw1(i) = Hw(i)
End If
If IFRA(i) = 10 Then
  Ua1(i) = Ua(i)
End If
If (IFRW(i) = 9) And (Hw1(i) > Z(i)) Then
  Hw1(i) = Z(i) * (G * DEW)
End If
Hw(i) = Hw1(i)
Ua(i) = Ua1(i)
If Ua(i) = 0 Or Hw(i) = 0 Then
  DTETA2(i) = 0
  DTETA3(i) = 0
Else
  DTETA2(i) = M1W / Ua(i) + M2W / Hw(i)
  DTETA3(i) = M1A / Ua(i) + M2A / Hw(i)
End If
TETA2(i) = DTETA2(i) + TETA2(i)
TETA3(i) = DTETA3(i) + TETA3(i)
```

'DTETA2(i) = M1W * (SIGM(i) - Ua(i)) + M2W * (Ua(i) - Hw(i))

'DTETA3(i) = M1A * (SIGM(i) - Ua(i)) + M2A * (Ua(i) - Hw(i))

i = i + 1

Wend

End Sub

Sub imprimir()

'Impresión de Resultados

i = 1

fila = 4

While i <= Npoint

 Sheets("salida").Cells(fila, 2).Value = x(i)

 Sheets("salida").Cells(fila, 3).Value = Z(i)

 Sheets("salida").Cells(fila, 4).Value = Hw1(i)

 Sheets("salida").Cells(fila, 5).Value = Ua1(i)

 Sheets("salida").Cells(fila, 6).Value = SR(i)

 Sheets("salida").Cells(fila, 8).Value = DTETA2(i)

 Sheets("salida").Cells(fila, 9).Value = DTETA3(i)

 Sheets("salida").Cells(fila, 14).Value = TETA2(i)

 Sheets("salida").Cells(fila, 15).Value = TETA3(i)

 fila = fila + 1

 i = i + 1

Wend

End Sub

4. ANALISIS DE RESULTADOS

Al obtener los resultados de las presiones de los gases y lixiviados dentro del relleno sanitario, se observa que la presión de los lixiviados es mayor a la presión ejercida por los gases (figura no. 4). Las presiones de los lixiviados y gases van aumentando con el tiempo, por lo que se debe tener especial cuidado con la acumulación de estas presiones, debido a que se puede llegar a la inestabilidad del relleno (figura No. 2 y 3).

En la profundidad del relleno y con el transcurrir del tiempo se observa un aumento en las presiones de lixiviados y gases, al igual que estas presiones presentan caída en las capas de arcilla, lo que se debe a que en estas capas no se presenta generación de fluidos o gases (figura No. 5 y 6). De lo anterior se concluye que entre celdas separadas por capas de arcilla el movimiento que se presenta es similar al de canalización debido a la impermeabilidad de las capas de arcilla (figura No. 11 y 12).

En la celda analizada se observa como el proceso de degradación de la materia orgánica incrementa la magnitud del asentamiento (figura No. 14), de donde se puede determinar que la mayor parte de los asentamientos se presentan en los primeros meses, pero estos asentamientos pueden continuar por un largo periodo de tiempo.

En la capa de análisis se presenta un asentamiento del 9% de la altura total (1 metro), en un periodo de 1 año, por lo que se tiene la importancia de predecir el asentamiento de un relleno sanitario en el tiempo, ya que se puede llegar a tener problemas en la estructura del relleno, como mal funcionamiento del sistema de recolección de lixiviados, comportamiento y funcionalidad de la capa de cobertura, problemas en la posible utilización del relleno después de su clausura.

El proceso de biodegradación de la materia orgánica presente en los residuos sólidos dispuestos en el relleno, trae consigo el aumento de la humedad, esto debido a las diferentes reacciones que ocurren dentro del relleno, hasta llegar a un punto de equilibrio (figura No. 15).

La variación de las fases líquida, sólida y gaseosa se observa en la figura No. 17, donde se tiene que la fase sólida disminuye debido al proceso de degradación de la materia orgánica presente en los residuos, la fase líquida aumenta al igual que la fase gaseosa, lo que nos lleva a tomar medidas necesarias para lograr su extracción y así disminuir el riesgo de inestabilidad que se presenta en el relleno sanitario.

En las capas de basura se tiene que al aumentar el grado de saturación se presenta una menor permeabilidad del gas, en contraste la permeabilidad de los lixiviados aumenta, lo que indica que en un alto grado de saturación el movimiento del líquido es mayor que en el de los gases (figura No. 18 y 19).

Al observar las figuras No. 18 y 19, se tiene como las permeabilidades de los lixiviados y de los gases son mayores en las capas de residuos sólidos y menores en las capas de cobertura.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

Este modelo es una herramienta de simulación cuyo lenguaje de programación es Visual Basic, que puede ser empleada para simular los asentamientos teóricos producidos en un relleno sanitario en diferentes escenarios y situaciones.

La simulación ofrece la oportunidad de modelar el comportamiento de un relleno sanitario en forma efectiva y eficiente, permitiendo analizar diferentes situaciones.

Una de las características del modelo es su flexibilidad y fácil manejo el cual esta en un proceso de continuo mejoramiento para llegar a consolidarse como una herramienta eficaz en el cálculo de asentamientos en un relleno sanitario.

Al observar los resultados de esta investigación se tiene que con el pasar del tiempo el relleno tiende a estabilizarse, es decir los asentamientos son cada vez menores y las presiones dentro del relleno disminuyen así como la cantidad de materia orgánica dentro de este.

5.2. RECOMENDACIONES

Los resultados obtenidos utilizando este modelo son teóricos, por lo que se deben hacer ensayos in situ y de laboratorio para la verificación y validación de esta herramienta.

Este es un proyecto de investigación cuyo objetivo final es implementar una herramienta para visualizar el comportamiento de los rellenos sanitarios con el transcurrir del tiempo, para lo cual se recomienda desarrollar un proceso de planeación estratégica con la respectiva determinación de su misión y visión.

En el continuo proceso de mejoramiento y perfeccionamiento de esta herramienta considero que los pasos a seguir son:

- Desarrollar una interfaz que permita hacer más agradable el uso de esta herramienta (independizarlo de EXCEL y hacer que maneje su propia base de datos).
- Depurar el código de programación con el fin de optimizar el desempeño de esta herramienta.
- Incrementar al programa otros factores que afecten el desarrollo del proceso de biodegradación como es la temperatura.

Hacer una divulgación adecuada de esta herramienta, buscando no solo la participación de futuros investigadores en el desarrollo de la misma si no también su consolidación como un programa de frecuente uso en el medio de la Ingeniería Civil y Sanitaria.

6. BIBLIOGRAFIA

Bear J., Bachmat Y. "Transport Phenomena in Porous Media" NATO ASI Series. 1984

Bear J., Zaslavsky D., Irmay S. "Physical Principles of Water Percolation and Seepage" UNESCO

Caicedo B., Giraldo E., Behrentz E., "Modeling of Leachate and Gas Flow in Sanitary Landfills" Universidad de Los Andes. 2000

Contreras Karloc. "Modelación Matemática del Transporte de Gases y Lixiviados en Rellenos Sanitarios" Universidad de Los Andes. 1999

Fredlund D., Willey., "Soils Mechanics For Unsaturated Soils" Wiley Interscience Publication. 1993

Giraldo E., Behrentz E., "Modelo Acoplado para la Estimación de la Generación de Gases y Producción de Lixiviados en Rellenos Sanitarios" VIII congreso Colombiano de Geotecnia. 2000

Palacios C., "Análisis Dinámico de Gases y Lixiviados en Pozos de Extracción Activa en Rellenos Sanitarios" Universidad de Los Andes. 2002

Tchobanoglous, "Integrated Solid Waste Management" McGraw Hill. 1993

ANEXOS

DATOS GENERALES

(G) Gravedad [m/s²] =	9.80
(DEL) Densidad de Lixiviado [Kg/m³] =	800.00
(UaTM) Presión atmosférica [N·m⁻²] Bogota=	78.680
(R) Constante universal de los gases [N·m/mol·°K] =	353.00
D * = 1/9,8m/s²	1.02E-01
TE = [°K]	293
(w) Peso Molecular del GAS [Kg/mol] =	0.03
(NPOINT) Número de Puntos =	1.486
(Itmax) Número de Iteraciones =	12
(NRES) Número de tipo de Residuos =	2
(Tmax) Tiempo máximo de simulación [hora]=	8.640
(?T) delta del tiempo [hora] =	9.5

DATOS HIDRAULICOS

ASR	BSR	CS (m/h)	AK	CC	CGS (m/h)	DGDT	?_i*	??
50	0.6	4.17E+00	7	3.33E-06	9.38E+01	-6.23E-06	-3.50E-03	3.50E-01
25	0.3	2.43E-05	3	1.27E-07	5.46E-04	0.00E+00	0.00E+00	3.50E-01

DATOS DE TIEMPO

	Tlim	dTiemp
	720	9.5
	1440	9.5
	2160	9.5
	2880	9.5
	3600	9.5
	4320	9.5
	5040	9.5
	5760	9.5
	6480	9.5
	7200	9.5
	7920	9.5
Itmax	8640	9.5

MIC 2003 - II - 34

POZO M90-3

POZO M90-4

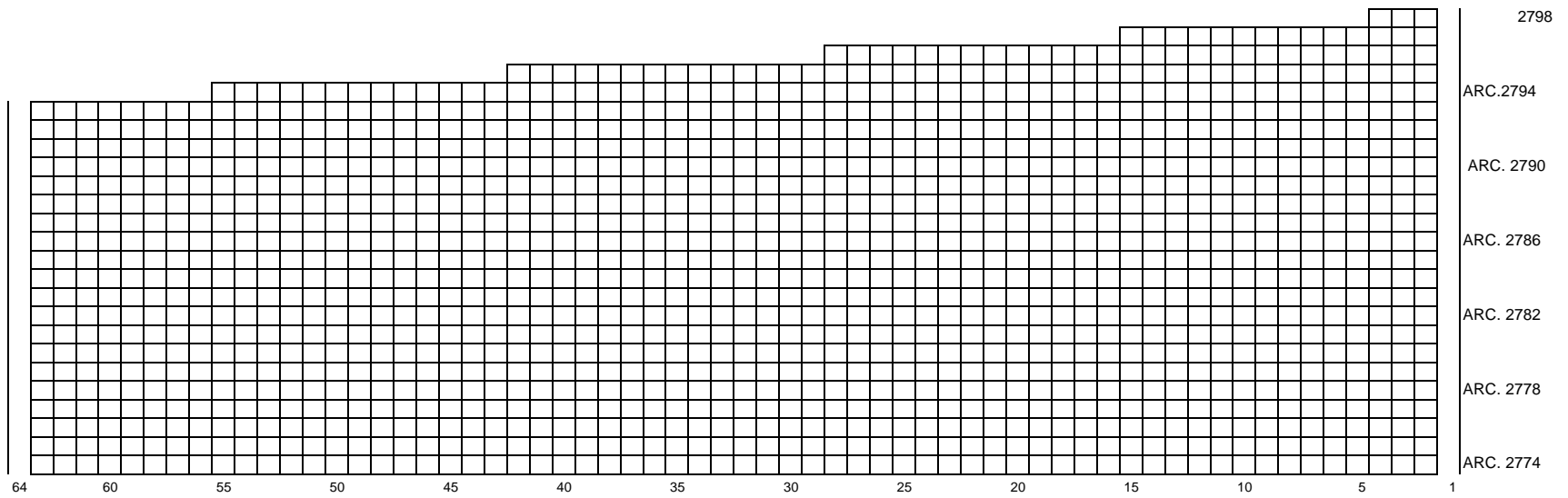


FIGURA 1: ZONA II SIMULADA EN EL RELLENO SANITARIO DOÑA JUANA

Figura No. 2 PRESION DE LIXIVIADOS EN EL TIEMPO A 2792.23 m

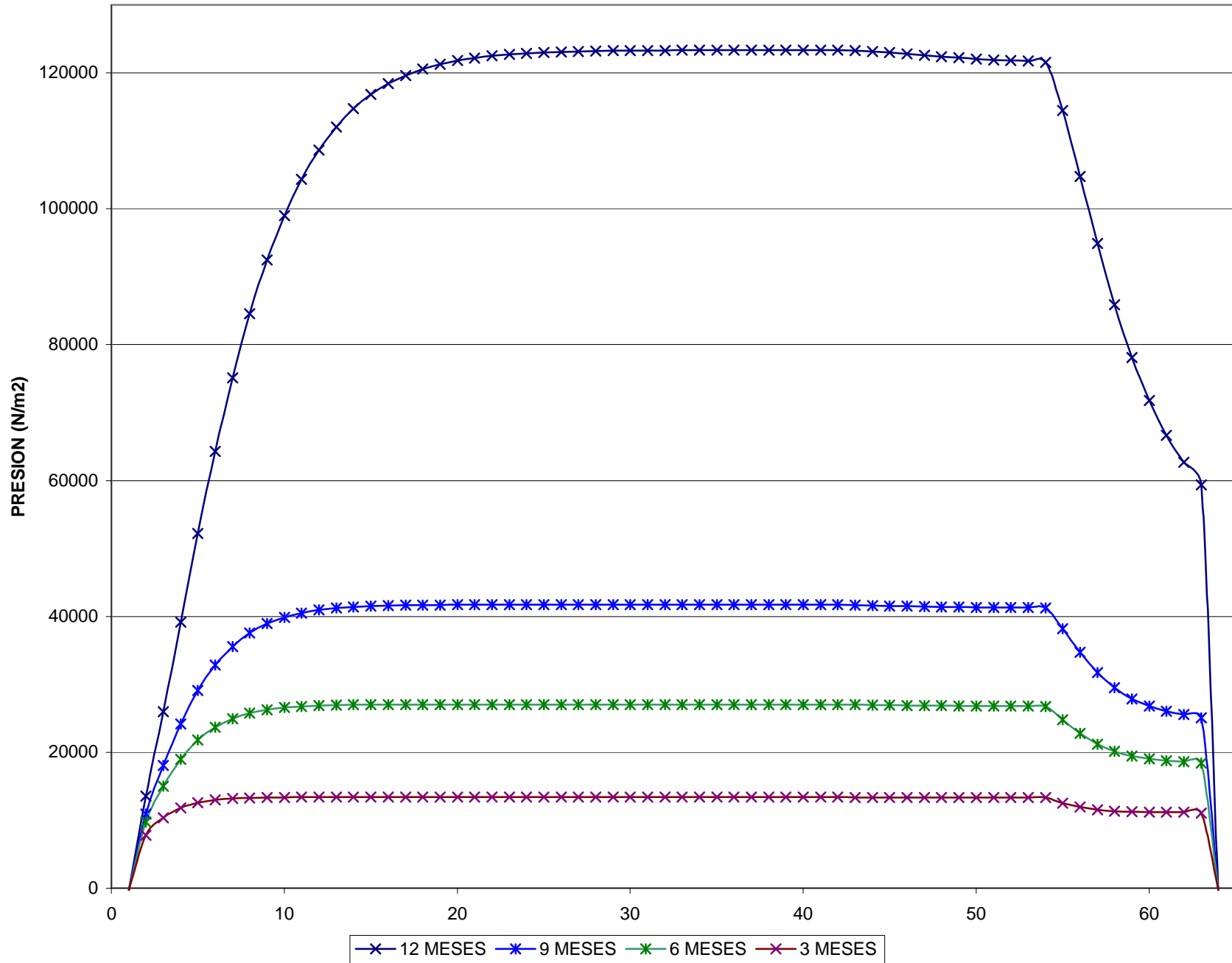


Figura No. 3 PRESION DE GAS EN EL TIEMPO A 2792.23 m

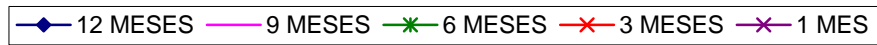
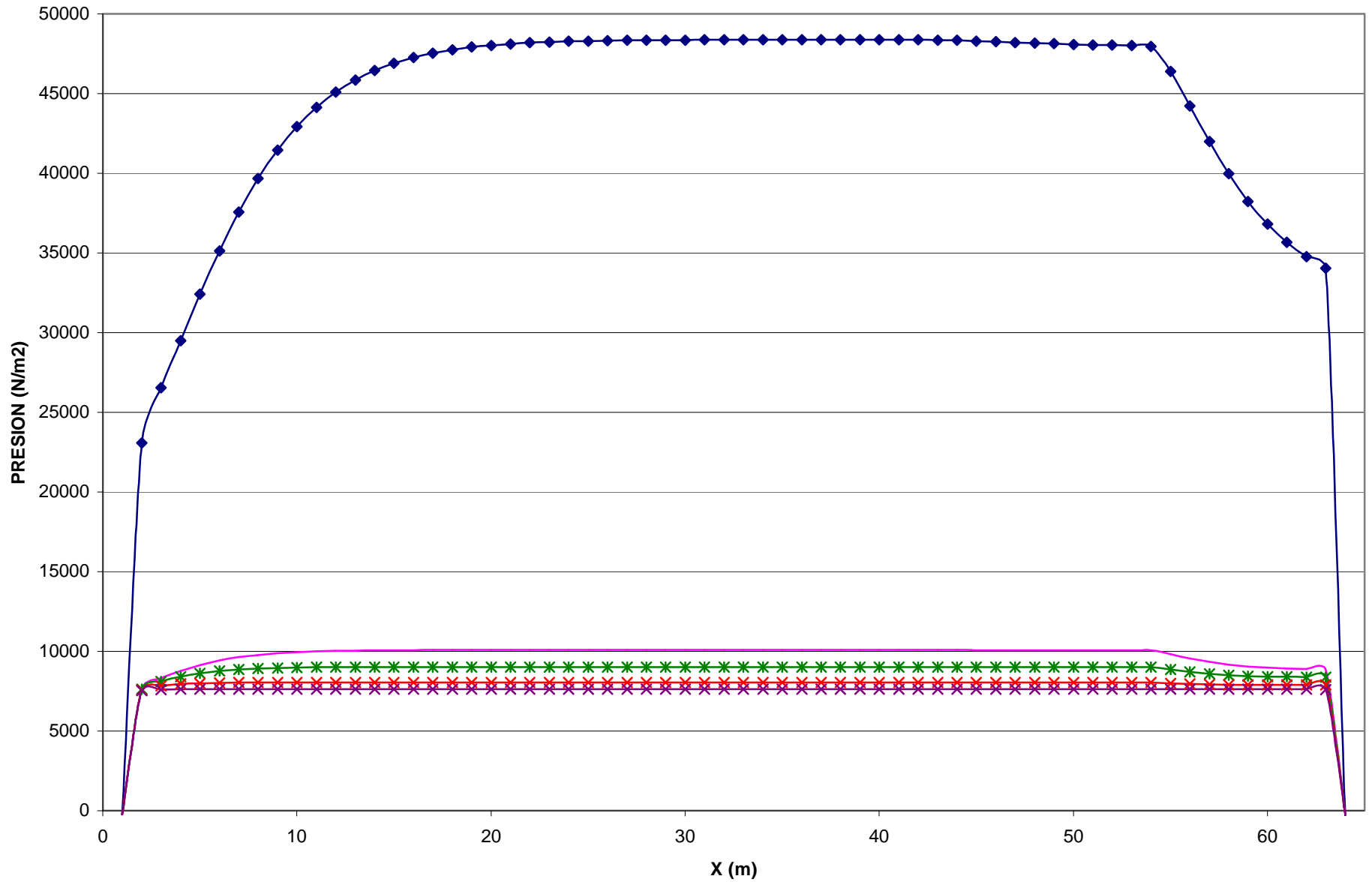


Figura No. 4 PRESIONES A 2792.23 m (12 MESES)

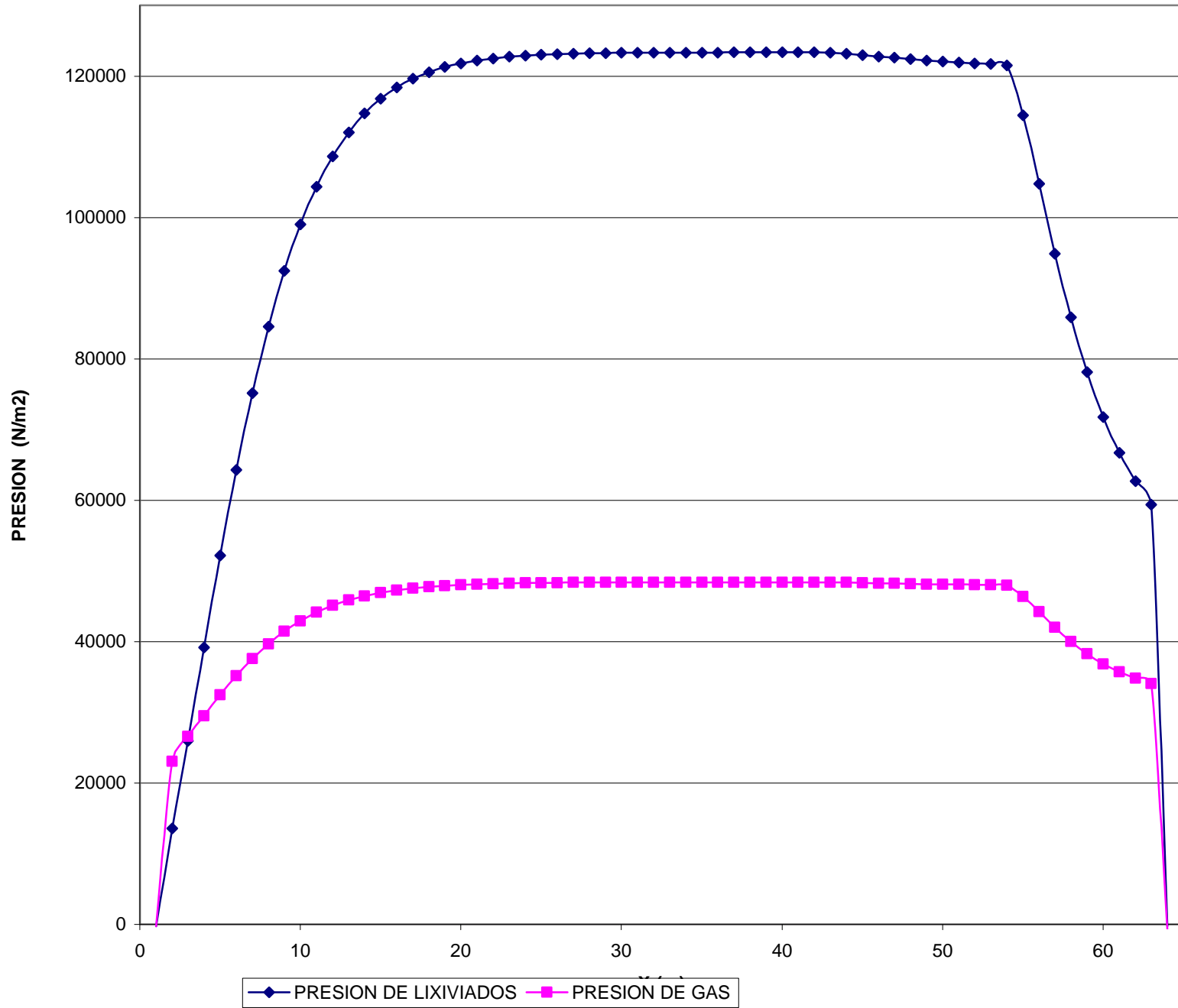


Figura No. 5 PRESION DE LIXIVIADOS A x = 15 m EN EL TIEMPO

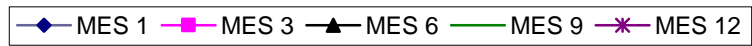
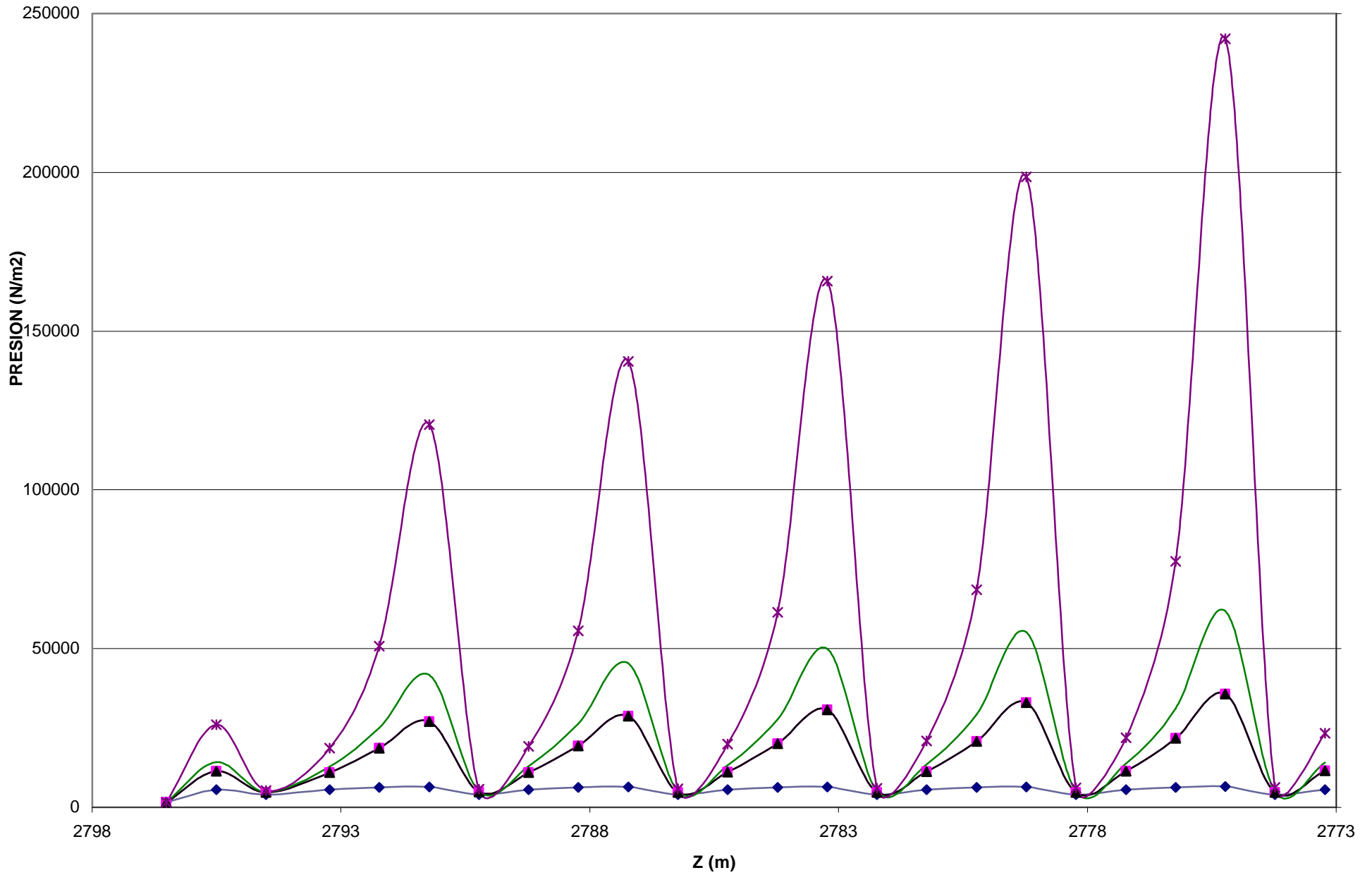
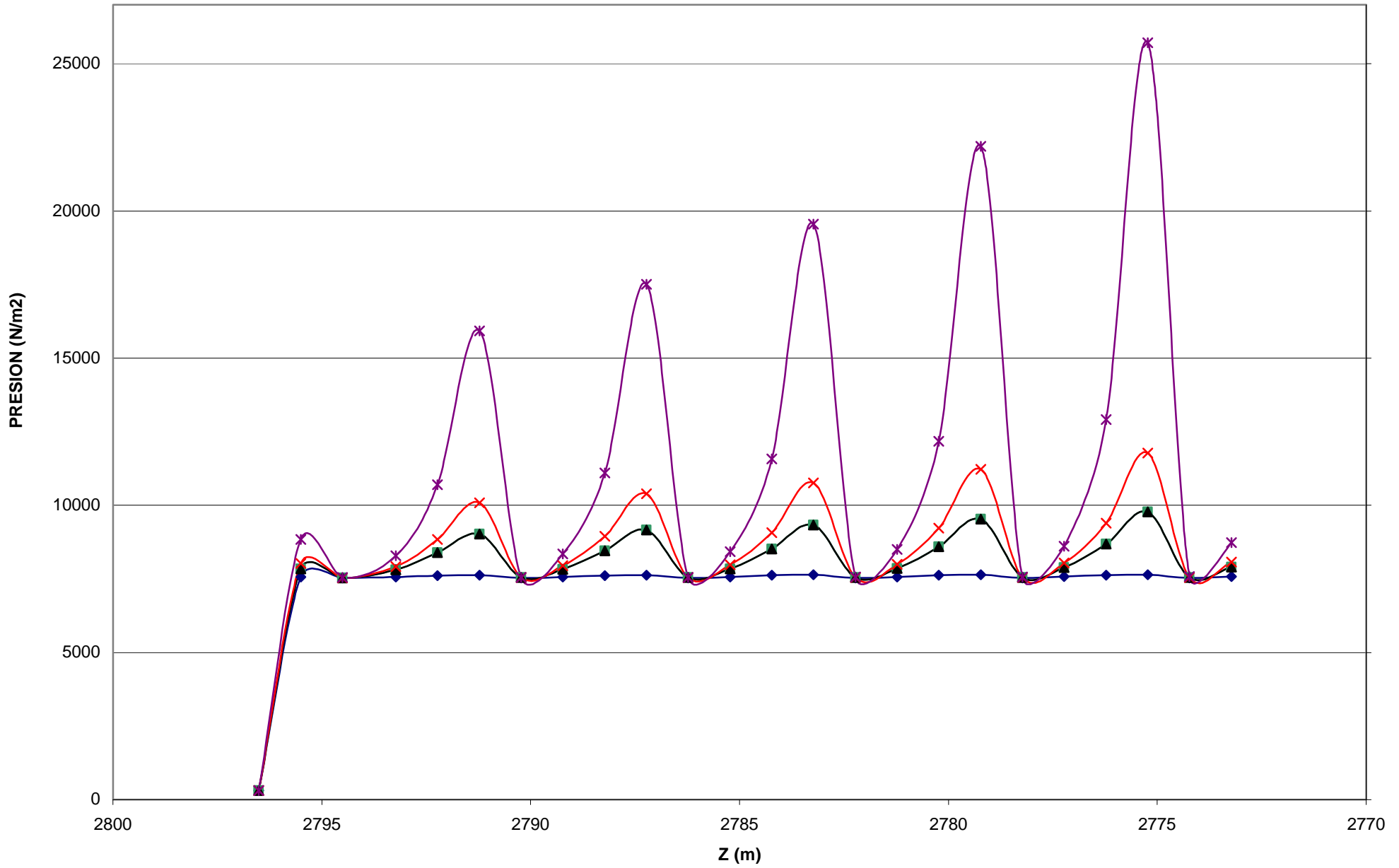


Figura No. 6 PRESION DE GAS A x = 15 m EN EL TIEMPO



◆ MES 1
 ■ MES 3
 ▲ MES 6
 ✕ MES 9
 ✱ MES 12

Figura No. 7 PRESION DE LIXIVIADOS A x = 32 m EN EL TIEMPO

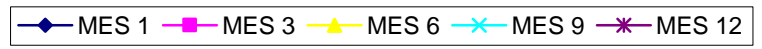
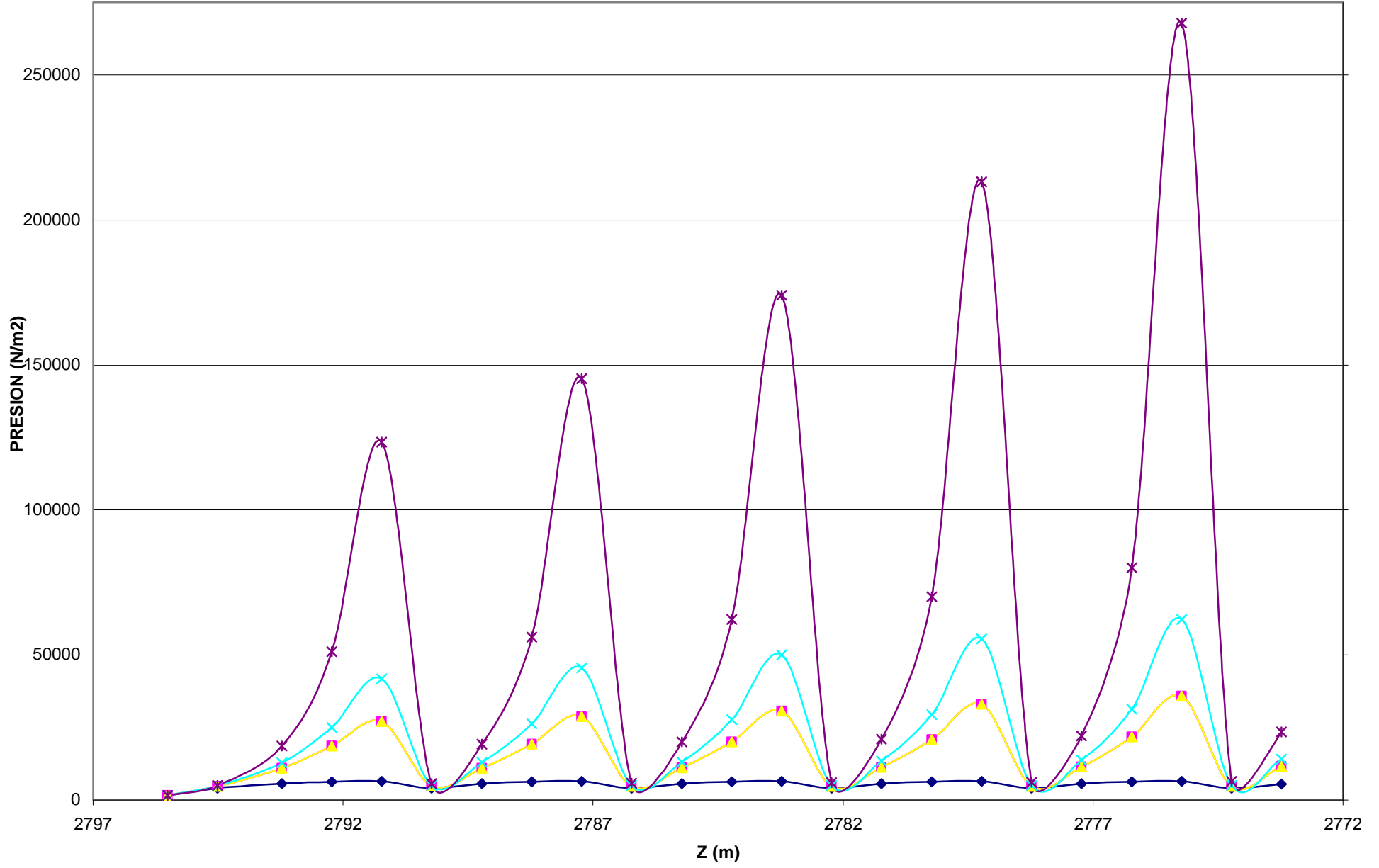
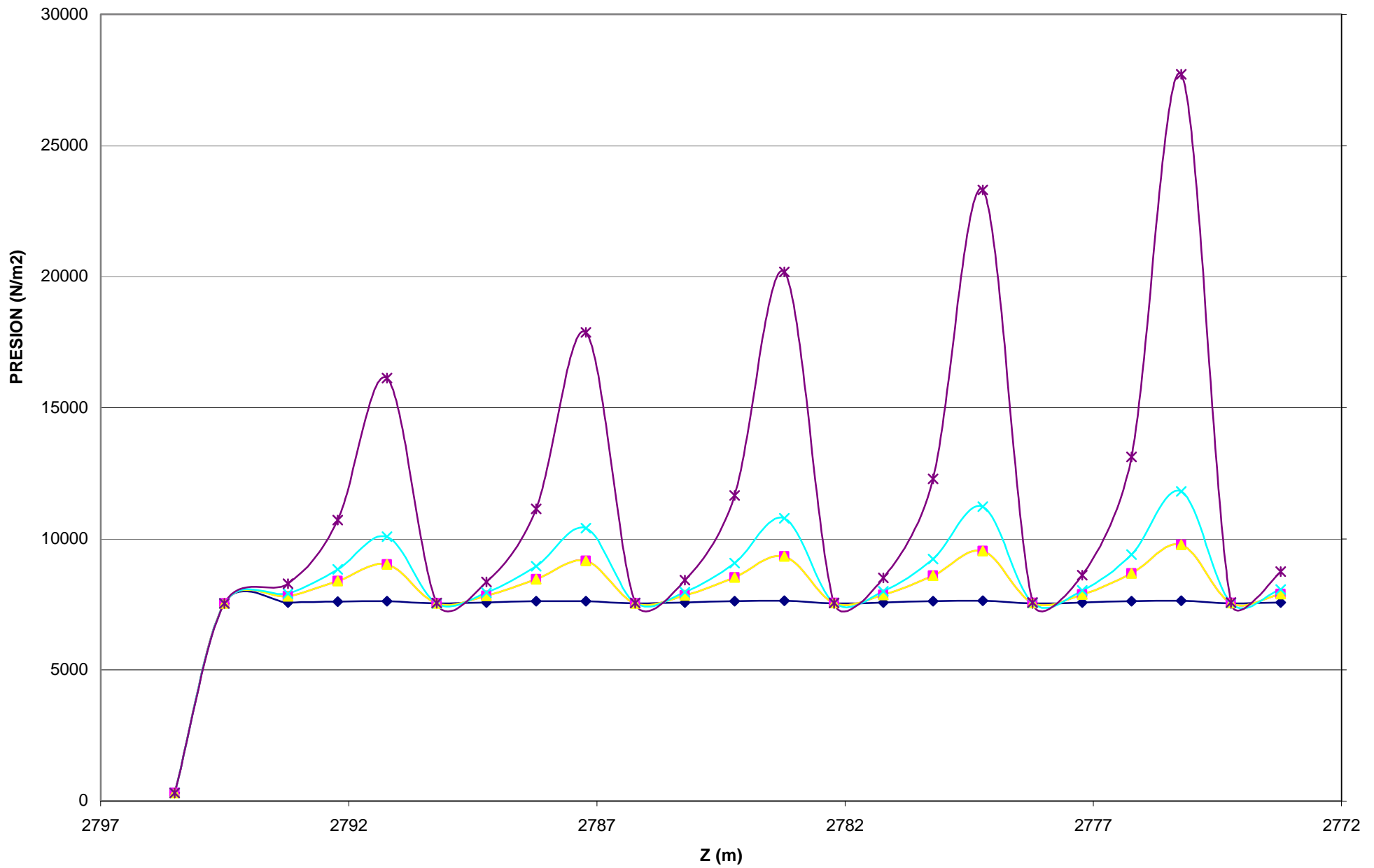


Figura No. 8 PRESION DE GAS A x = 32 m EN EL TIEMPO



◆ MES 1 ■ MES 3 ▲ MES 6 × MES 9 * MES 12

Figura No. 9 PRESION DE LIXIVIADOS A x = 60 m EN EL TIEMPO

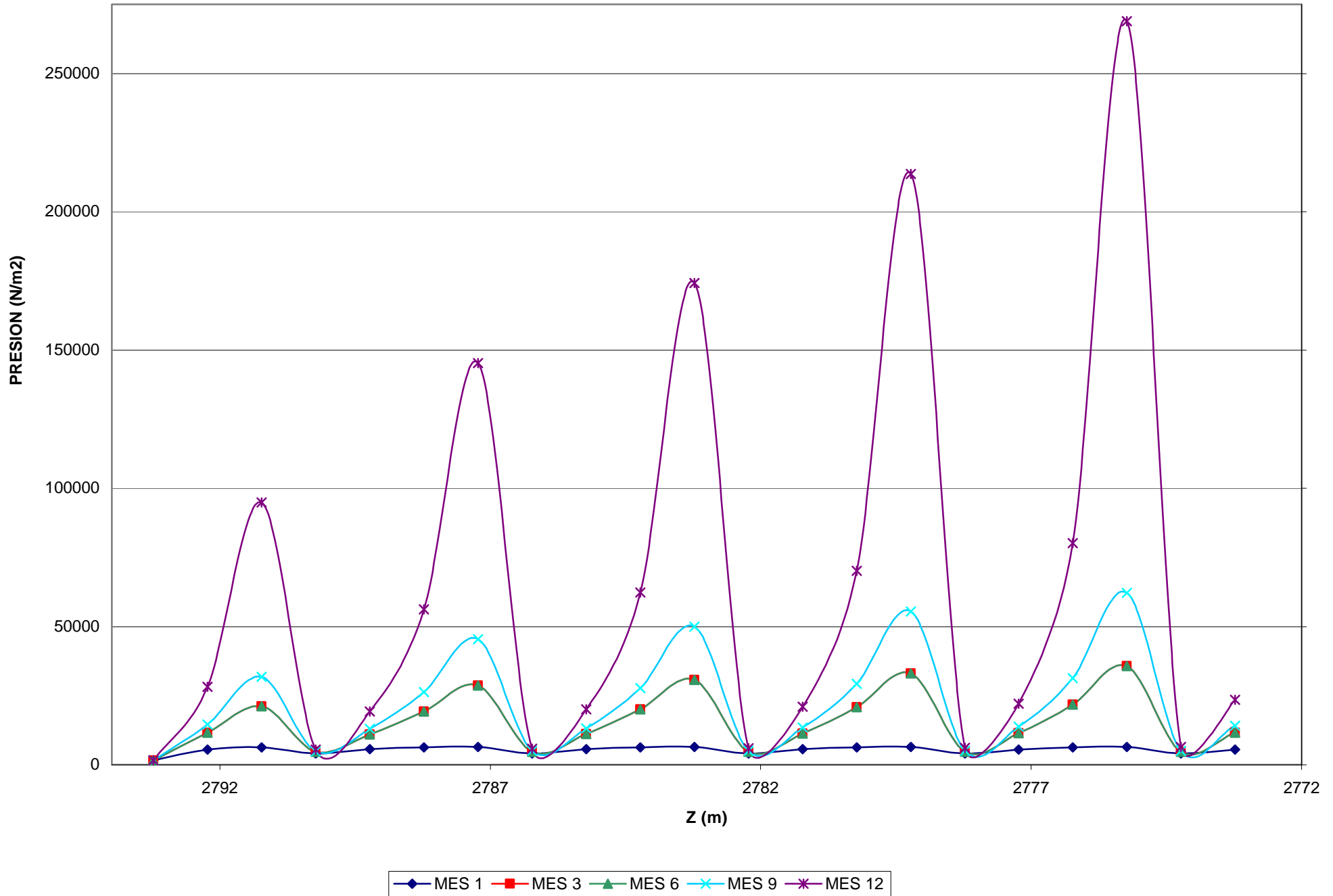
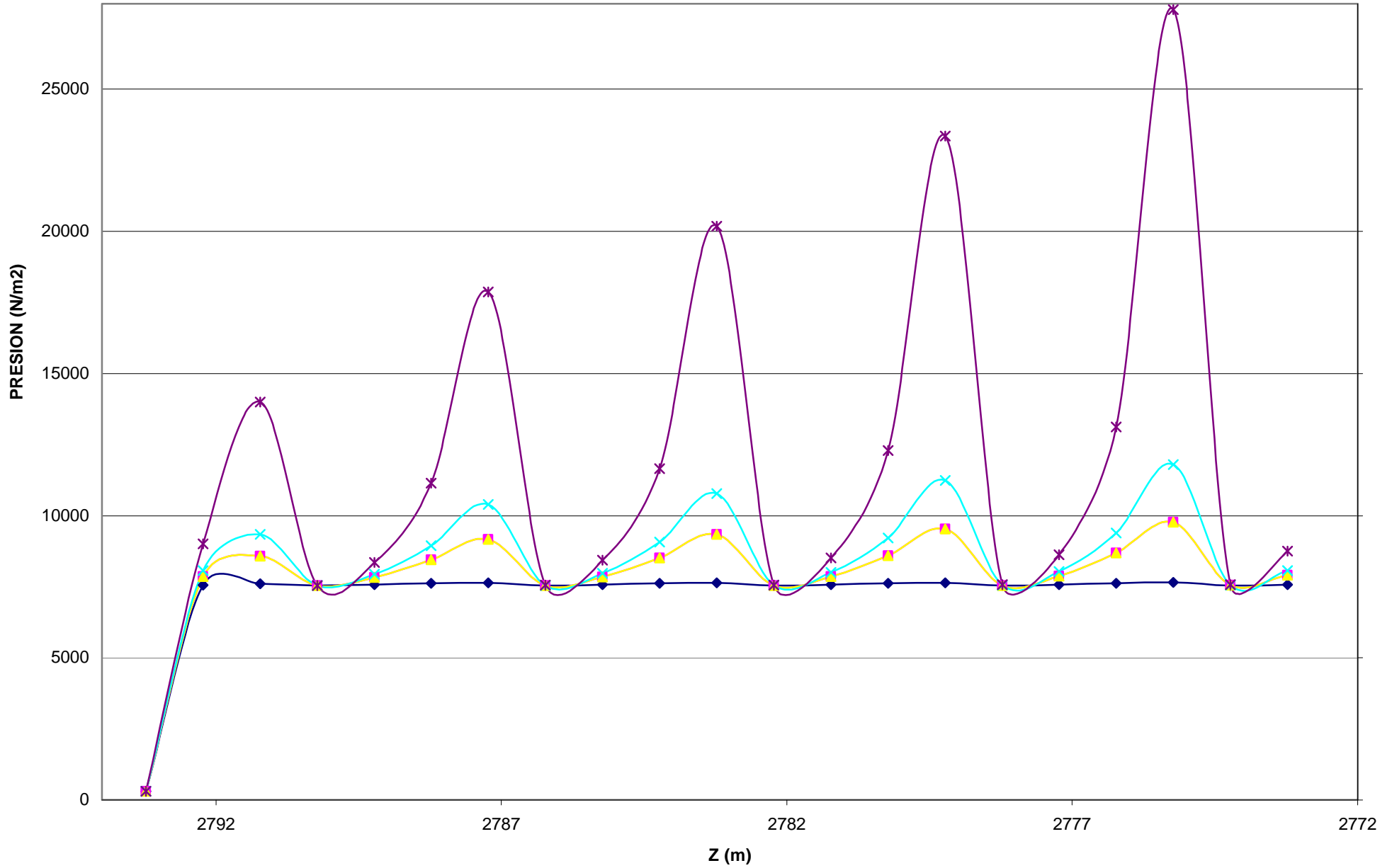


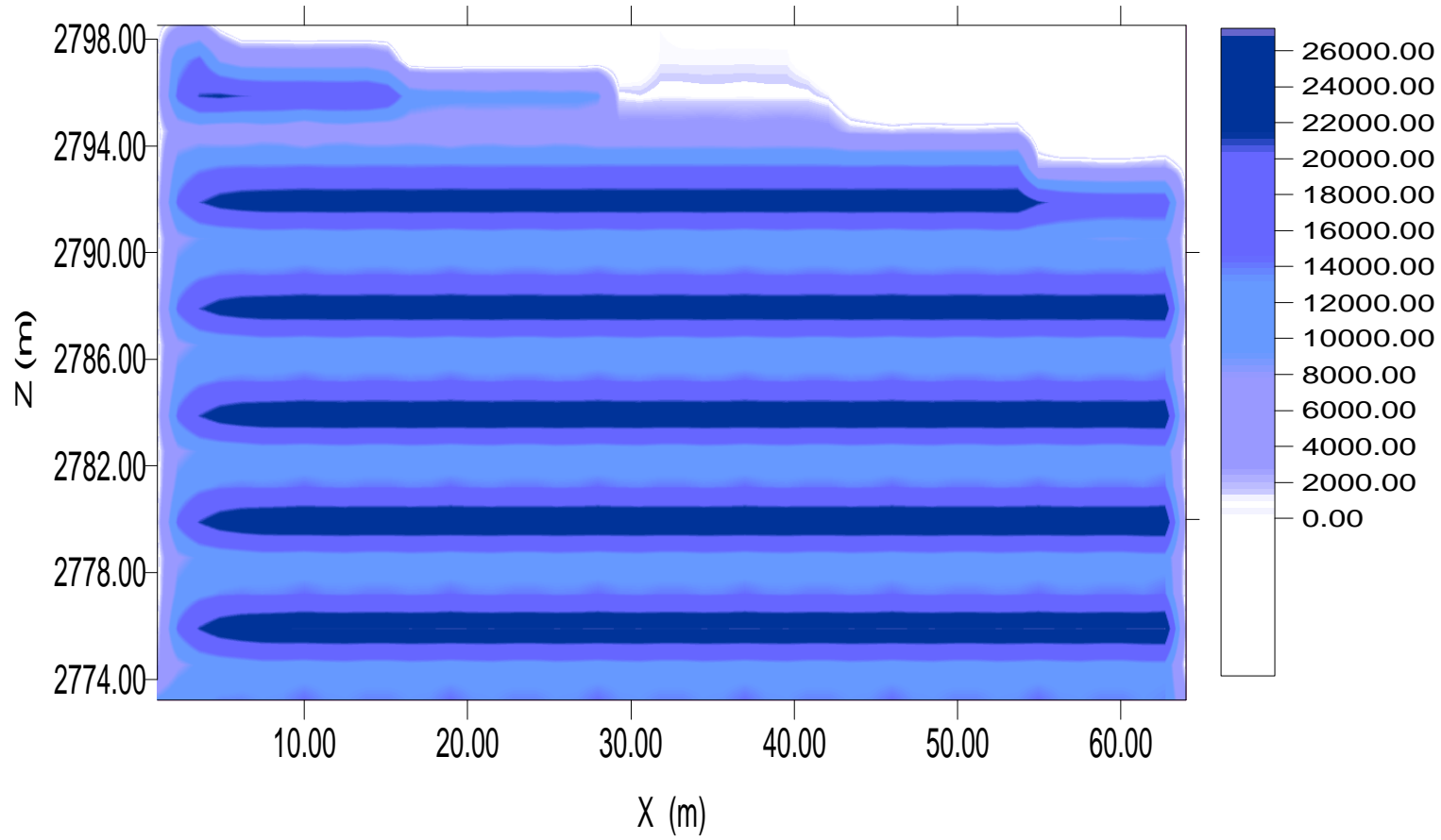
Figura No. 10 PRESION DE GAS A x = 60 m EN EL TIEMPO



◆ MES 1
 ■ MES 3
 ▲ MES 6
 × MES 9
 ✱ MES 12

MIC -2003-II-34

Figura No. 11 PRESION DE LIXIVIADOS A 12 MESES



MIC -2003-II-34

Figura No. 12 PRESION DE GASES A 12 MESES

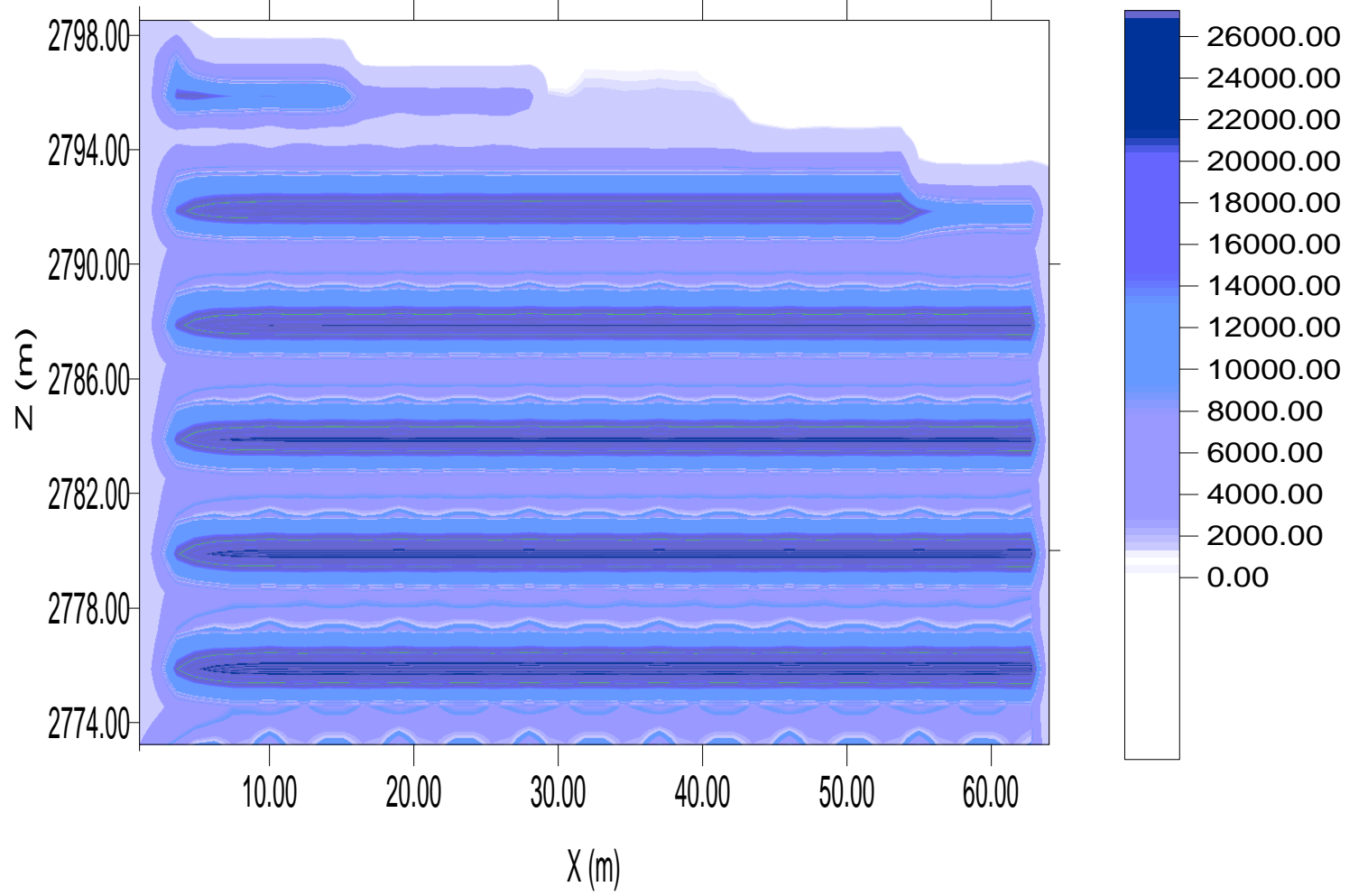


Figura No. 13 VARIACION DE LA MATERIA ORGANICA EN EL TIEMPO

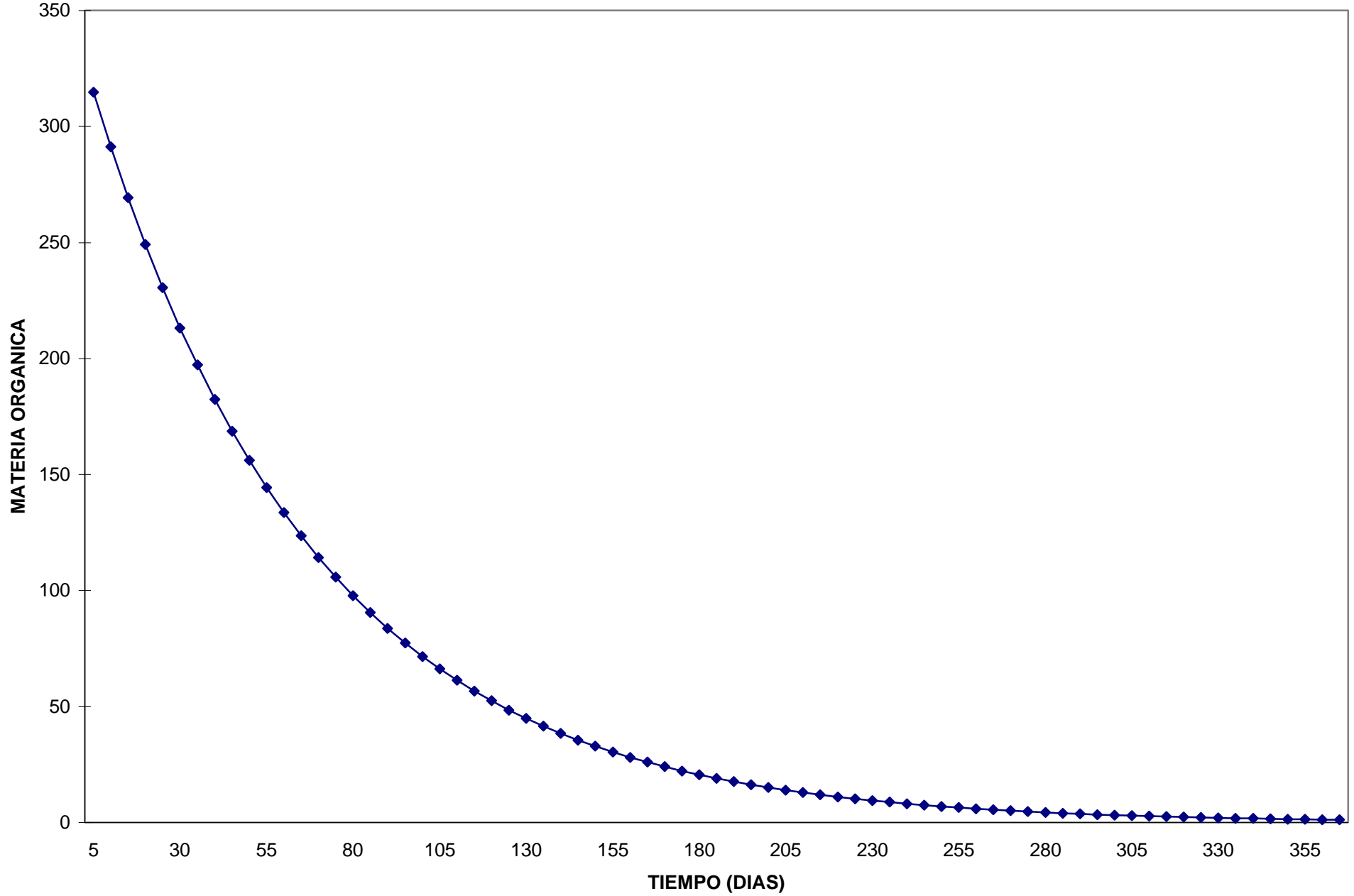


Figura No. 14 MATERIA ORGANICA Vs. ASENTAMIENTO

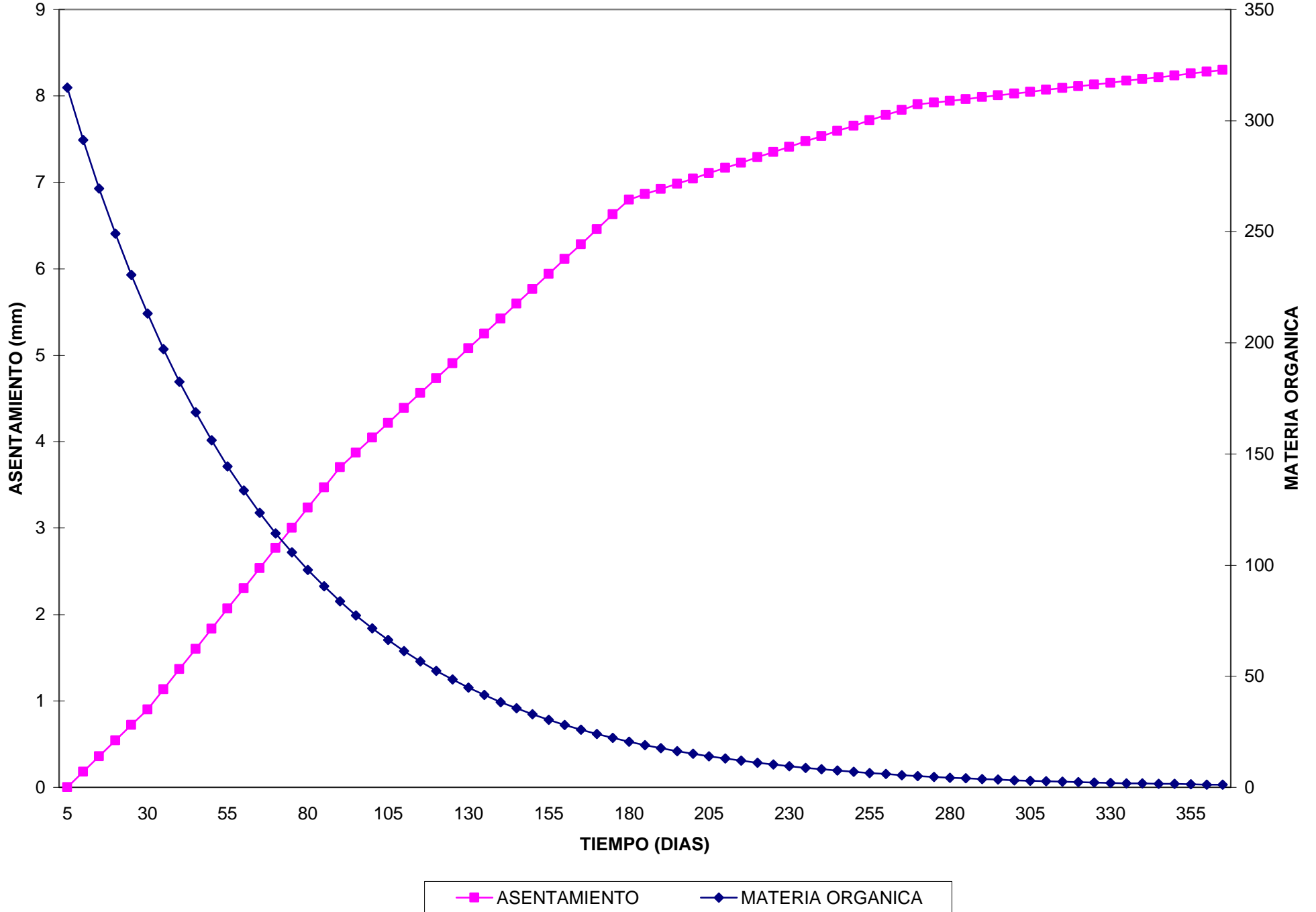


Figura No. 15 MATERIA ORGANICA Vs. HUMEDAD

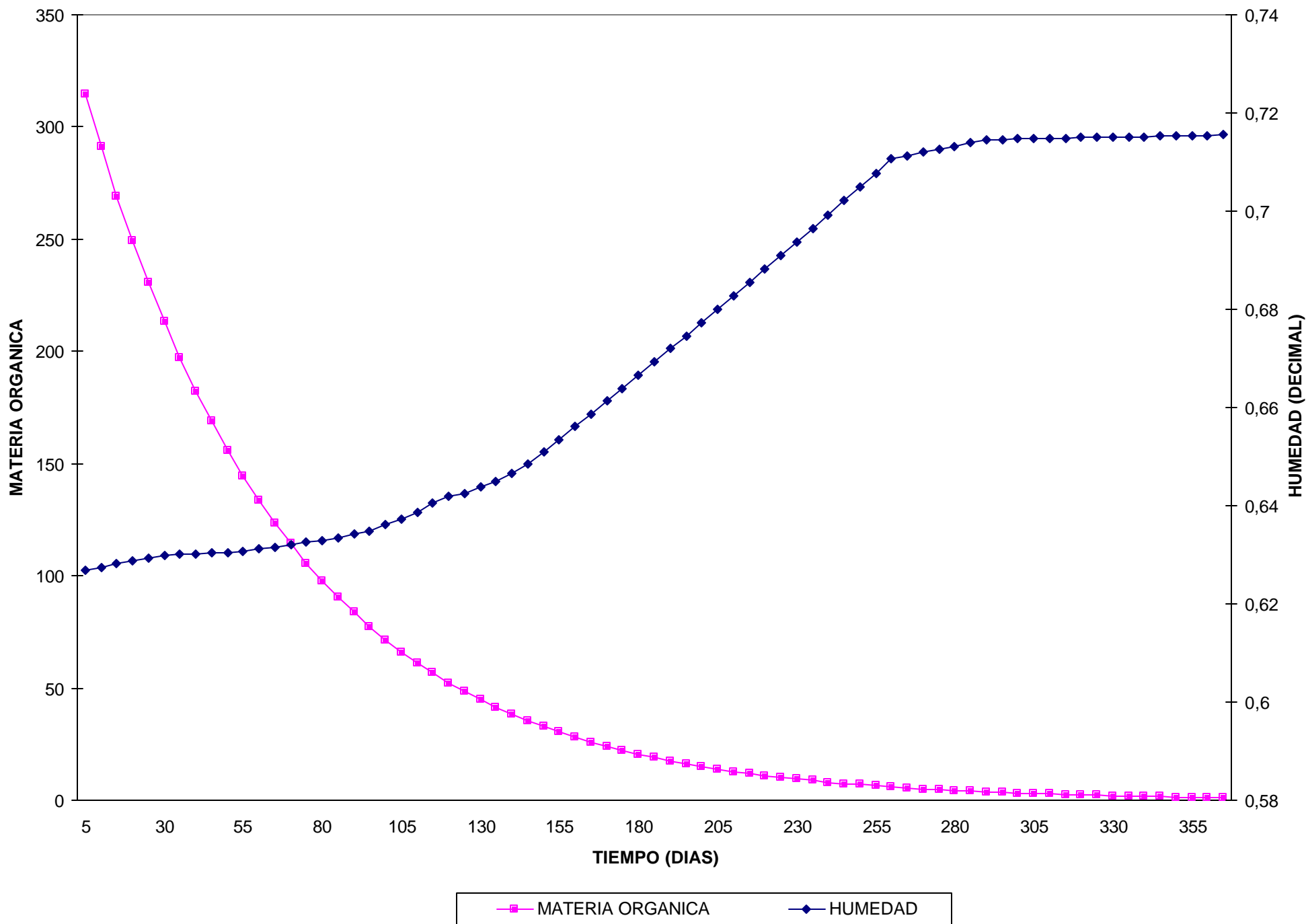


Figura No. 16 HUMEDAD Vs. ASENTAMIENTO

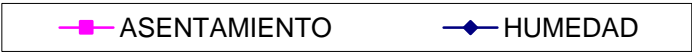
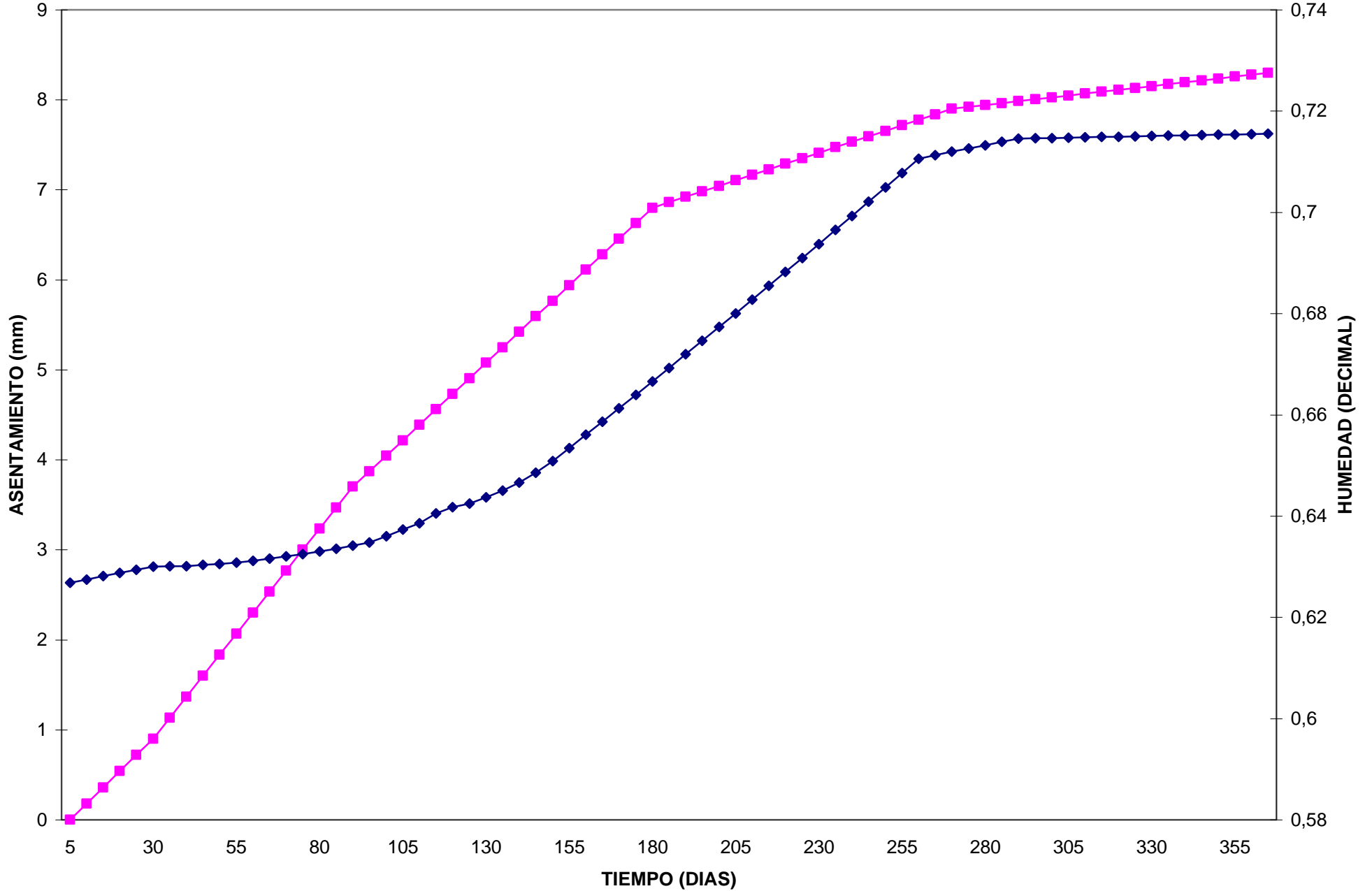


Figura No. 17 VARIACION DE LAS FASES SOLIDA, LIQUIDA Y GASEOSA

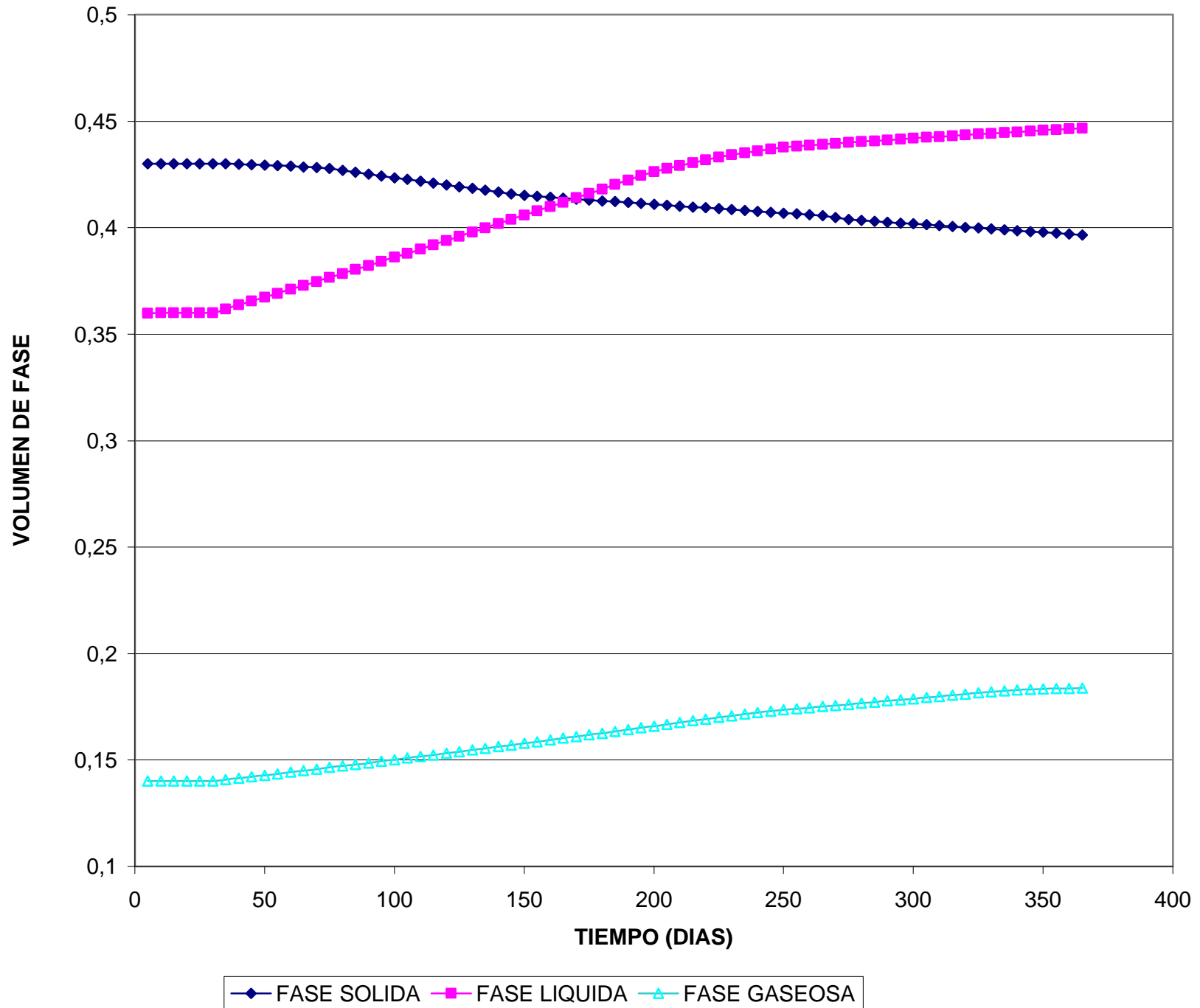
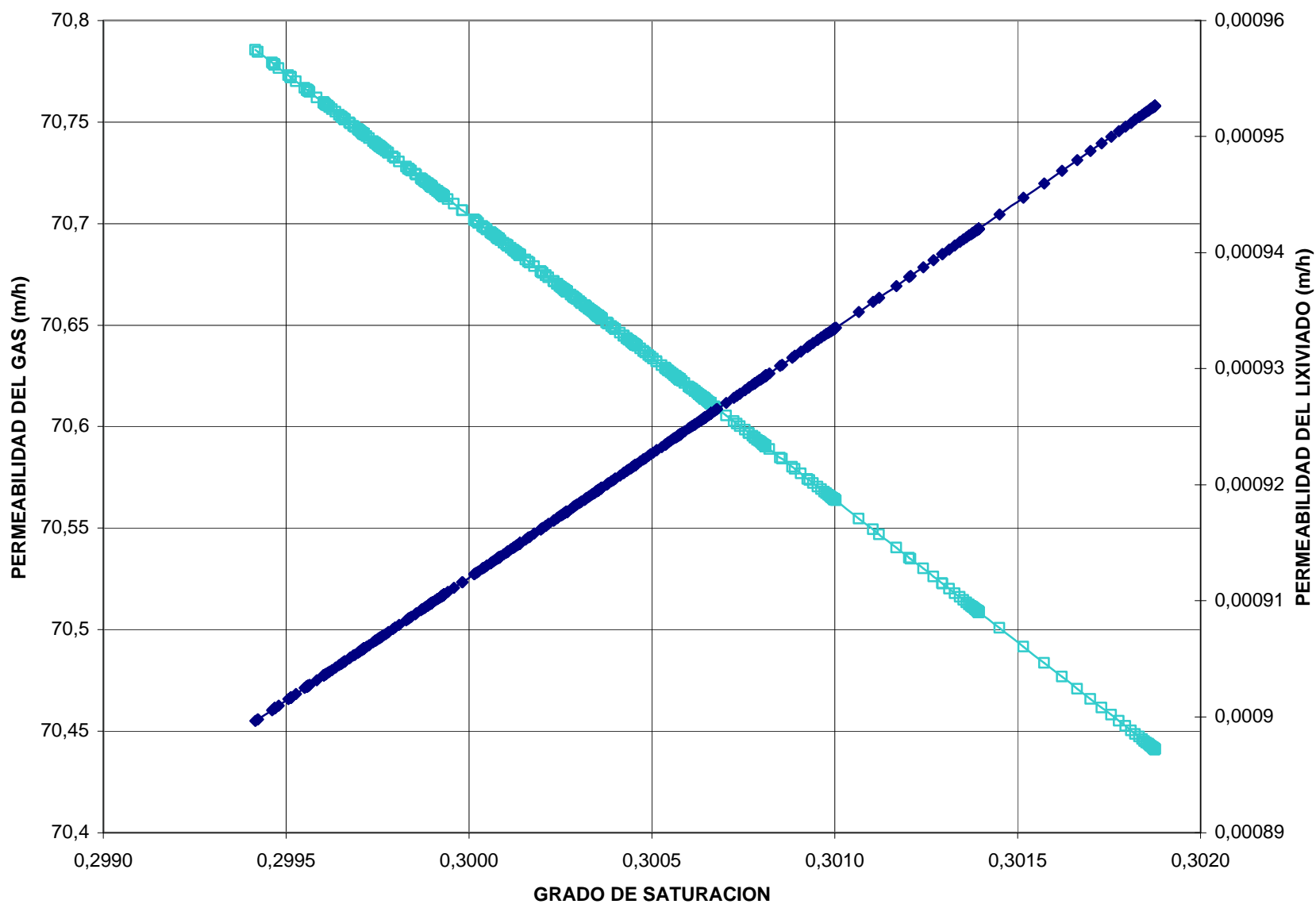
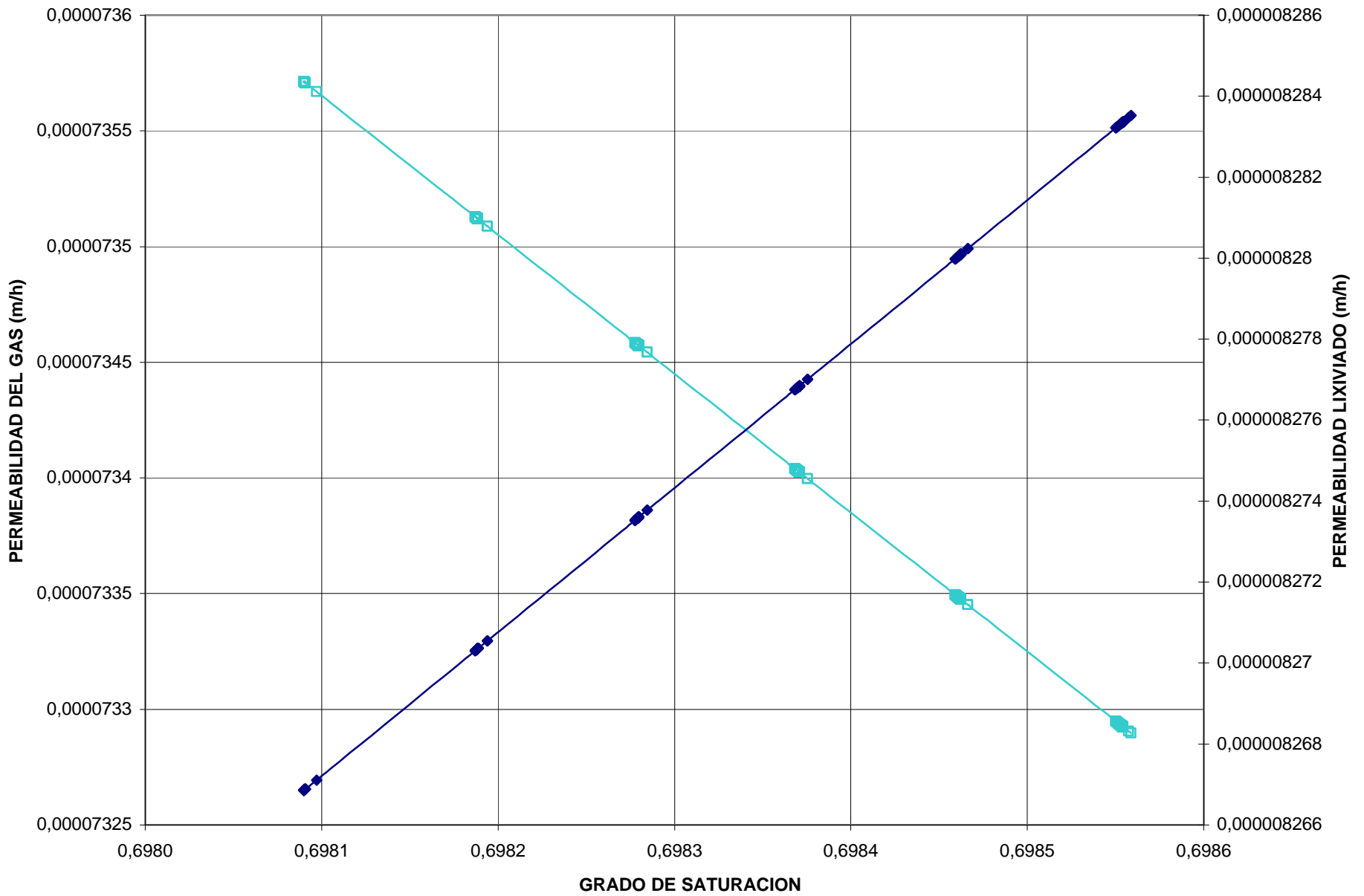


Figura No. 18 PERMEABILIDAD Vs. GRADO DE SATURACION RESIDUOS SOLIDOS



—□— GAS —◆— LIXIVIADO

Figura No. 19 PERMEABILIDAD Vs. GRADO DE SATURACION
CAPAS DE ARCILLA



—■— GAS —◆— LIXIVIADO