

ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DE UNA COLUMNA DE SUELO UBICADA EN EL SECTOR TESORO DE LA CIUDAD DE MEDELLÍN

Juan Sebastián Murillo

Universidad EAFIT, Medellín, Colombia
(e-mail: jmuril10@ eafit.edu.co).

Abstract: En el presente trabajo se implementa el meta-heurístico de “Recocido Simulado” para la estimación de 4 parámetros de una función de transferencia de una columna de suelo. Para la estimación se utilizaron como entradas del sistema la transformada de Fourier del registro de aceleración de la estación acelerográfica Santa Elena (ESE) y como salidas la transformada de los registros de la estación Tesoro EET.

Keywords: Estimación de parámetros, Columna de suelo, Función de transferencia compleja, Recocido simulado, Microzonificación.

1. INTRODUCCIÓN

La utilización de métodos Heurísticos tanto para la identificación de sistemas como para la estimación de parámetros es una metodología que ha venido tomando mucha fuerza desde hace algún tiempo, debido a que son métodos de solución aproximada que tienden hacer más eficientes computacionalmente que los métodos exactos utilizados tradicionalmente en los problemas de optimización y que consumen mucho tiempo de cómputo y no se hacen prácticos en la solución de muchos problemas de la vida real.

El objetivo de la identificación de sistemas de una manera simple se podría definir como el ajuste de los parámetros del modelo matemático del problema real, de modo que cuando se someta el modelo matemático a las entradas del sistema real, este responda de manera consistente aproximándose de forma consecuente con el comportamiento de las salidas reales.

En la estimación de parámetros utilizando algoritmos heurísticos la idea general es:

Obtener un vector de parámetros que hacen que los errores dados en la ecuación (1) sean mínimos de acuerdo a un criterio de minimización (función de coste). La optimización de la función de coste en la solución de diferentes problemas por lo general se ha realizado utilizando métodos numéricos como el de Newton–Raphson u otros algoritmos de solución numérica que utilizan estrategias de búsqueda exacta e implementan calculo de derivadas, funciones inversas y otros cálculos que tienen un costo computacional importante. En contraste con estas estrategias de búsqueda tradicionales que tienen ciertas desventajas como las mencionadas anteriormente, se ha optado por implementar una estrategia de búsqueda heurística que pueda tener una “buena”

aproximación comparada con los métodos tradicionales y pueda servir como solución a nuestro problema de optimización.

$$\varepsilon = y - \hat{y} \quad (1)$$

En la ecuación (1) el error ε representa la diferencia entre la salida real y y la salida estimada \hat{y} encontrada con alguna de las estrategias de búsqueda. En la (Fig. 1) se muestra un esquema simple del proceso de estimación utilizando algoritmos heurísticos.

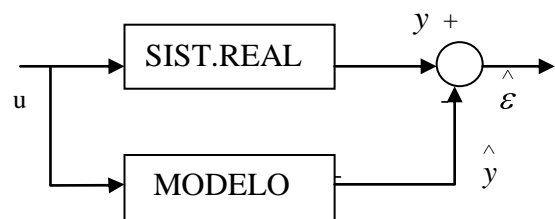


Fig. 1. Esquema simple de estimación de parámetros.

1.1. Algunos aspectos generales del problema

La estimación de los parámetros de la función de transferencia de los depósitos de suelo de la ciudad de Medellín ha sido de vital importancia dentro de los estudios de microzonificación realizados en la ciudad. La microzonificación sísmica de una manera simple consiste en estudiar los efectos locales de cada uno de los depósitos de suelo en las diferentes zonas del área que se delimitan para el estudio, con el propósito de que se pueda implementar una normatividad que permita definir recomendaciones precisas

para el diseño y construcción de edificaciones sismo resistentes en cada una de las zonas definidas en el estudio de microzonificación. Para dicho estudio el municipio de Medellín decidió entre los años de 1996 y 1999 instalar una red de 22 acelerógrafos en diferentes zonas de la ciudad, uno de los cuales está instalado en el basamento rocoso del Valle el acelerógrafo ESE (estación Santa Elena). Esta estación aceleró-gráfica es la que ha permitido calcular la función de transferencia empírica de cada uno de los depósitos de suelo, porque ha facilitado la realización del cociente de amplitudes de los espectros de Fourier de lo registrado en cada una de las estaciones instaladas en la superficie del Valle y esta estación ubicada en el afloramiento rocoso. Ésta metodología del cociente de las amplitudes de los espectros de Fourier es la que ha venido implementando el grupo de investigación de ingeniería sísmica de la Universidad Eafit durante todo el tiempo de operación de la red RAM (Red Acelerográfica de Medellín). En el presente trabajo la estimación de los parámetros de la función de transferencia del suelo se diferencia de la estimación de cocientes de espectros de Fourier, en el sentido de que en este caso la estimación se realiza utilizando un algoritmo heurístico.

2. CONSIDERACIONES DEL PROBLEMA

Un modelo matemático inicial que se ha considerado en los estudios dinámicos de los depósitos de suelo es el modelo de un oscilador simple o sistema de segundo orden, es decir un sistema masa resorte y amortiguador viscoso cuya función de transferencia está representada por la ecuación (2)

$$G_s(s) = \frac{k\omega_0^2 e^{-\alpha}}{s^2 + 2\xi\omega_0 s + \omega_0^2} \quad (2)$$

Esta función de transferencia ha sido utilizada para entender el comportamiento dinámico del problema pero basados en un supuesto menos realista, que considera que la rigidez del basamento rocoso es infinitamente grande en comparación con la rigidez del depósito de suelo y poder hacer la consideración de que la columna de suelo esta empotrada en la roca como se puede ver en la (Fig. 2). Con este modelo no se considera que el depósito de suelo pueda tener algún efecto sobre el basamento rocoso, lo que de cierta forma implicaría que cuando la onda pasa del medio rocoso al depósito de suelo quedaría “atrapada” dentro del depósito y se quedaría indefinidamente en un estado de reflexión y de difracción múltiple en dicho depósito.

Una función de transferencia alternativa y más acorde con el problema que se quiere analizar, considera que la roca es elástica y por consiguiente debe experimentar algún estado de deformación inducido por las ondas que se propagan a través de ese medio en este caso la roca. La función de transferencia alterna que se propone relaciona la diferencia de rigidez de los dos medios (suelo y roca) por medio de un parámetro denominado impedancia. Este nuevo parámetro que caracteriza al oscilador que en nuestro caso es un depósito de suelo es función de las propiedades mecánicas, es decir, de la densidad y el módulo de rigidez de ambos medios. Tomando en consideración lo anteriormente mencionado la función de

transferencia continua que nos interesa queda definida por la ecuación (3).

$$G_s(i\omega) = \frac{e^{ikrHr}}{\cos\frac{\omega}{C_s}Hs + I\text{isen}\frac{\omega}{C_s}Hs} \quad (3)$$

En donde los parámetros a estimar son: C_s , Hs , I y ζ_s

En las ecuaciones (4), (5) y (6) quedan definidos C_s , Hs y la impedancia I respectivamente. En donde C_s es la velocidad de propagación de las ondas de corte en el depósito de suelo, Hs es la altura del depósito ver (Fig. 3), I es la impedancia del sistema roca suelo y ζ_s el amortiguamiento.

En las ecuaciones (4) y (6) C_s^r e I^r son las partes reales de la velocidad de las ondas de corte y la impedancia respectivamente.

$$C_s = \sqrt{(C_s^r)^2(1+2i\zeta_s)} \quad (4)$$

$$Hs = \text{altura} \quad (5)$$

$$I = \sqrt{(I^r)^2(1+2i\zeta_s)} \quad (6)$$

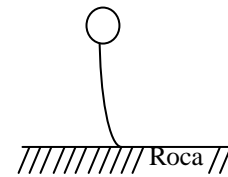


Fig. 2. Idealización del problema para roca con rigidez infinita.

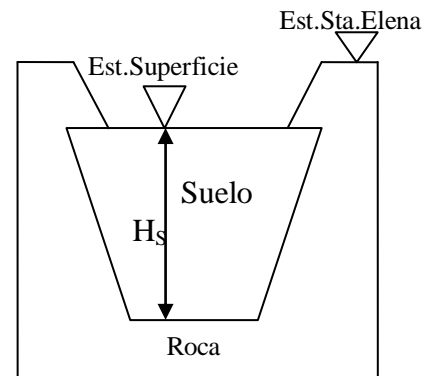


Fig. 3. Corte transversal de Valle.

La característica que interesa acerca de la función de transferencia del suelo es el módulo o amplificación con respecto a lo registrado en la roca. La amplitud de esta función de transferencia está dada por la ecuación (7) en donde se ha utilizado la representación de Euler para senos y cosenos dado que facilita su operación y se evita el trabajo con identidades trigonométricas. Este resultado es obtenido cuando se plantea el problema de propagación de onda con valor en la frontera.

$$|G_s(\omega)| = \frac{4A_{1r}}{e^{i\frac{\omega}{C_s}H_s(1+I)} + e^{i\frac{\omega}{C_s}H_s(1-I)}} \quad (7)$$

En la (Fig. 4) se puede observar la gráfica del módulo de la función definida en (7).

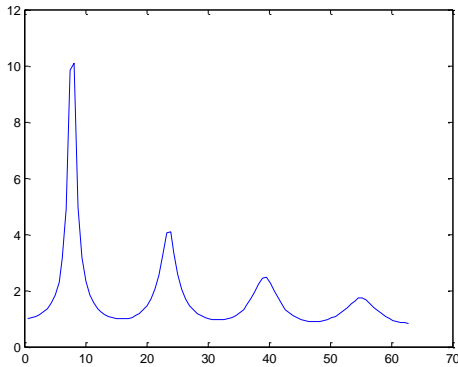


Fig. 4. Módulo de la función de transferencia para los siguientes parámetros: $\zeta_s = 5\%$, $C_s^r = 250$ m/s, $H = 50$ m.

Otra de las propiedades importantes que se deben considerar es que el depósito de suelo actúa como un filtro, cuando es perturbado por la acción de un sismo que incrementa la amplitud de la onda para cierto rango de frecuencias y la atenúa para otro rango de frecuencias J.M.Roesse (1969). En lo que nos interesa en este caso es el problema de amplificación que sobre la onda tiene el efecto del depósito de suelo.

2.1 Deducción de la función de transferencia

Las ondas sísmicas se dividen principalmente en dos grupos: ondas transversales **S** o de cortante y ondas longitudinales **P** o de compresión. Las ondas **P** se caracterizan por inducir esfuerzos de compresión en las estructuras, mientras que las ondas **S** inducen esfuerzos de tipo cortante que son los que consideran en este trabajo, dado que son los esfuerzos que mayor daño pueden causar a una edificación en comparación con los inducidos por las ondas **P**.

Para la deducción de la ecuación de onda sísmica solo se consideran movimientos transversales del suelo producidos por las ondas de cortante, como se mencionó anteriormente, ya que son estos movimientos los que más daño causan a las construcciones civiles. En la (Fig. 5) se puede observar el efecto que sobre un elemento diferencial del suelo tienen las ondas de corte cuando se propagan a través del mismo.

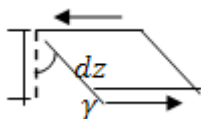


Fig. 4. Efecto cortante inducido por las ondas de corte sobre un elemento diferencial del suelo de altura dz .

La función de transferencia propuesta para roca elástica, tiene en cuenta tanto las propiedades mecánicas (densidad y modulo de corte) así como las geométricas, es decir, la altura de la columna de suelo.

Para el depósito de suelo se consideran como propiedades mecánicas la densidad ρ_s y el modulo de corte G_s y para la roca ρ_r y G_r , respectivamente. La altura del depósito se definió en la ecuación (5) como H_s . En la (Fig. 5) se muestra una esquematización del problema de propagación.

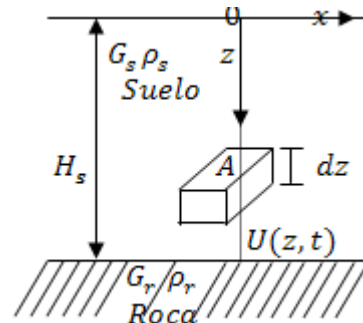


Fig. 5. Esquema del problema de propagación de onda.

Si se toma un elemento de volumen del suelo de altura dz y área A , La diferencia de desplazamientos entre las dos caras del elemento da una medida del esfuerzo cortante ver (Fig. 4) El esfuerzo cortante está dado por la ecuación (8).

$$\gamma = \frac{\partial U(z,t)}{\partial z} \quad (8)$$

y el cortante por

$$\tau(z,t) = G_s \frac{\partial U(z,t)}{\partial z} \quad (9)$$

Donde G_s es el modulo de corte del suelo y representa una relación esfuerzo deformación por unidad de área es decir, cuanto esfuerzo por unidad de área tengo que inducirle a un elemento del suelo para deformarlo en una unidad. Este modulo es una propiedad mecánica del medio en el cual se propaga la onda.

El fenómeno de propagación es un problema dinámico (cambia con el tiempo) y por esta razón deben aparecer la inercia y la aceleración, que son las que permiten plantear el equilibrio dinámico mediante la segunda ley de Newton dada en la ecuación (10).

$$\sum \vec{F} = m \vec{a} \quad (10)$$

Para poder plantear el equilibrio dinámico se podría pensar de forma inversa y formular un "desequilibrio" dado por la excitación que las ondas producen a medida que se propagan por el suelo; Este desequilibrio se puede representar por

$$\frac{\partial \tau(z,t)}{\partial z} dz \quad (11)$$

Si este “desequilibrio” es un valor mayor que cero, se tiene una fuerza neta en la dirección positiva del eje x ver (Fig. 6)

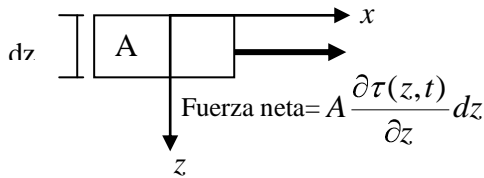


Fig. 6. Desequilibrio inducido en un elemento del suelo.

Igualando fuerzas se tiene

$$\rho A \frac{\partial^2 U(z,t)}{\partial t^2} dz = G_s A \frac{\partial^2 U(z,t)}{\partial z^2} dz \quad (12)$$

Reescribiendo (12) en términos de derivadas temporales y espaciales se obtiene la siguiente ecuación de onda

$$\rho \ddot{U} = G_s U'' \quad (13)$$

$U(z,t)$ debe satisfacer la ecuación de onda dada en (13) para todo el dominio. Todas las funciones que satisfacen la ecuación son llamadas ondas, cualquier función de la forma $U(z,t) = f(z-ct) + \delta(z+ct)$ cumplen con la ecuación y es llamada solución de d' Alembert de la ecuación de onda (Jean Le Rond d' Alembert 1717-1783).

Para este problema $U(z-ct) = U(z,t)$ es decir el movimiento se da en la dirección positiva del eje z, como se ilustró en la (Fig. 5). Reemplazando las formas funcionales $f(z-ct)$ y $\delta(z+ct)$ para ver que cumplen con la ecuación (13) se tiene lo siguiente:

$$U(z,t) = U_1(z-ct) + U_2(z+ct) \quad (14)$$

$$\dot{U} = \dot{U}_1(-c) + \dot{U}_2(c) \quad (15)$$

$$\ddot{U} = \ddot{U}_1 c^2 + \ddot{U}_2 c^2 \quad (16)$$

$$U' = U_1' + U_2' \quad (17)$$

$$U'' = U_1'' + U_2'' \quad (18)$$

De esta manera la ecuación (13) queda escrita de la siguiente forma

$$\rho c^2 (\ddot{U}_1 + \ddot{U}_2) = G_s (U_1'' + U_2'') \quad (19)$$

La ecuación (19) se cumple siempre que

$$c^2 = \frac{G_s}{\rho_s} \quad (20)$$

En la ecuación (20) se puede ver que la velocidad de propagación de la onda es función de las propiedades físicas del medio.

Para poder aplicar la transformada de Fourier, Se va a suponer que se sabe como es el desplazamiento en la base de la roca y que dicho desplazamiento es un movimiento armónico. Este movimiento armónico se puede expresar como

$$e^{i\omega t} = \cos(\omega t) + i \text{sen}(\omega t) \quad (21)$$

En (21) $i \text{sen}(\omega t)$ y $\cos(\omega t)$ representan la parte imaginaria y real del movimiento armónico.

Se propone entonces un movimiento expresado por la siguiente ecuación

$$U(z,t) = A_1 e^{-ik(z-ct)} + A_2 e^{ik(z+ct)} \quad (22)$$

$$k = \frac{\omega}{c} \quad (23)$$

En el segundo miembro de la ecuación (22) el primer término representa la onda que sube y el segundo la onda que baja y A_1, A_2 representan las amplitudes tanto de la onda que sube como la que baja. La onda que baja es debida al fenómeno de reflexión que se da en el cambio de medio roca-suelo.

Las condiciones de frontera quedan planteadas de la siguiente manera

$$\tau = 0 \text{ en } z = 0 \quad (24)$$

Es decir

$$G_s \frac{\partial U}{\partial z} = i k e^{i\omega t} (-A_1 e^{-ikz} + A_2 e^{ikz}) = 0 \quad (25)$$

Esto implica que

$$-A_1 e^{-ikz} + A_2 e^{ikz} = 0 \quad (26)$$

De donde se puede concluir que

$$A_1 = A_2 = A \quad (27)$$

En la ecuación anterior la amplitud de la onda que sube es igual a la amplitud de la onda que baja y por lo tanto U puede ser expresada como

$$U = A e^{i\omega t} (e^{-ikz} + e^{ikz}) \quad (28)$$

La otra condición de frontera es el desplazamiento en $z = 0$, Es decir en la superficie del suelo el desplazamiento está dado por

$$U = 2A e^{i\omega t} = A_{\text{sup}} e^{i\omega t} \text{ en } z = 0 \quad (29)$$

En la superficie la amplitud de la onda es el doble debido a que la onda toca la superficie libre. En (29) $A_{\text{sup}} = 2A$.

La condición de frontera en $z = H_s$ está dada por

$$U_r = \frac{A_s}{2} e^{i\omega t} (e^{-ik_s H_s} + e^{ik_s H_s}) \quad (30)$$

El desplazamiento en roca es igual al desplazamiento del suelo en $z = H_s$. En (30) el término $\frac{A_s}{2} e^{i\omega t}$ representa el desplazamiento en el suelo y $e^{-ik_s H_s} + e^{ik_s H_s}$ la función de transferencia del suelo.

$$\therefore FDT = \frac{U_s}{U_r} = \frac{2}{e^{-ik_s H_s} + e^{ik_s H_s}} = \frac{1}{\cos\left(\frac{\omega}{C} H_s\right)} \quad (31)$$

En la (Fig. 7) se puede ver el módulo de la función de transferencia definida en (31).

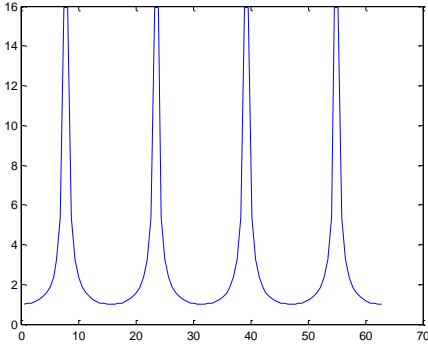


Fig. 7. Módulo de la función de transferencia para un $\zeta_s = 0$, $C_s^r = 250 \text{ m/s}$, $H_s = 50 \text{ m}$. Este módulo corresponde al modelo de roca rígida y sin presencia de amortiguamiento en el suelo.

Los períodos fundamentales de la columna de suelo se pueden determinar a partir de la siguiente ecuación

$$\frac{\omega H_s}{c} = 2(n-1) \frac{\pi}{2} \quad (32)$$

Cuando se excitan las frecuencias que cumplen la desigualdad anterior la amplitud es ∞ como se puede ver en la (Fig. 7). Los períodos fundamentales del suelo se pueden escribir como

$$T = \frac{4H_s}{(2n-1)c} \quad (33)$$

Si se proponen los siguientes parámetros tanto para la roca como para el suelo, así como otro sistema adicional de referencia para lo ocurrido en la roca se tiene el esquema mostrado en la (Fig. 8).

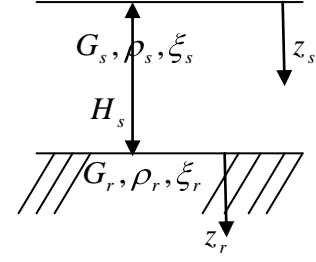


Fig. 8. Esquema que relaciona las propiedades mecánicas de ambos medios.

Tomando el desplazamiento en el suelo como

$$U_s(z_s, \omega) = \frac{A_s}{2} (e^{ik_s z_s} + e^{-ik_s z_s}) \quad (34)$$

y el desplazamiento en la roca dado por

$$U_r(z_r, \omega) = A_{1r} e^{ik_r z_r} + A_{2r} e^{-ik_r z_r} \quad (35)$$

La expresión que se está buscando es una relación entre A_s que es la amplitud del suelo y A_{1r} que es la amplitud de la onda que sube.

En el cambio de medio o la frontera, tanto el desplazamiento como los esfuerzos son iguales y por lo tanto se tiene que

$$\frac{A_s}{2} (e^{ik_s H_s} + e^{-ik_s H_s}) = A_{1r} + A_{2r} \quad (36)$$

Derivando se obtiene la siguiente expresión

$$\frac{ik_s G_s A_s}{2} (e^{ik_s H_s} - e^{-ik_s H_s}) = ik_r G_r (A_{1r} - A_{2r}) \quad (37)$$

Eliminando A_{2r} que es la onda que baja y no interesa para este problema, se multiplica (36) por $ik_r G_r$ y se le suma a la ecuación (37). De esta manera se obtiene

$$\frac{A_s}{2} (e^{ik_s H_s} (k_r G_r + k_s G_s) + e^{-ik_s H_s} (k_r G_r - k_s G_s)) = 2A_{1r} k_r G_r \quad (38)$$

Por lo tanto la amplificación del suelo está dada por la siguiente función de transferencia

$$A_s = \frac{4A_{1r}}{e^{ik_s H_s} (1+I) + e^{-ik_s H_s} (1-I)} \quad (39)$$

en donde

$$I^2 = \frac{G_s \rho_s}{G_r \rho_r} \quad (40)$$

Este nuevo parámetro relaciona las propiedades físicas del medio y por lo general es una relación ≤ 1 .

3. RECOCIDO SIMULADO (simulated annealing).

3.1 Historia y conceptos

El recocido simulado hace uso de conceptos que fueron utilizados originalmente en la mecánica estadística (Díaz Adenso, 1996). El término recocer es un proceso térmico para obtener estados de baja energía en un sólido, mediante un baño térmico. Este proceso físico-químico de recocido

Primero reblandece el sólido elevando la temperatura del mismo, para luego enfriarlo lentamente hasta que sus partículas vayan alcanzando por si solas el estado fundamental de sólido. Durante el proceso de recocido, el sólido puede alcanzar el equilibrio térmico si el enfriamiento se produce lentamente, de lo contrario el sólido alcanzará estados intermedios en lugar del estado fundamental que es en el que el sólido se encuentra en un estado mínima energía.

El proceso de recocido ha sido simulado mediante el algoritmo de Metrópolis. En el algoritmo de Metrópolis el equilibrio térmico se alcanza mediante un número grande de transiciones, utilizando la distribución de Boltzmann. El algoritmo de Metrópolis pasa de un estado a otro utilizando las siguientes reglas:

Si el estado generado posee una energía menor que el estado actual, se acepta el estado generado como el estado actual; en caso contrario el estado generado se aceptará con cierta probabilidad utilizando la distribución de Boltzmann. Esta probabilidad es función de la temperatura y de la diferencia entre los niveles de energía. Cuanto menor sea la temperatura menor será la probabilidad de pasar de un estado de mayor energía, y cuanto mayor sea la energía del nuevo estado menor será la probabilidad de que sea aceptado.

En el siguiente cuadro se muestra la analogía entre la termodinámica y la optimización para el proceso de Recocido.

Tabla 1. Analogía entre Termodinámica y Optimización

TERMODINAMICA	OPTIMIZACIÓN
Configuración	Solución Factible
Configuración Fundamental	Solución Óptima
Energía de la Configuración	Coste de la Solución
Temperatura	?

4. IMPLEMENTACIÓN

Para la implementación lo primero que se hizo fue asegurarse de que los datos utilizados estuvieran muestreados correctamente. Los Equipos aceleró-gráficos de la RAM tienen una velocidad de muestreo de 200 muestras por segundo, es decir son capaces de muestrear señales sísmicas que contengan frecuencias hasta de 100 Hertz lo cual indica que son equipos bastante rápidos ya que por lo general una señal sísmica no contiene frecuencias superiores a 15 Hertz. De esta manera se puede asegurar que no se introdujo en la toma de datos el fenómeno de solapamiento o "aliasing". Para la estimación de los parámetros de la columna de suelo de la estación tesoro (EET) se tomaron datos de eventos sísmicos ocurridos entre los años de 1998 al 2001 hizo. Todo

el procesamiento de las señales sísmicas, se realizó por medio del software SSERIES desarrollado por el grupo de investigación de ingeniería sísmica de la universidad Eafit.

Los pasos realizados para el procedimiento de estimación de los parámetros son:

Procesar los registros de aceleración tanto de la estación Santa Elena (ESE) como los de la estación Tesoro EET, por medio del software SSERIES.

Obtenidos los registros de aceleración de las tres componentes (vertical, Norte-Sur, Este-Oeste) de ambas estaciones, se procede a transformarlos al dominio de la frecuencia por medio de la transformada rápida de Fourier que implementa el SSERIES.

Se toman los espectros de Fourier de las componentes Norte-Sur y Este-Oeste de las dos estaciones.

Teniendo el espectro de Fourier de las componentes Norte-Sur y Este-Oeste, se procede a tomar las amplitudes de dichos espectros mediante la opción ASCII DEL SSERIES, que proporciona un archivo del tipo ASCII que contiene toda la información numérica del espectro.

Obtenidas las amplitudes de los espectros de ambas componentes se procedió a promediar las para facilitar la estimación.

Para algunos de los registros, el espectro de Fourier se suavizó por medio de la opción *Smooth Fact* del SSERIES, que promedia puntos a ambos lados de cada frecuencia.

Dados los promedios de amplitudes de las componentes de aceleración especificadas, se toma como entrada al sistema el promedio de amplitudes de la estación Santa Elena (ESE) y como salida el promedio de la estación Tesoro (EET).

En la (Fig. 8) se puede apreciar un diagrama de flujo del procedimiento de identificación.

5. ANALISIS Y RESULTADOS

Para la estimación de los 4 parámetros mencionados anteriormente, se probaron varios valores para los parámetros pero propios del algoritmo de Recocido Simulado. Entre los cuales están la temperatura inicial del proceso de Recocido, esquema de enfriamiento, vector de solución inicial y número de iteraciones tanto en el algoritmo de Metrópolis como en el del Recocido. En las siguientes graficas se mostraran algunos de los resultados obtenidos.

En la (Fig. 9), (Fig. 10), (Fig. 11) se puede observar la estimación para una función de transferencia en roca rígida, para el sismo 1 del año 1998. Como era de esperarse la impedancia es casi cero para este modelo de roca rígida y se toma como mejor estimación la del menor costo. Solo se mostraran el vector estimado para los 4 parámetros debido a la imposibilidad de mostrar toda la tabla.

En la (Fig. 12), (Fig. 13), (Fig. 14) se muestra la estimación para el mismo sismo 11999 pero para el modelo de roca elástica. Como se puede observar en este modelo ya hay participación de la impedancia y aunque es relativamente pequeña, era de esperarse ya que la diferencia de rigidez de la roca con la del suelo del Tesoro es significativamente grande.

En la (Fig. 15), (Fig. 16) se muestran la estimaciones para el sismo 21998 pero sin suavizar los espectros de Fourier. Como se puede observar en estas estimaciones aunque el costo de la solución es mayor comparado con la de los espectros suavizados los valores de los parámetros son similares en ambas estimaciones.

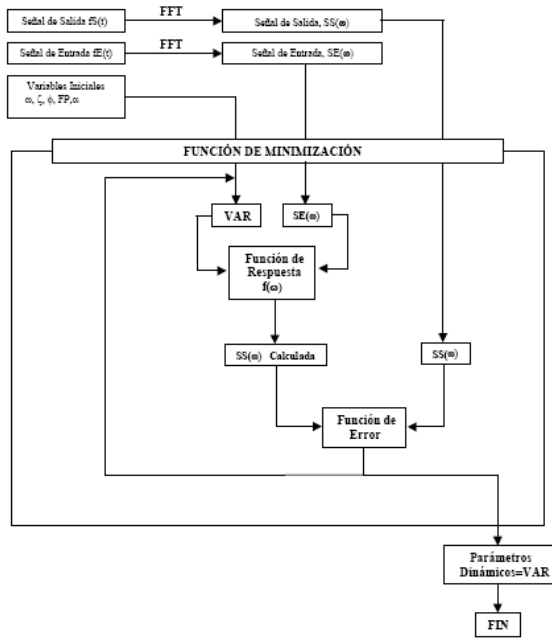


Fig. 8. Diagrama de flujo del procedimiento de estimación. Tomado y adaptado de: identificación de propiedades dinámicas de estructuras considerando efectos de interacción suelo estructura.

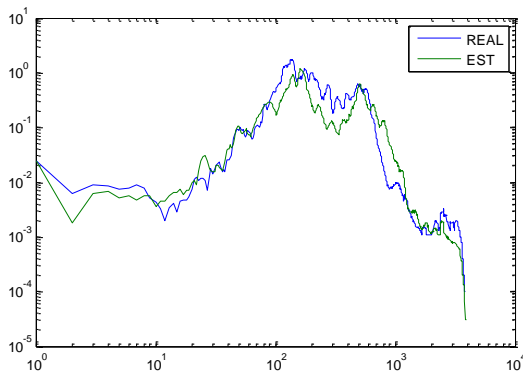


Fig. 9. Estimación de la función de transferencia de la estación (EET) para roca rígida. Sismo 11999.

Hs	Cs	ζ	I	Costo
0.1394	0.3566	0.0481%	0.0248	59.3911

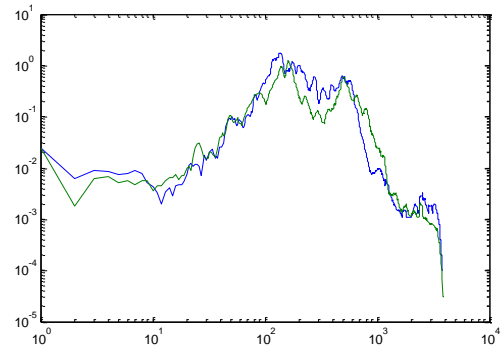


Fig. 10. Estimación de la función de transferencia de la estación (EET) para roca rígida. Sismo 11999.

Hs	Cs	ζ	I	Costo
0.0.598	0.1522	0.0492%	0.0227	59.4232

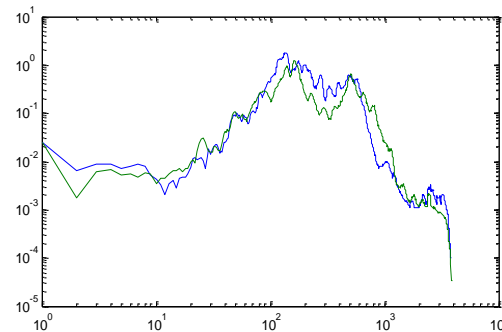


Fig. 11. Estimación de la función de transferencia de la estación (EET) para roca rígida. Sismo 11999.

Hs	Cs	ζ	I	Costo
0.1157	0.2964	0.0465%	0.0252	59.4174

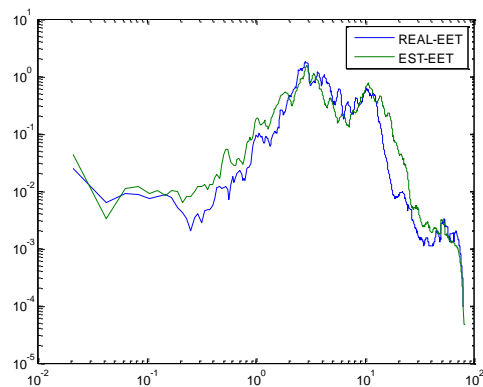


Fig. 12. Estimación de la función de transferencia de la estación (EET) para roca elástica. Sismo 11999.

Hs	Cs	ζ	I	Costo
0.0862	0.2166	0.05%	0.1253	35.5553

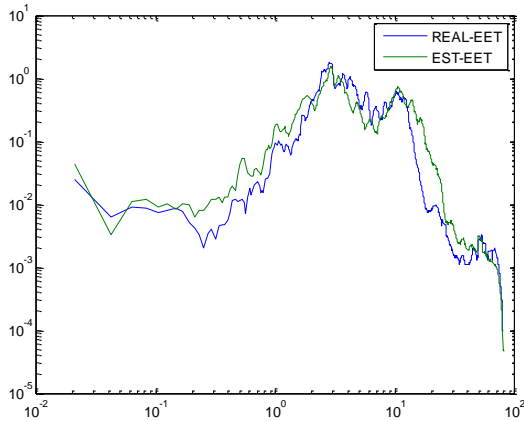


Fig. 13. Estimación de la función de transferencia de la estación (EET) para roca elástica. Sismo 11999

Hs	Cs	ζ	I	Costo
0.1254	0.3149	0.05%	0.1318	37.5253

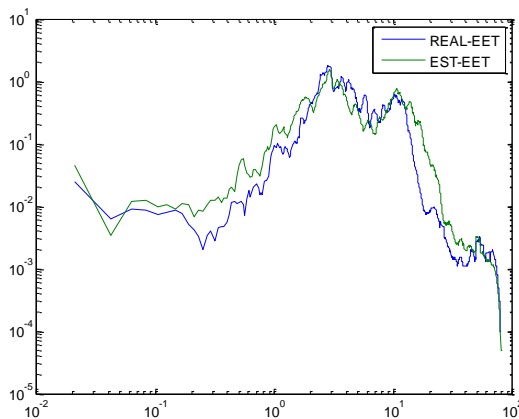


Fig. 14. Estimación de la función de transferencia de la estación (EET) para roca elástica. Sismo 11999.

Hs	Cs	ζ	I	Costo
0.15	0.3773	0.05%	0.1467	37.6757

6. VALIDACIÓN

Para la validación de los parámetros estimados se obtuvo toda la información del libro de microzonificación sísmica del área urbana urbana de Medellín. Este libro contiene 7 capítulos donde está contenida toda la información del estudio de microzonificación de toda el área de Medellín.

La estimación de las propiedades dinámicas de los diferentes suelos de Medellín se obtuvieron por medio de pruebas geofísicas y ensayos de campo y de laboratorio, como son el ensayo de torsión o prueba triaxial cíclica así como pruebas de penetración estándar realizadas con taladro rotatorio con punta de diamante. Las mediciones de los parámetros estimados anteriormente se realizaron de manera directa en el estudio de microzonificación de la ciudad. Estas pruebas

tienen varias desventajas en cuanto a que son muy costosas y no siempre dan buenos resultados, debido a que muchas de las muestras analizadas en el laboratorio ya se han sido perturbadas por el solo hecho de sacarlas de su estado natural.

Para la validación de la velocidad de las ondas de corte, se compararon los resultados obtenidos con las velocidades encontradas en el capítulo 4 del libro de microzonificación. En la (Fig. 17) se puede apreciar las relaciones de velocidad de las ondas de corte con la profundidad del suelo para diferentes zonas de la ciudad. Para este caso la relación de velocidades corresponde al sector sur-oriental de la ciudad que es donde está ubicada la estación Tesoro (EET). Como se puede apreciar las velocidades encontradas para esta zona oscilan entre los 200m/s y 500m/s. Lo cual indica que la estimación realizada por el algoritmo se encuentra entre los valores dados para esta zona.

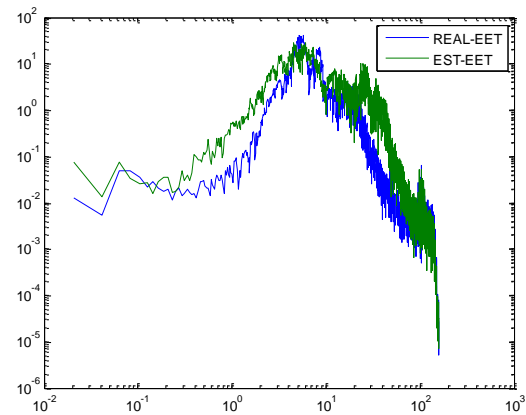


Fig. 15. Estimación de la función de transferencia de la estación (EET) para roca elástica. Sismo 21998.

Hs	Cs	ζ	I	Costo
0.0932	0.1835	0.05%	0.1818	384.92

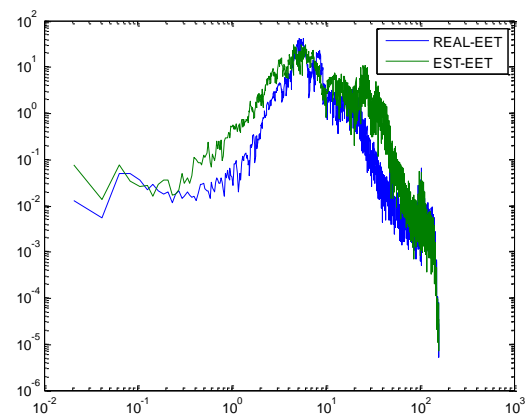


Fig. 16. Estimación de la función de transferencia de la estación (EET) para roca elástica. Sismo 21998.

Hs	Cs	ζ	I	Costo
0.0809	0.1595	0.05%	0.298	385.90

Para validar las estimaciones realizadas de la altura del depósito de suelo se compararon los resultados obtenidos con los resultados de 915 perforaciones realizadas en diferentes zonas de la ciudad. En la tabla 2 se pueden ver los datos obtenidos para diferentes perforaciones entre las cuales está la zona de la estación (EET). Aunque los resultados obtenidos para la altura del depósito de suelo difieren de los encontrados en el estudio de microzonificación, se puede afirmar que este parámetro en ciertas circunstancias no se sabe con certeza cuál es su valor debido a que en muchas de las perforaciones realizadas, el perforamiento se detuvo cuando la punta de diamante del taladro se gastó. Este criterio de detener la perforación en el momento en que se deterioró la punta del taladro es un poco subjetivo dado que el suelo a ciertas profundidades ya no se diferencia de la roca debido a la consolidación que tiene a profundidades considerables.

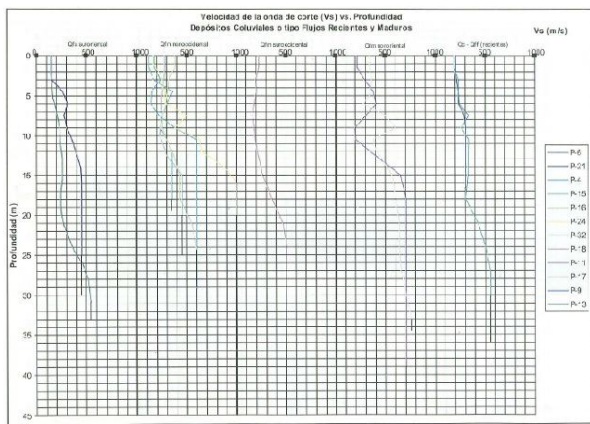


Figura 4.6 Variación de la velocidad de onda de corte con la profundidad para depósitos coluviales o tipo flujos recientes y maderos de Medellín.

Fig. 17. Relación de velocidades con la profundidad del suelo para las diferentes zonas de la ciudad.

Tabla 2. Perforaciones realizadas en diferentes zonas

Tabla 4.3 Información general de las perforaciones ejecutadas en los sitios de localización de acelerógrafos y en zonas con información geotécnica insuficiente

PERFORACIÓN	UBICACIÓN	NOMBRE	No.	COORDENADA		COTA	PROFUNDIDAD (m)		AMBIENTE GEOLÓGICO
				NORTE	ESTE		PERFORAC.	REVEST.	
Colegio Padre Maryanet	MAN	P-1	1179740	830380	1590	46.90	44.60	KdA	
Universidad de Medellín	UDM	P-2	1181000	830120	1570	30.00	30.00	KdA	
Sena sede Av. Colombia	SCE	P-3	1183790	834290	1485	30.00	25.55	QdI	
Sena Pedregal	SPE	P-4	1188930	835050	1572	35.10	-	QlM	
Seminario Mayor	SEM	P-5	1182080	836400	1870	48.00	48.00	KgD	
Tanque El Tesoro (EPM)	EET	P-6	1177460	836490	1786	44.75	42.00	QlS	
Confarme de Aranjuez	COM	P-7	1190700	835020	1550	38.00	38.00	KuM	
Centro de control Santa Rosa de Lima (EPM)	ECC	P-8	1185040	831070	1535	18.60	18.20	KPnI	
Planta de tratamiento La Montaña (EPM)	EMO	P-9	1196500	836390	1973	19.50	19.50	KuM	
Fundación Solidaridad por Colombia	SOL	P-10	1199100	836440	1450	22.90	22.90	Qc-QdI	
Planta de tratamiento Vía Hermosa (EPM)	EVH	P-11	1184100	837220	1705	41.00	41.00	QlM	
Tanque de agua Vía Tina (EPM)	EVT	P-12	1182120	838080	1750	28.55	19.00	KuM	
Liceo universidad de Medellín	LIC	P-13	1181240	837730	1655	38.55	38.30	QlI	

Para validar el amortiguamiento del suelo se compararon los resultados con información encontrada en el capítulo 5 de libro de microzonificación. En este capítulo se pudo encontrar información que confirmó que la estimación para el amortiguamiento es correcta. En el parágrafo 5.1.5 de la definición de las formas espectrales se definió que el amortiguamiento para el espectro de diseño es del 5% que es precisamente el estimado por el algoritmo implementado.

7. CONCLUSIONES

Implementar algoritmos heurísticos tanto para la identificación de sistemas como para la estimación de parámetros es una metodología muy importante ya que como se pudo comprobar en este trabajo presenta muchas ventajas en cuanto a costos y tiempo de estimación de los parámetros.

La estimación de las propiedades dinámicas del depósito de suelo de la estación del tesoro se logra estimar de manera acertada y consecuente con los estudios realizados en la microzonificación sísmica de la ciudad.

Se estimó las propiedades dinámicas de la estación tesoro debido a que es la estación que tiene la mayor amplificación de la señal con respecto a lo registrado en la roca.

8. AGRADECIMIENTOS

Al profesor Juan Diego Jaramillo quien fue el guía y la persona que me acompañó en todo este proceso.

Al Profesor Carlos Mario Vélez que con su conocimiento y esfuerzo ha logrado que los estudiantes de Ingeniería Matemática logren todos sus proyectos.

Al profesor Fredy Hernan Marín que nos ha apoyado y colaborado en todos los problemas e inconvenientes que como estudiantes hemos tenido

8. REFERENCIAS

Kuo, B. (1996). *Sistemas de control automático*, prentice-Hall. Mexico.

J. M. Rosse. (1969). *Fundamentals of soil amplification*, Massachusetts Institute of Technology.

Alvarez y Velez. *Identificación de parámetros de un mini-helicóptero robot usando el método heurístico de búsqueda TABU*. Universidad Eafit.

Restrepo y Jaramillo. *Identificación de propiedades dinámicas de estructuras considerando efectos de interacción suelo- estructura*.

Estrada, G. *Aplicaciones de los estudios de microzonificación sísmica en la reducción del riesgo sísmico*. Integral S.A. Medellín Colombia.

Suarez M y Avilés J. *Respuesta acoplada de traslación y torsión de estructuras asimétricas incluyendo la interacción con el suelo*. Revista de ingeniería sísmica N.º.6725-52(2002).

Benito B y Cabañas L. *Caracterización del movimiento del suelo en ingeniería sísmica*.

Otalvaro I, Martínez C, Osorio R, Hincapie J. *Efecto de la meteorización en las propiedades dinámicas de un suelo Gabrónico*. Revista universidad Eafit. 2004.

Ramirez, R; Santana, G y Chacón, O. *Mapa de amplificación sísmica del valle central de Costa Rica*.

Alfaro, A; Egozcue y Ugalde, A. *Determinación de características dinámicas del suelo a partir de microtembores*.

Osorio, R; Cano, C; Gonzales, R.; Mesa, J. *Propuesta de una metodología para el análisis dinámico de sistemas de fundación de pilas*. Revista Universidad Eafit. 2005.

Otalvaro, I; Nanclares, F. *Evaluación de la respuesta dinámica de sitio para el sector de Aragón en Medellín*.

Cardona, O. *Vulnerabilidad sísmica estructural y diseño del refuerzo sismorresistente de la catedral Basílica de Manizales, Colombia*.