

# Instrumentación y microzonificación sísmica del Valle de Aburrá

Manuel R. Villarraga H.

Juan Diego Jaramillo

Josef Farbiarz

Luis Fernando Restrepo

CONSORCIO MICROZONIFICACIÓN 2006

METROPOLITANA  
del Valle de Aburrá



UNIVERSIDAD  
NACIONAL  
DE COLOMBIA  
SEDE MEDELLÍN



[www.metropol.gov.co](http://www.metropol.gov.co)

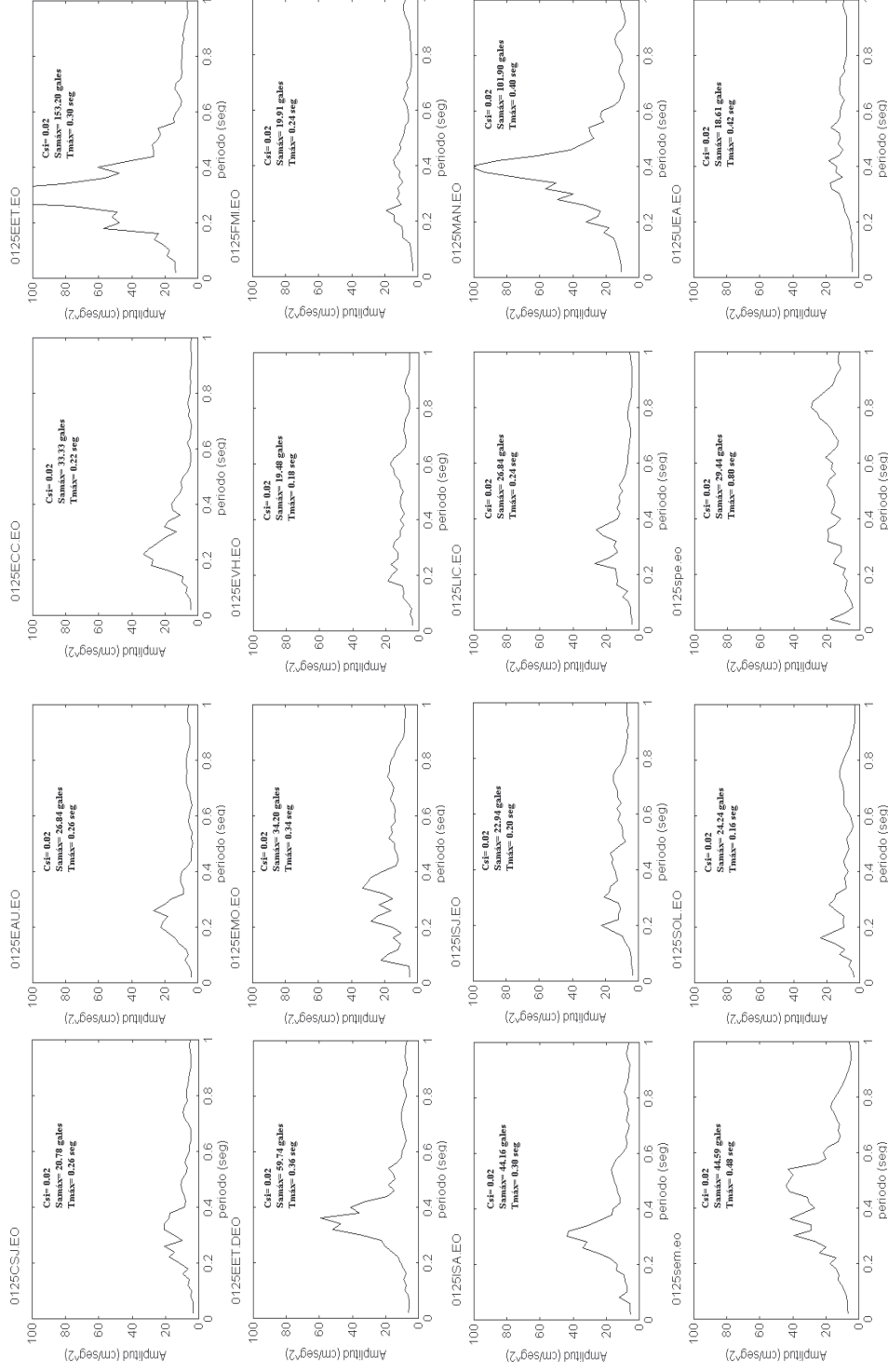


# CONTENIDO

- ✓ Antecedentes microzonificación sísmica
  - Efectos locales
  - NSR-98
  - Microzonificación Medellín
  - Microzonificación Valle de Aburrá-Etapa 1
- ◆ Microzonificación AREA
  - Estudios realizados
  - Geología
  - Evaluación de la respuesta
  - Resultados



# EFFECTOS LOCALES



✓ R.A.M Medellín. (ARMENIA 1999)

*Area*  
METROPOLITANA  
del Valle de Aburrá



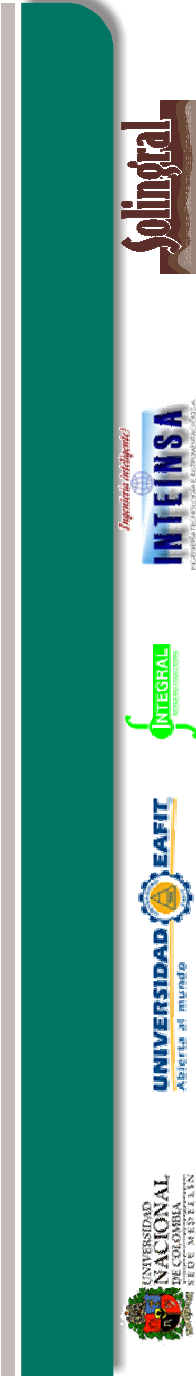
# EFFECTOS LOCALES

| Estación                | Código | Lat. (°N) | Lon. (°W) | Alt. ( m ) | Amáx EO<br>(cm/s²) | Amáx VER<br>T<br>(cm/s²) | Amáx NS<br>(cm/s²) | Equipo |
|-------------------------|--------|-----------|-----------|------------|--------------------|--------------------------|--------------------|--------|
| Jardín Botánico         | BOT    | 6.271     | 75.565    | 1460       | -3.08              | 1.16                     | 3.4                | ETNA   |
| Planta Villahermosa     | EVH    | 6.262     | 75.552    | 1730       | 2.15               | 0.97                     | 2.26               | ETNA   |
| Padre Manyanet          | MAN    | 6.222     | 75.613    | 1.605      | 4.43               | 3.0                      | 6.36               | ETNA   |
| Planta la montaña       | EMO    | 6.284     | 75.541    | 2170       | 2.8                | 1.88                     | 2.57               | ETNA   |
| Seminario Mayor         | SEM    | 6.350     | 75.500    | 1.499      | -3.1               | 1.46                     | -3.67              | ETNA   |
| Universidad de Medellín | UDM    | 6.235     | 75.616    | 1.595      | -12.06             | -4.66                    | 7.53               | ETNA   |
| Tanque Aures            | EAU    | 6.296     | 75.602    | 2026       | -1.96              | 1.12                     | -3.06              | ETNA   |

✓R.A.M Medellín. (21 de abril 2005)



**METROPOLITANA**  
del Valle de Aburrá





# ANTECEDENTES

## A.2.9 - ESTUDIOS DE MICROZONIFICACION

**A.2.9.1** – Cuando se adelanten estudios de microzonificación sísmica que cumplan con el alcance dado en la sección A.2.9.3, las autoridades municipales o distritales, están facultadas para expedir una reglamentación substitutiva de carácter obligatorio, que reemplace lo indicado en las secciones A.2.4 y A.2.6 del presente Reglamento.

**A.2.9.2** - Las capitales de departamento y las ciudades de más de 100 000 habitantes, localizadas en las zonas de amenaza sísmica intermedia y alta, con el fin de tener en cuenta el efecto que sobre las construcciones tenga la propagación de la onda sísmica a través de los estratos de suelo subyacentes, podrán armonizar las reglamentaciones municipales de ordenamiento del uso de la tierra, con un estudio o estudios de microzonificación sísmica, que cumpla con el alcance dado en la sección A.2.9.3.

# NORMAS MICROZONIFICACIÓN

## NORMAS COLOMBIANAS DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN SISMO RESISTENTE

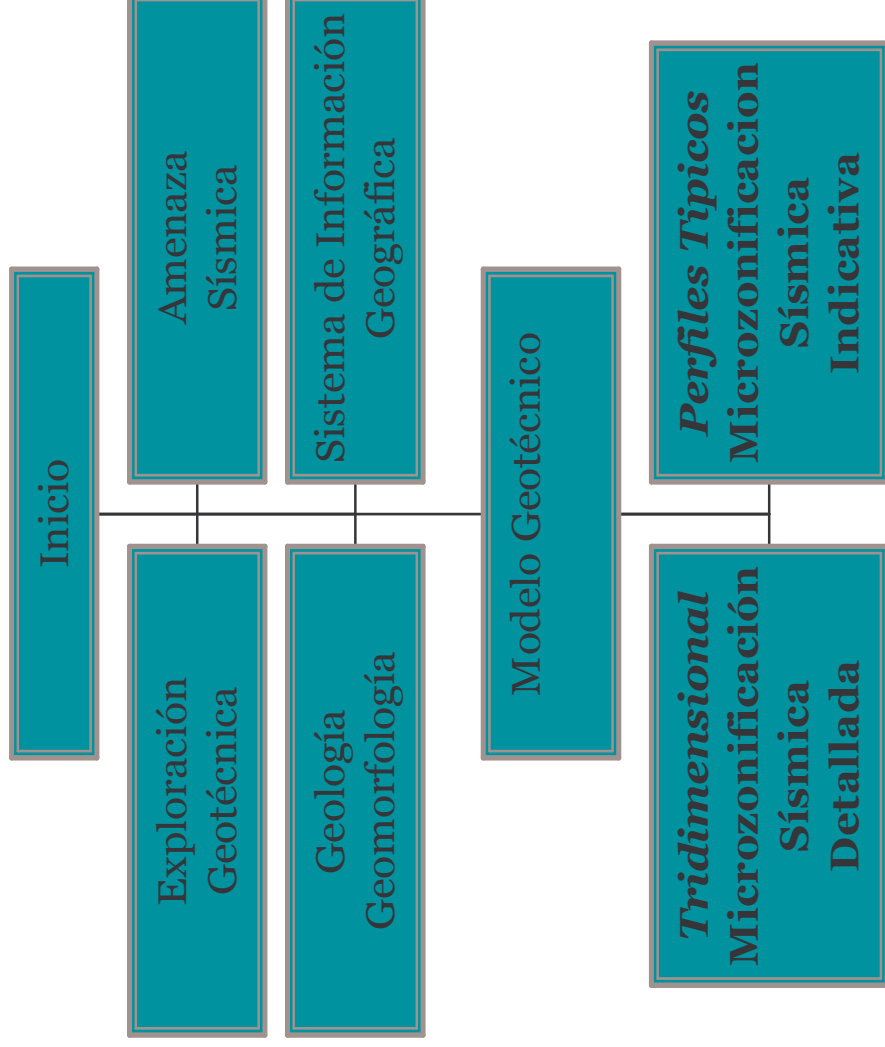
### TÍTULO A - REQUISITOS GENERALES DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN SISMO RESISTENTE

#### A2.9 ESTUDIOS DE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |  |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| ESTUDIOS DE MICROZONIFICACIÓN                                                                                                                                                                                                                                                                       |  |
| Reglamentación sustitutiva de carácter obligatorio                                                                                                                                                                                                                                                  |  |
| Reemplaza las secciones:<br>A.2.4. Efectos Locales<br>A.2.6. Espectros de diseño                                                                                                                                                                                                                    |  |
| CAPITALES DE DEPARTAMENTO<br>CIUDADES DE MÁS DE 100.000 HAB.<br>EN ZONAS DE AMENAZA SÍSMICA<br>INTERMEDIA Y ALTA                                                                                                                                                                                    |  |
| ALCANCE DE LOS ESTUDIOS DE MICROZONIFICACIÓN                                                                                                                                                                                                                                                        |  |
| Estudio geológico regional (neotectónica)<br>Recopilación de información sobre sismicidad regional<br>Evaluación de la máxima aceleración horizontal efectiva<br>Aspectos geotécnicos y geológicos locales                                                                                          |  |
| Caracterización de suelos susceptibles de licuación<br>Evaluación de la amenaza potencial de deslizamientos inducidos por sismo<br>Evaluación de propiedades dinámicas de los suelos representativos de la zona<br>Análisis de la respuesta dinámica del suelo (Definición de ESPECTROS).           |  |
| Síntesis de resultados mediante la agrupación en zonas homogéneas (microzonificación)<br>Comprobación experimental local de los resultados (instrumentación)<br>Definición de criterios en zonas de transición<br>Estudio de efectos de amplificación por accidentes topográficos (instrumentación) |  |

# ANTECEDENTES

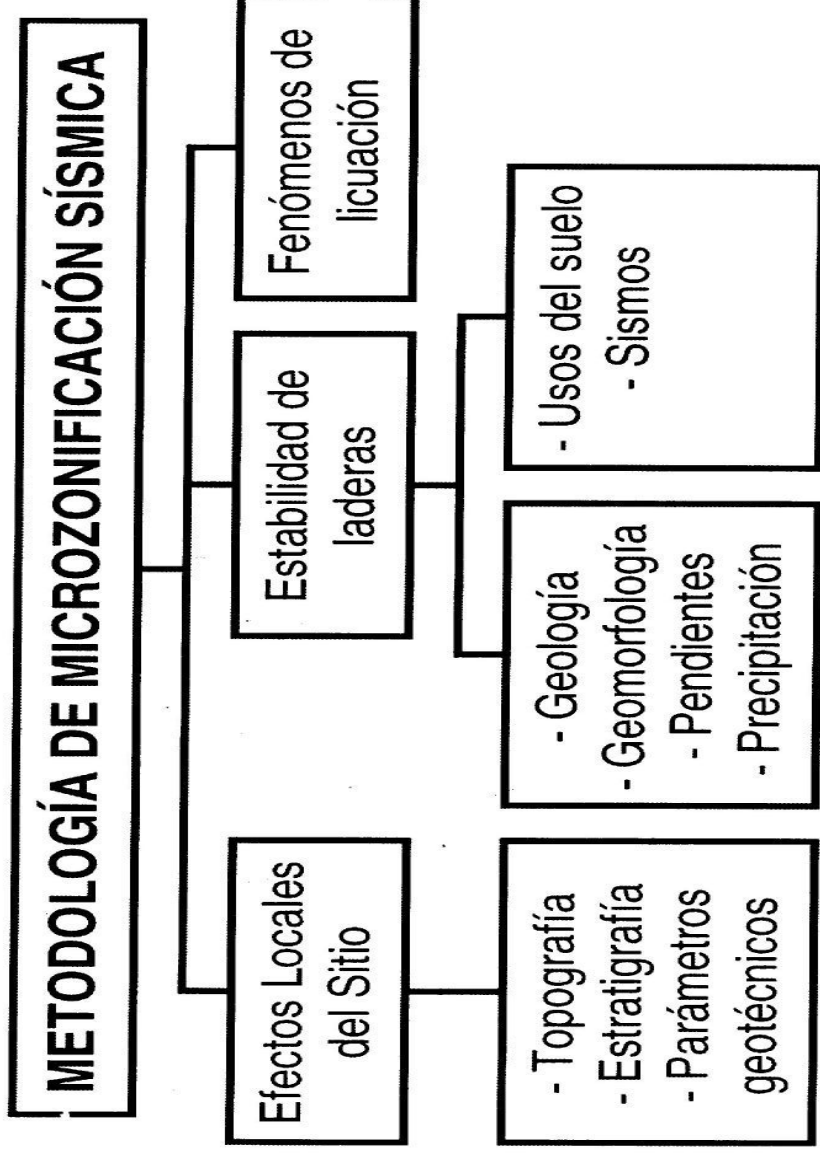
## METODOLOGÍA GENERAL PARA LOS ESTUDIOS DE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE MEDELLÍN





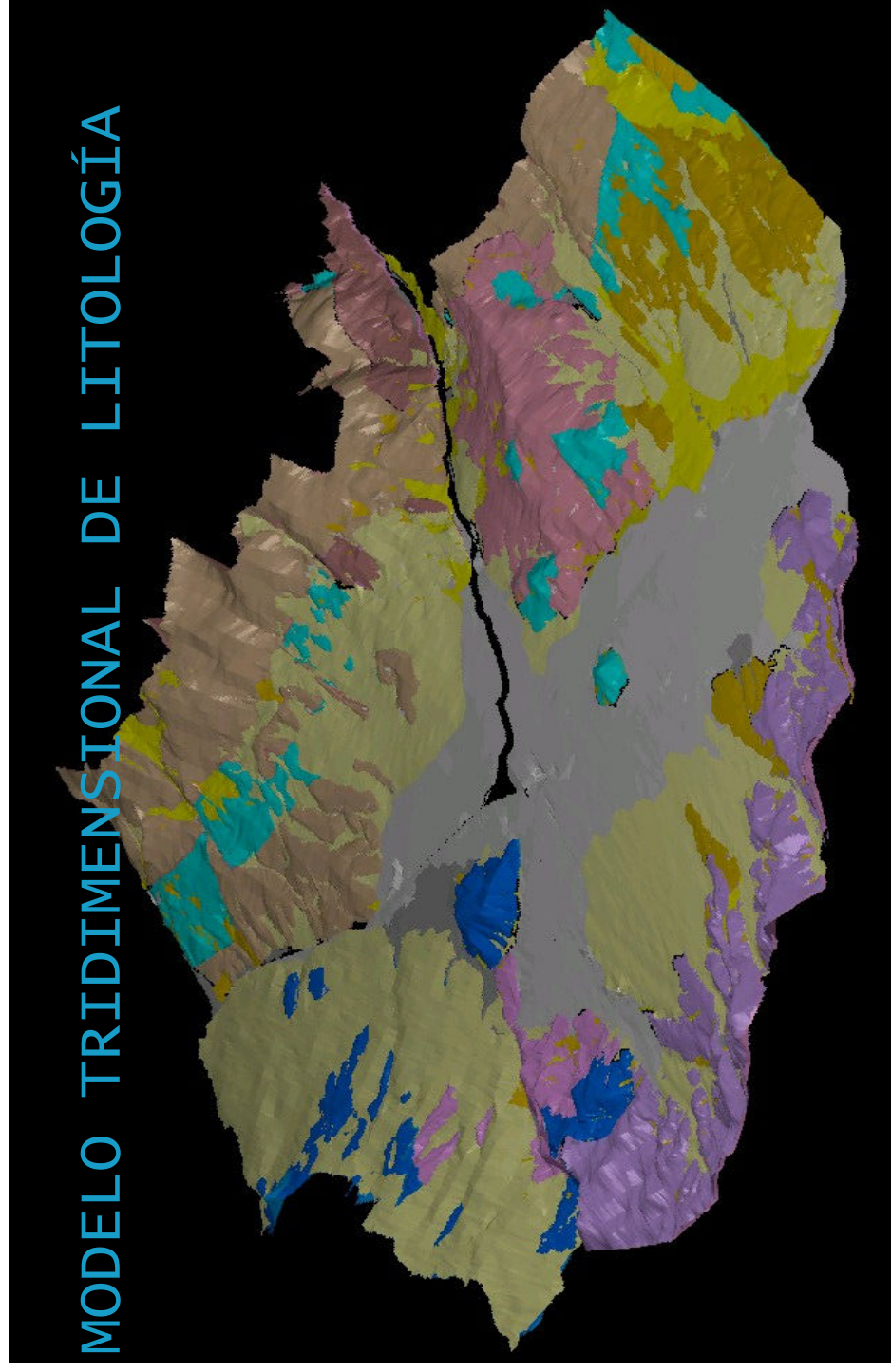
# MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA MEDELLÍN (1996)

## METODOLOGÍA GENERAL PARA LOS ESTUDIOS DE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA RIGAS



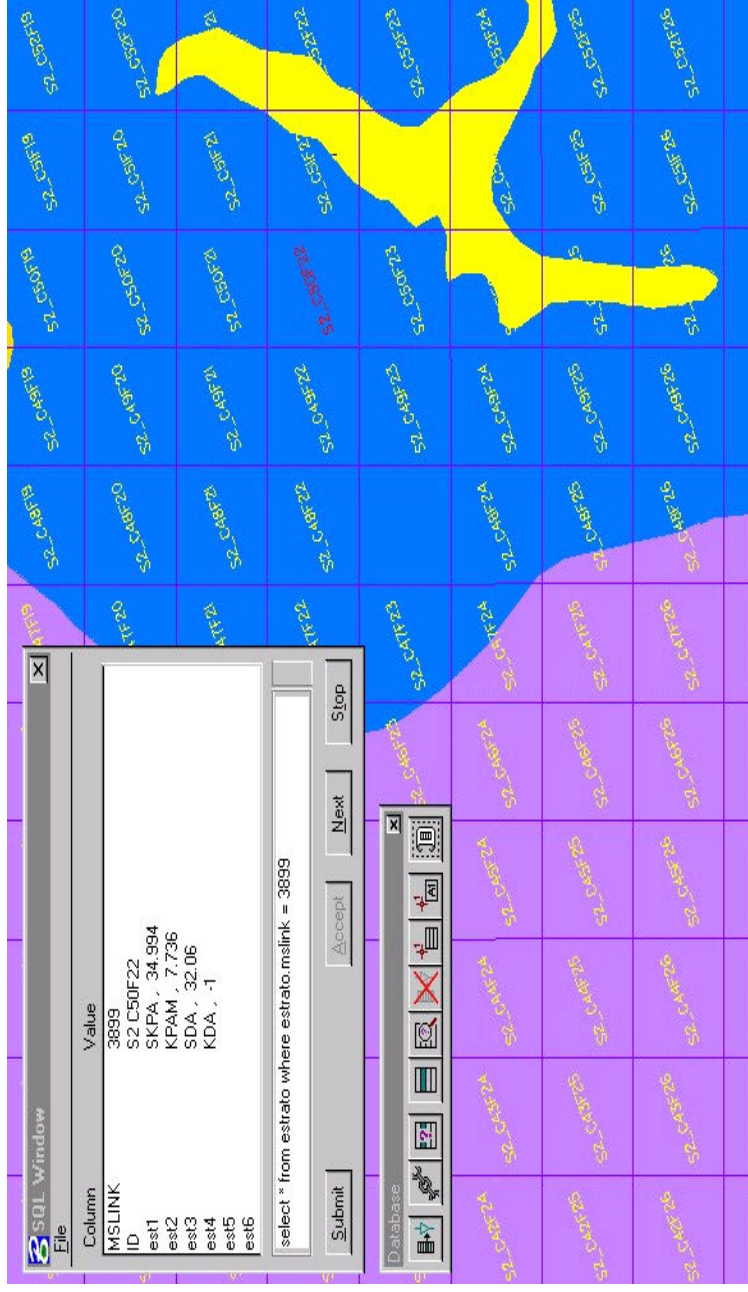
*Free*  
METROPOLITANA  
del Valle de Aburrá

# MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE MEDELLÍN



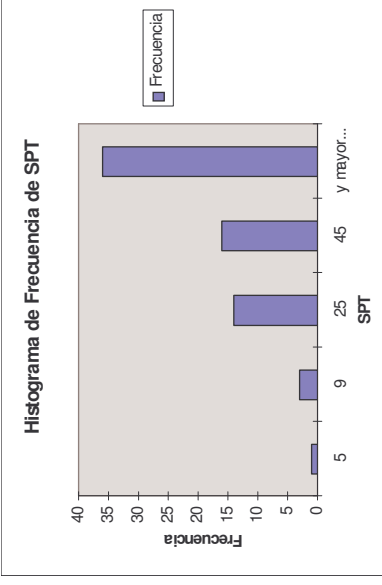
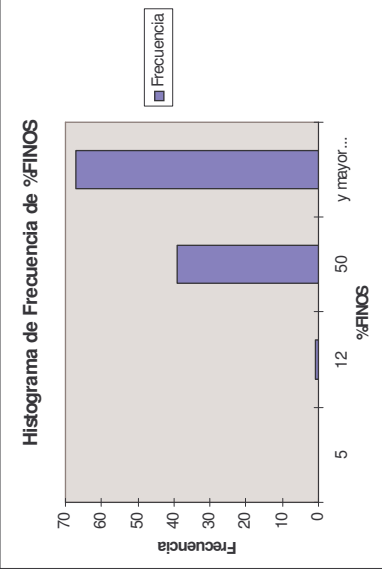
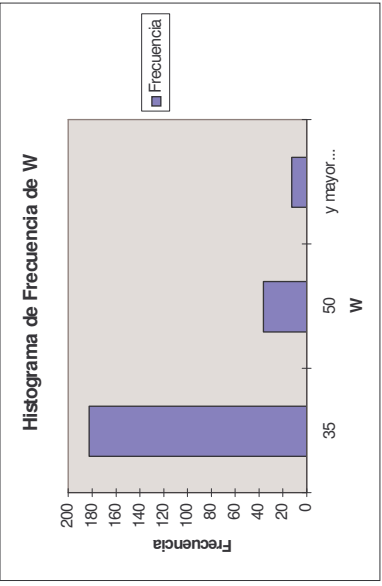
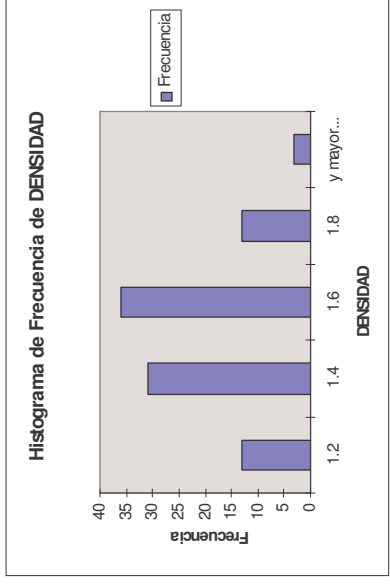
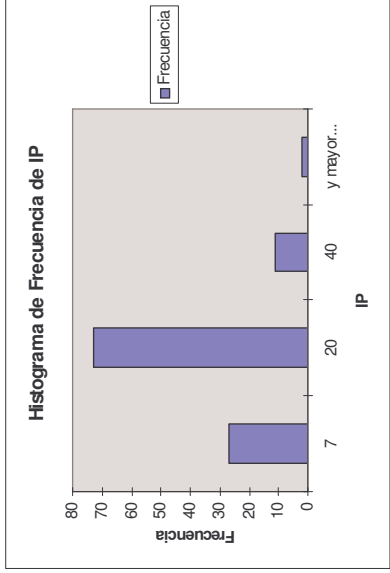
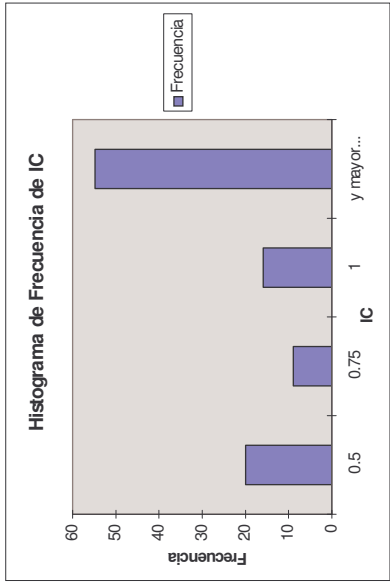
# MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE MEDELLÍN

## CONSULTA EN LA MALLA (50\*50)



# MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE MEDELLÍN

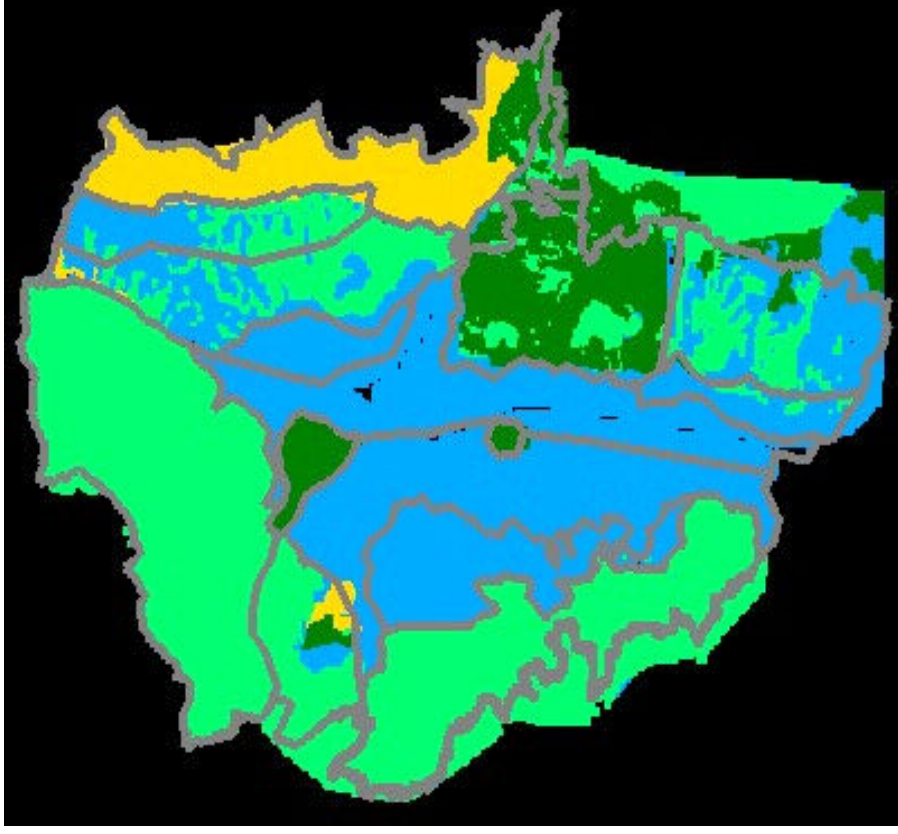
## ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE SECUENCIAS





# MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE MEDELLÍN

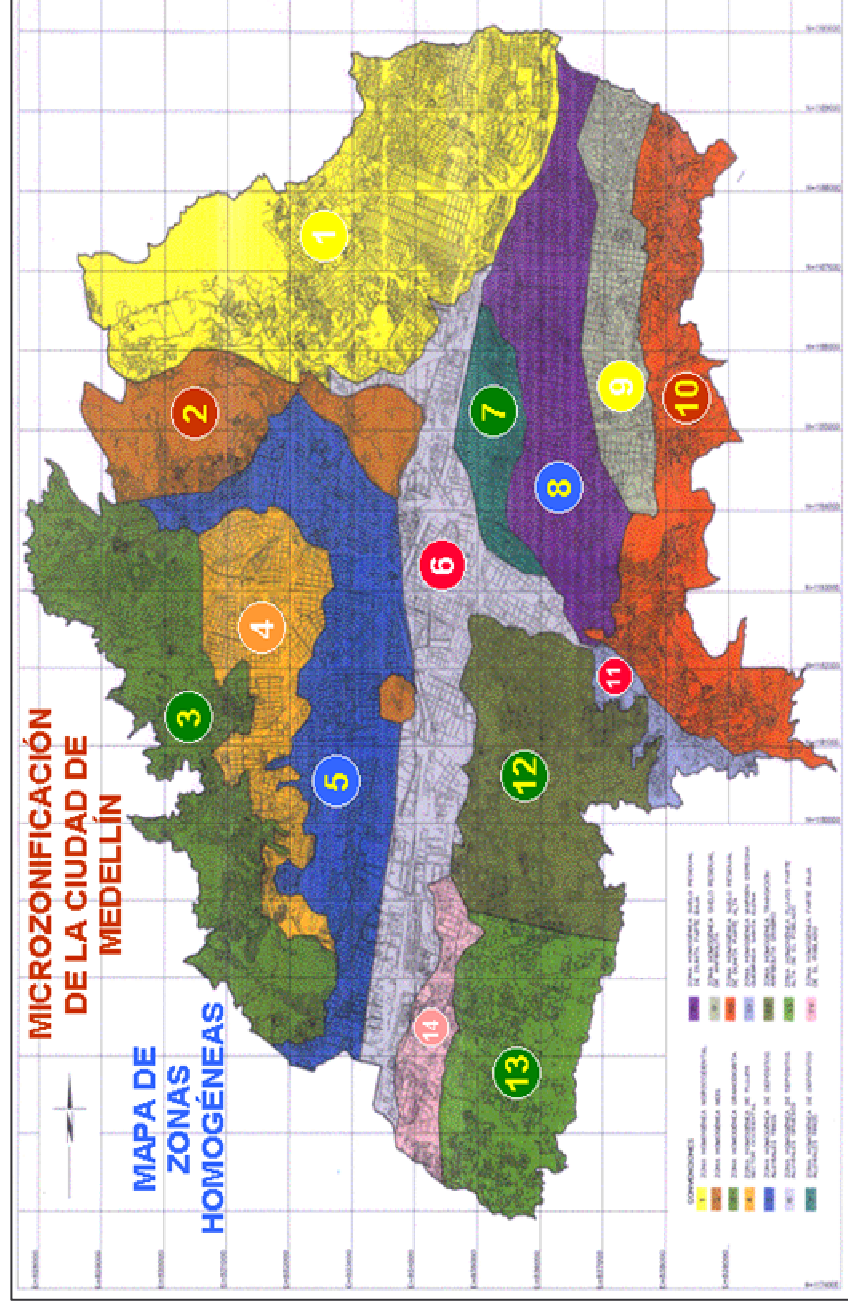
## MAPA DE AMPLIFICACION ES



*Area*  
**METROPOLITANA**  
del Valle de Aburrá



# ANTECEDENTES

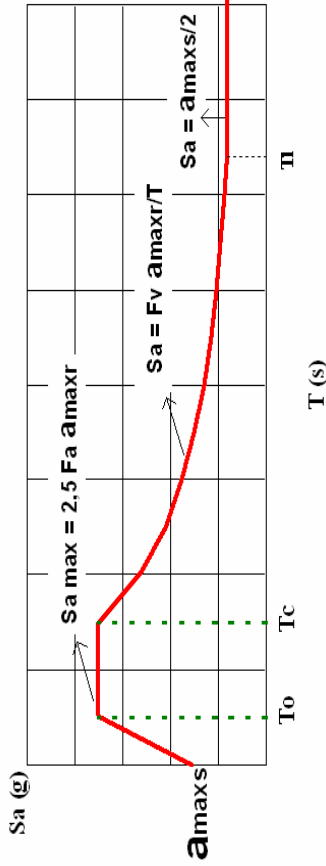


*Area*

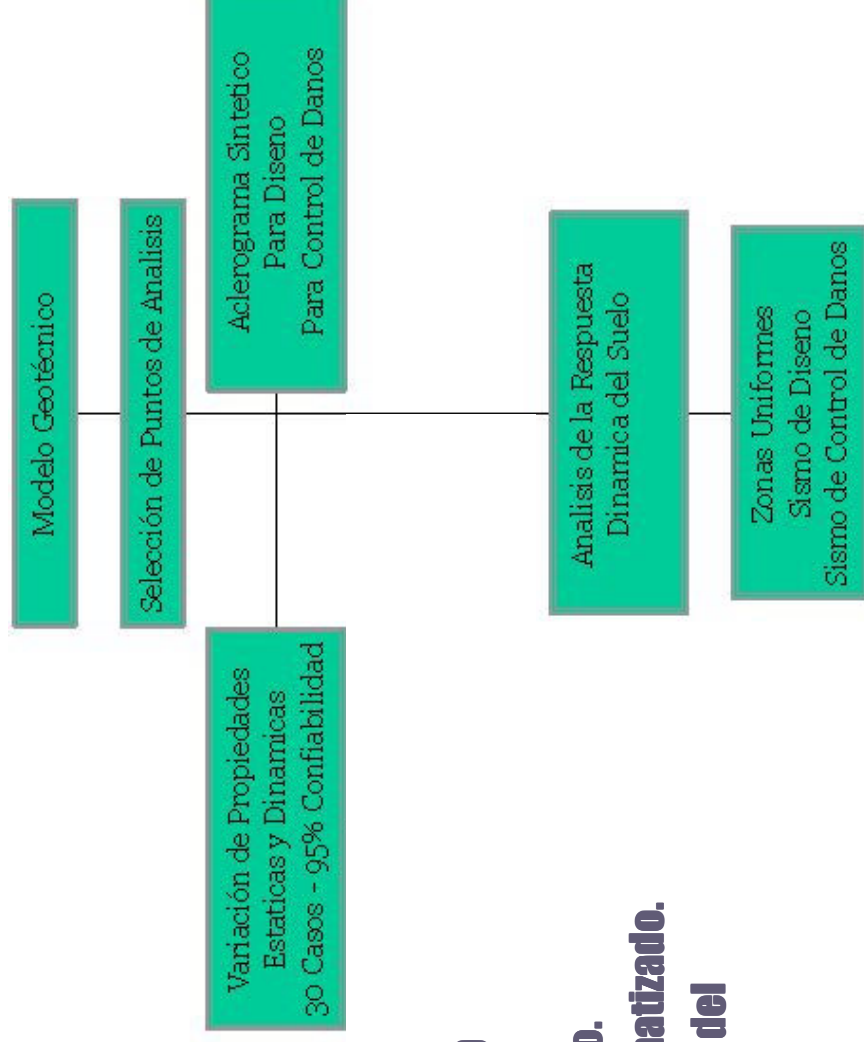
**METROPOLITANA**  
del Valle de Aburrá

# ANTECEDENTES

| ZONA | SISMO DE CONTROL DE DAÑOS $a_{maxr} = 0,03g$ |               |          |          |          |      |      | SISMO DE DISEÑO $a_{maxr} = 0,15g$ |               |          |          |          |      |      |
|------|----------------------------------------------|---------------|----------|----------|----------|------|------|------------------------------------|---------------|----------|----------|----------|------|------|
|      | $a_{máxs}$<br>(g)                            | Sa max<br>(g) | To (seg) | Tc (seg) | Tl (seg) | Fa   | Fv   | $a_{máxs}$<br>(g)                  | Sa max<br>(g) | To (seg) | Tc (seg) | Tl (seg) | Fa   | Fv   |
| 1    | 0,05                                         | 0,23          | 0,10     | 0,50     | 4,10     | 3,00 | 3,75 | 0,27                               | 0,70          | 0,10     | 0,60     | 3,10     | 1,87 | 2,80 |
| 2    | 0,08                                         | 0,22          | 0,10     | 0,30     | 1,80     | 2,99 | 2,24 | 0,34                               | 0,80          | 0,10     | 0,40     | 1,90     | 2,13 | 2,13 |
| 3    | 0,07                                         | 0,25          | 0,10     | 0,50     | 3,60     | 3,33 | 4,17 | 0,30                               | 0,80          | 0,20     | 0,70     | 3,80     | 2,13 | 3,73 |
| 4    | 0,05                                         | 0,18          | 0,10     | 0,60     | 4,00     | 2,40 | 3,60 | 0,23                               | 0,50          | 0,10     | 0,65     | 2,95     | 1,33 | 2,17 |
| 5    | 0,06                                         | 0,22          | 0,10     | 0,50     | 3,40     | 2,93 | 3,67 | 0,18                               | 0,60          | 0,10     | 0,60     | 4,00     | 1,60 | 2,40 |
| 6    | 0,05                                         | 0,14          | 0,10     | 0,40     | 2,20     | 1,87 | 1,87 | 0,18                               | 0,50          | 0,10     | 0,50     | 2,80     | 1,33 | 1,67 |
| 7    | 0,06                                         | 0,22          | 0,10     | 0,50     | 3,40     | 2,93 | 3,67 | 0,18                               | 0,60          | 0,10     | 0,60     | 4,00     | 1,60 | 2,40 |
| 8    | 0,08                                         | 0,18          | 0,10     | 0,65     | 3,05     | 2,40 | 3,90 | 0,23                               | 0,55          | 0,10     | 0,75     | 3,65     | 1,47 | 2,75 |
| 9    | 0,06                                         | 0,23          | 0,10     | 0,40     | 3,00     | 3,00 | 3,00 | 0,26                               | 0,70          | 0,10     | 0,55     | 2,95     | 1,87 | 2,57 |
| 10   | 0,09                                         | 0,25          | 0,10     | 0,40     | 2,20     | 3,33 | 3,33 | 0,38                               | 0,80          | 0,10     | 0,50     | 2,20     | 2,13 | 2,67 |
| 11   | 0,06                                         | 0,23          | 0,10     | 0,50     | 3,70     | 3,00 | 3,75 | 0,26                               | 0,75          | 0,10     | 0,65     | 3,85     | 2,00 | 3,25 |
| 12   | 0,06                                         | 0,25          | 0,10     | 0,65     | 5,35     | 3,33 | 5,42 | 0,26                               | 0,80          | 0,15     | 0,70     | 4,40     | 2,13 | 3,73 |
| 13   | 0,06                                         | 0,25          | 0,10     | 0,40     | 3,10     | 3,33 | 3,33 | 0,26                               | 0,80          | 0,10     | 0,50     | 3,20     | 2,13 | 2,67 |
| 14   | 0,05                                         | 0,14          | 0,10     | 0,50     | 3,00     | 1,87 | 2,33 | 0,20                               | 0,60          | 0,10     | 0,55     | 3,45     | 1,60 | 2,20 |



# ANTECEDENTES (AREA 1ª etapa)



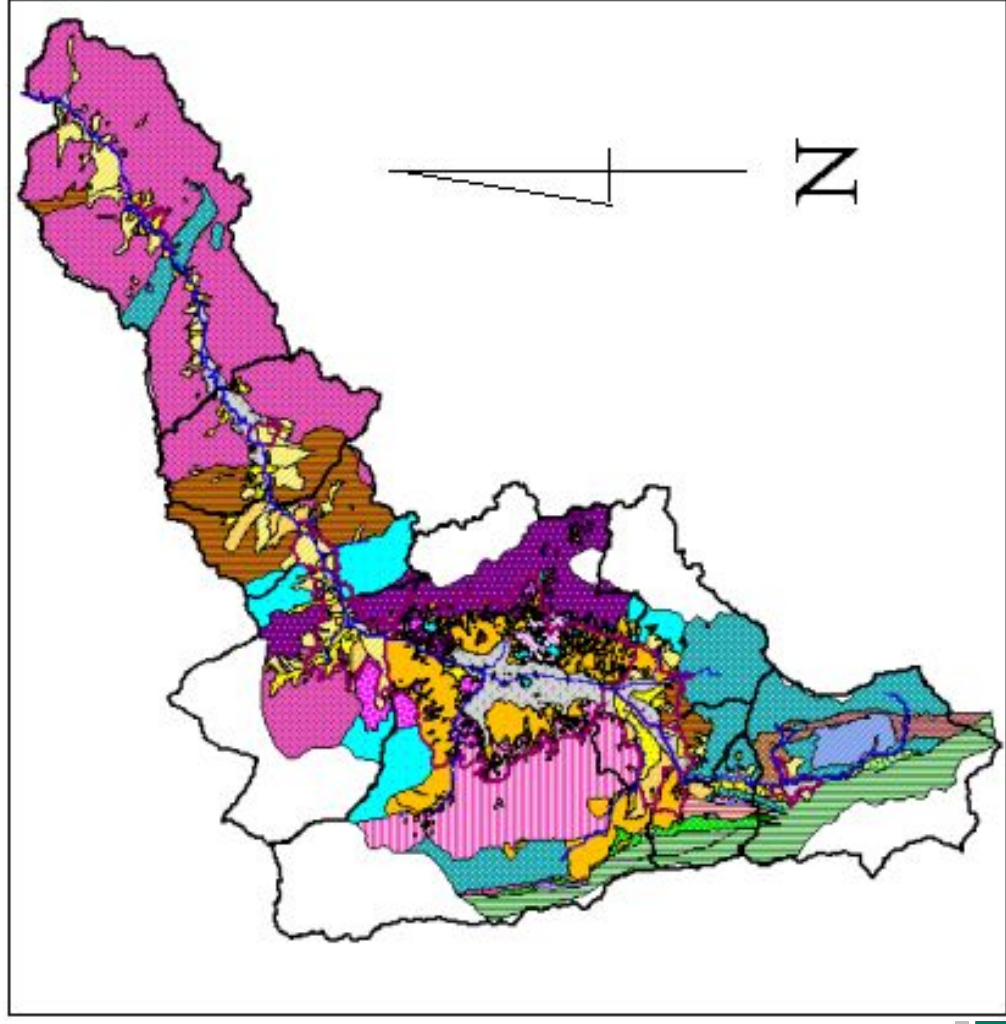
- Es una metodología que NO condiciona los resultados.
- Incluye Análisis Estadístico.
- El proceso es pseudo-automatizado.
- Comportamiento No Lineal del Suelo.

*Area*

**METROPOLITANA**  
del Valle de Aburrá



# ANTECEDENTES (1ª etapa)



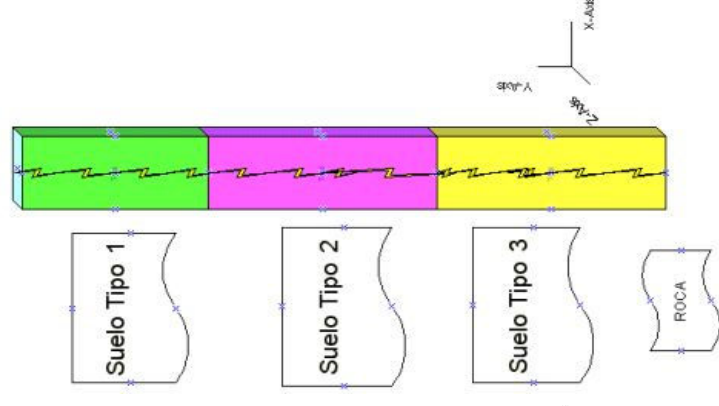
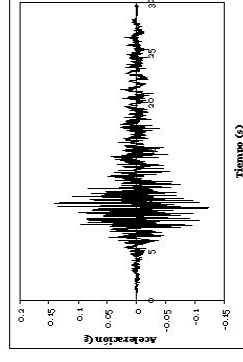
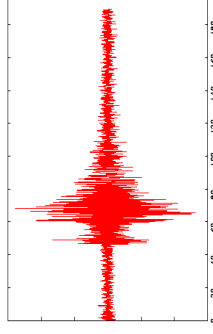
✓ GEOLOGÍA  
VALLE DE  
ABURRÁ

*Area*  
METROPOLITANA  
del Valle de Aburrá

# ANTECEDENTES (1ª etapa)

## Columnas de Suelo

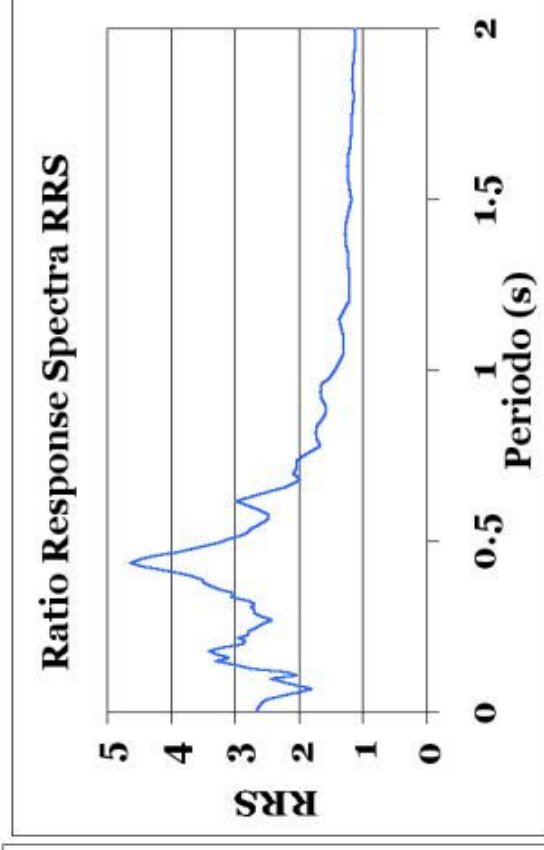
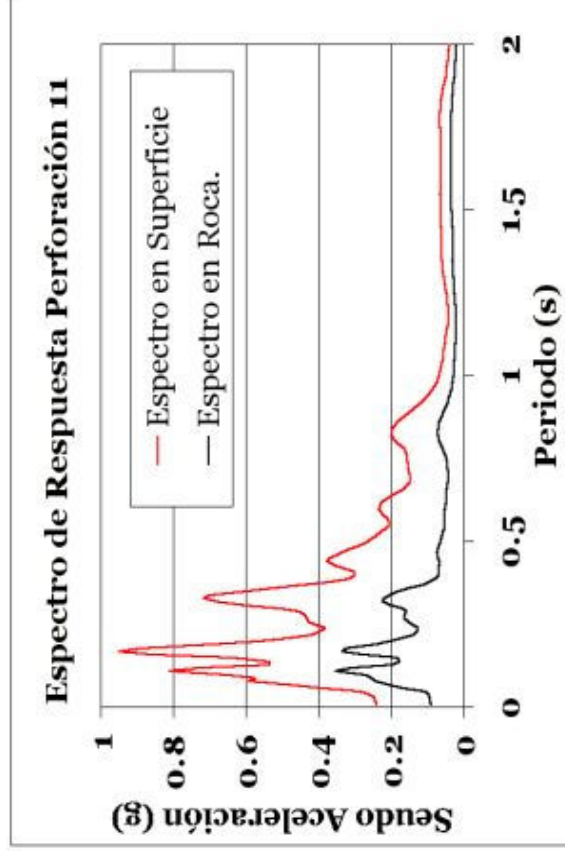
- ◆ Bello 2000 columnas
- ◆ Itagüí 800 columnas
- ◆ Variabilidad de la propiedades de los materiales.
  - 30 Casos.
  - Función Beta.
- ◆ SHAKE91. Método Lineal Equivalente.



*Area*

**METROPOLITANA**  
del Valle de Aburrá

# ANTECEDENTES (1ª etapa)



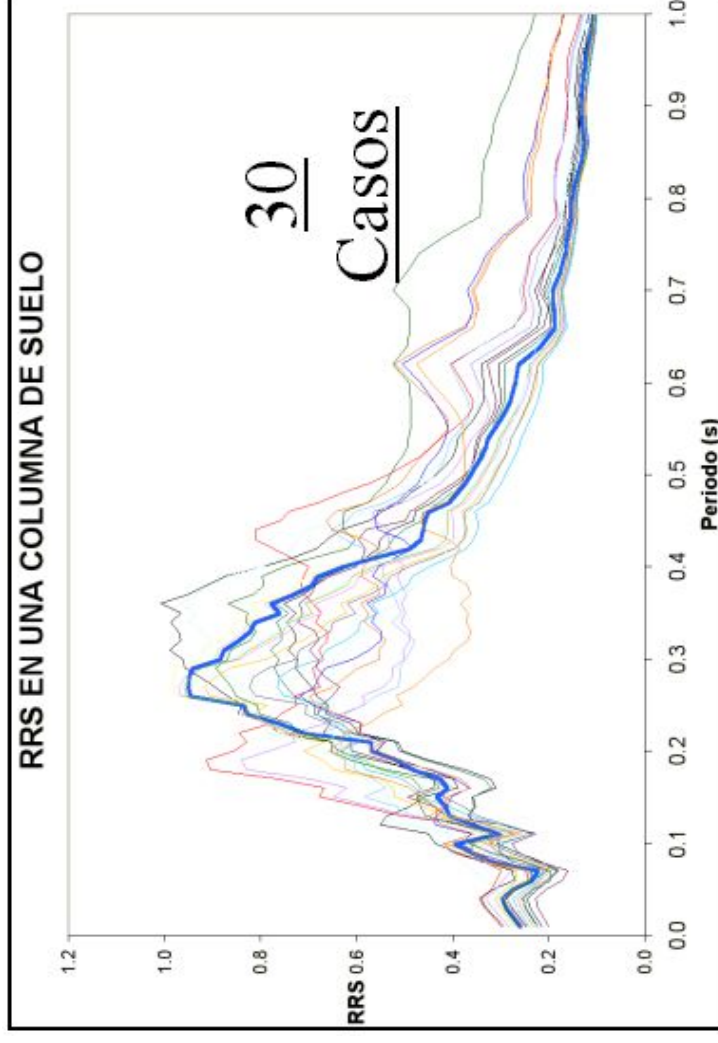
*Area*

**METROPOLITANA**  
del Valle de Aburrá

# ANTECEDENTES (1ª etapa)

- ◆ RRS. Cociente de Espectros de Respuesta.

$$RRS^* = \overline{RRS} \bullet \left( 1 + \frac{\sigma_e}{2} \right)$$



Espectro en Superficie = Espectro Amenaza Uniforme x  $RRS^*$

Estudio Amenaza

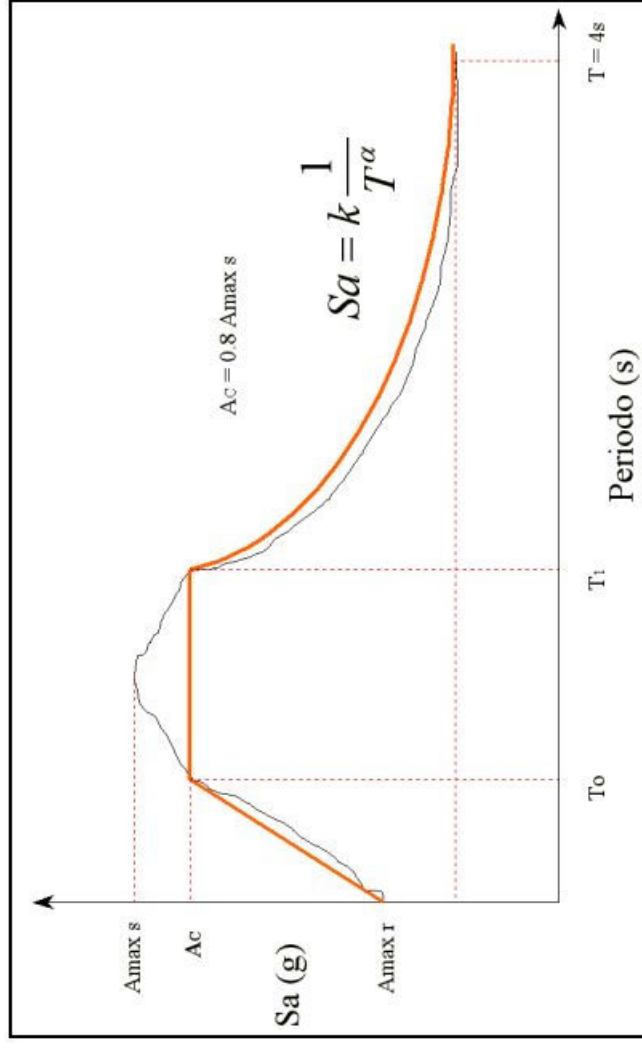
*Area*

**METROPOLITANA**  
del Valle de Aburrá



# ANTECEDENTES (1ª etapa)

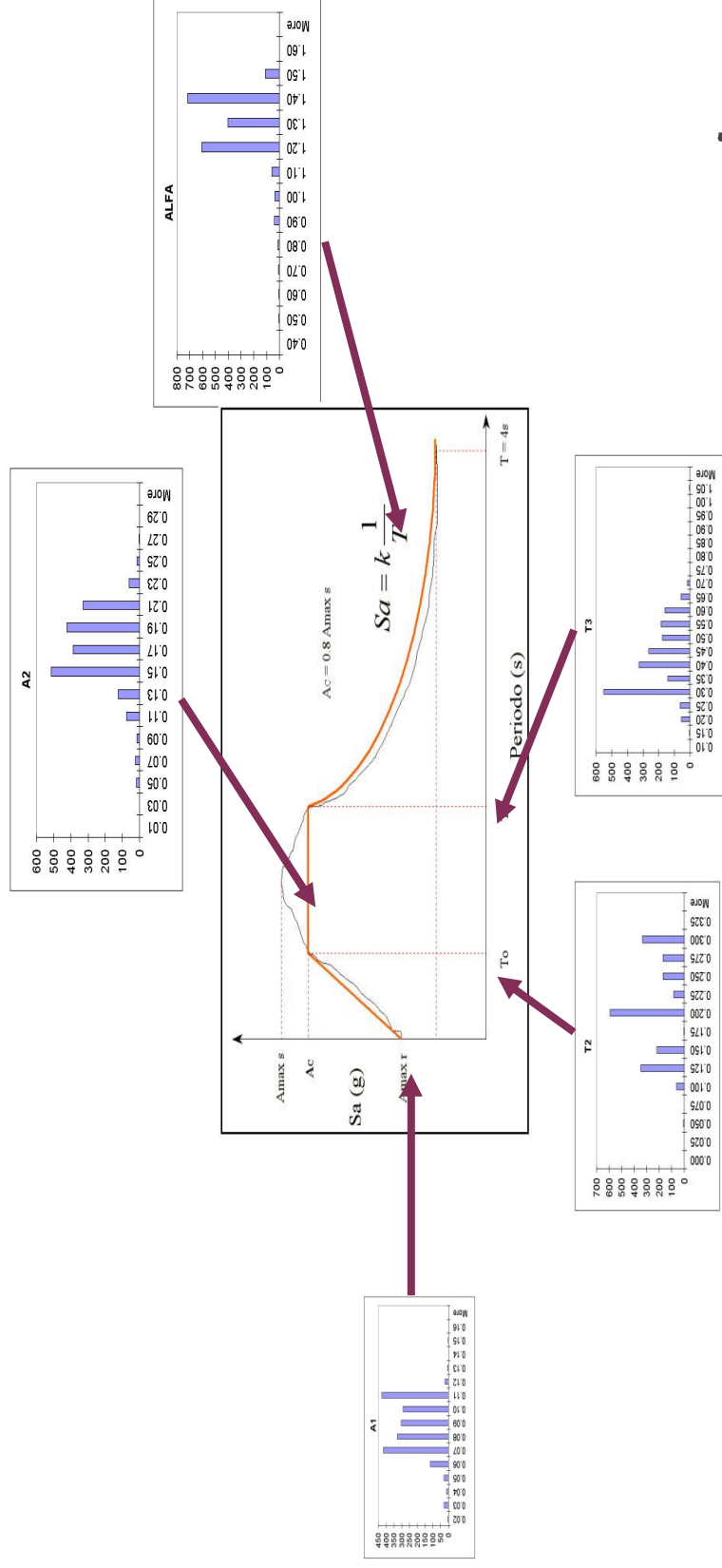
- ◆ Para cada Columna de Suelo!
- ◆ 5 Parámetros lo definen.
- ◆ Histograma para cada parámetro.



**Univalle**  
METROPOLITANA  
del Valle de Aburrá



# ANTECEDENTES (1ª etapa)

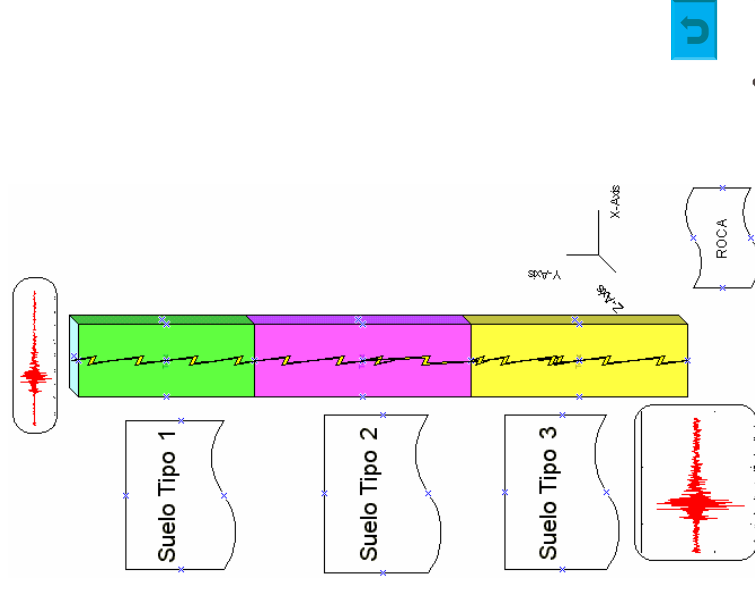
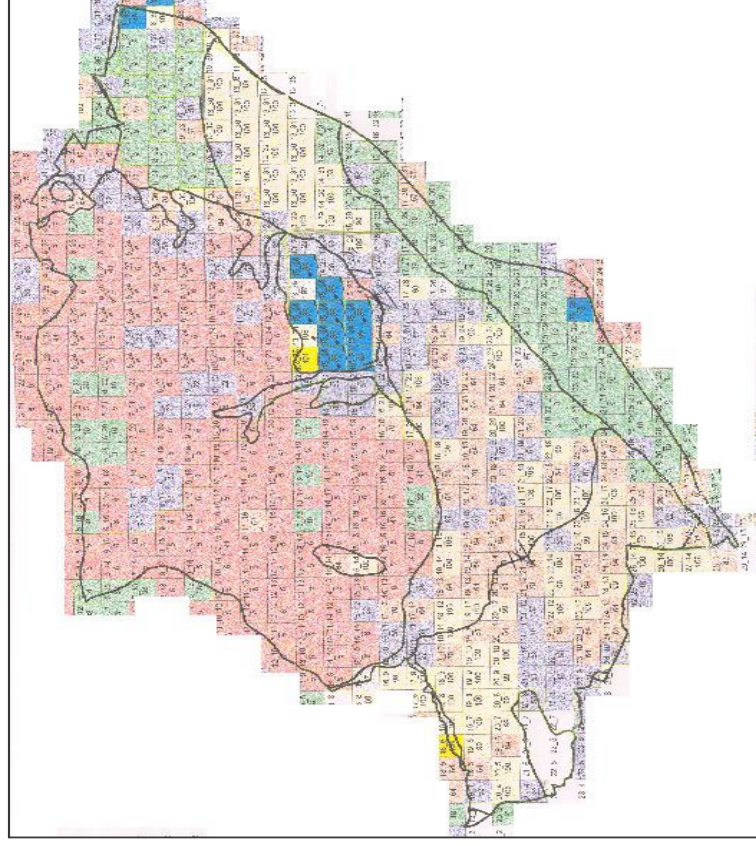


*Area*

**METROPOLITANA**  
del Valle de Aburrá

# ANTECEDENTES (1ª etapa)

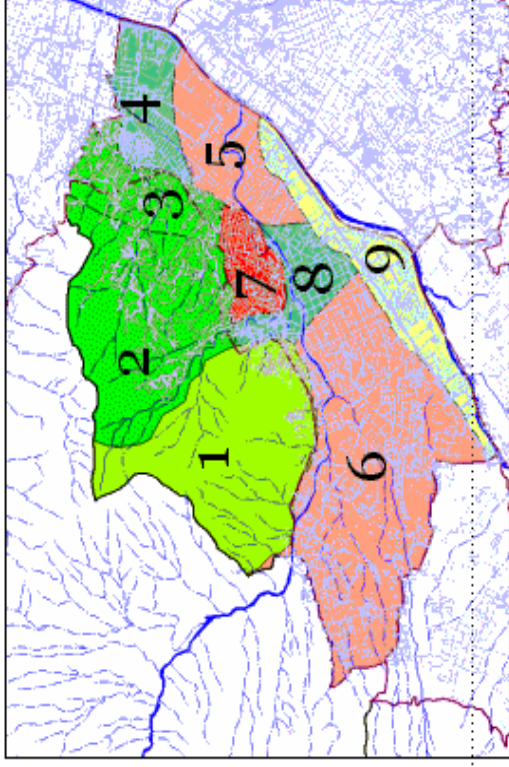
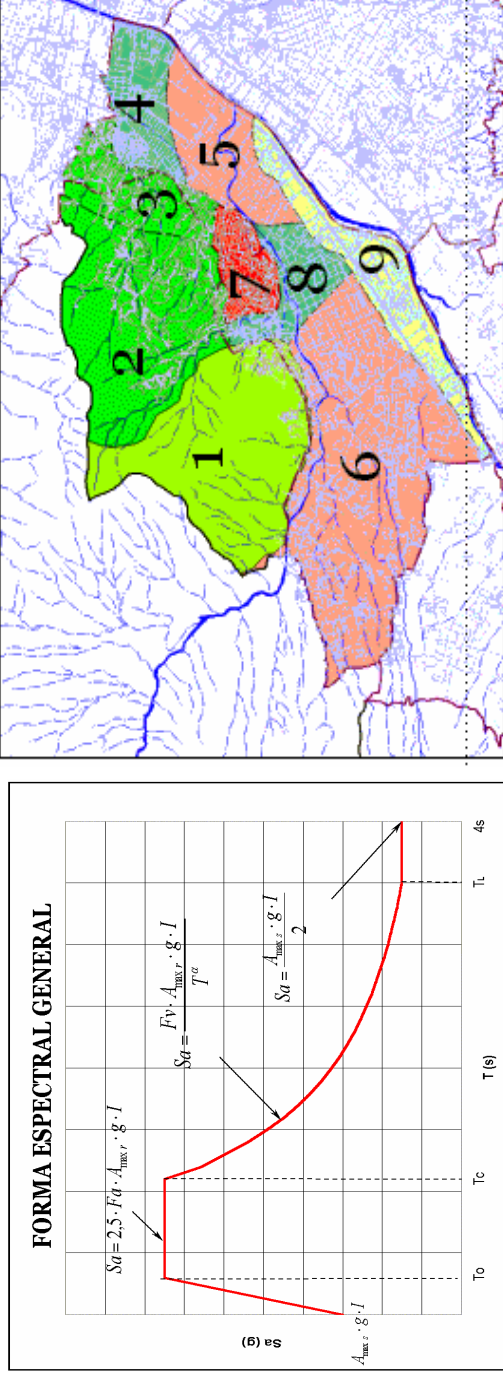
## EVALUACIÓN DE LA RESPUESTA



*free*

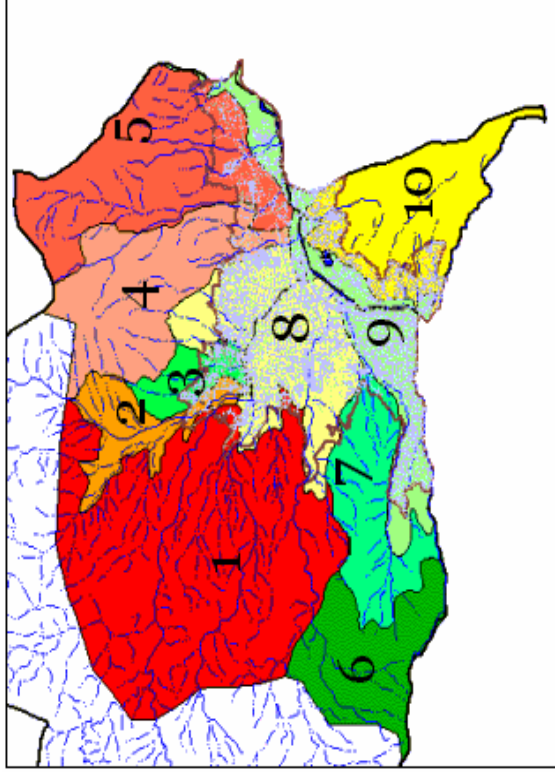
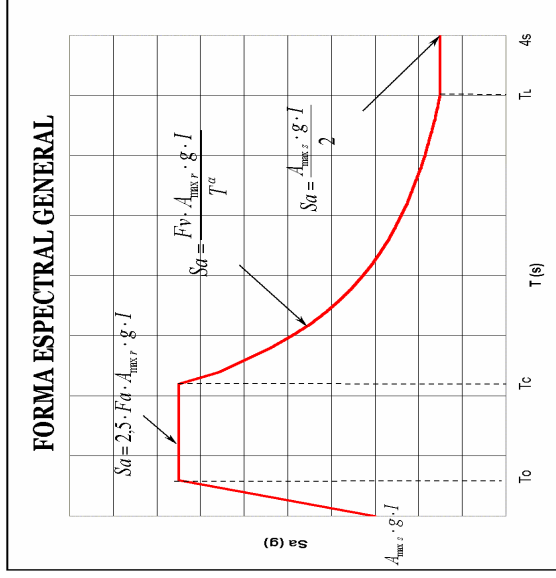
**METROPOLITANA**  
del Valle de Aburrá

# ANTECEDENTES (1ª etapa) Itagüí



| Coeficientes Espectrales para los Sismos de Control de Daños y de Diseño |                                          |                 |           |           |                       |          |           |                         |                                |                 |           |           |                       |          |           |                         |
|--------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|-----------------|-----------|-----------|-----------------------|----------|-----------|-------------------------|--------------------------------|-----------------|-----------|-----------|-----------------------|----------|-----------|-------------------------|
| Zona Homogénea                                                           | Sismo de Control de Daños amaxr = 0.04 g |                 |           |           |                       |          |           |                         | Sismo de Diseño amaxr = 0.16 g |                 |           |           |                       |          |           |                         |
|                                                                          | A <sub>max s</sub><br>[g]                | Sa max/I<br>[g] | To<br>[s] | Tc<br>[s] | T <sub>L</sub><br>[s] | α<br>[1] | Fa<br>[1] | Fv<br>[s <sup>2</sup> ] | A <sub>max s</sub><br>[g]      | Sa max/I<br>[g] | To<br>[s] | Tc<br>[s] | T <sub>L</sub><br>[s] | α<br>[1] | Fa<br>[1] | Fv<br>[s <sup>2</sup> ] |
| 1                                                                        | 0.075                                    | 0.25            | 0.10      | 0.60      | 2.34                  | 1.4      | 2.50      | 3.06                    | 0.25                           | 0.60            | 0.15      | 0.65      | 1.99                  | 1.4      | 1.50      | 2.05                    |
| 2                                                                        | 0.10                                     | 0.30            | 0.15      | 0.55      | 1.85                  | 1.4      | 3.00      | 3.25                    | 0.30                           | 0.75            | 0.15      | 0.55      | 1.61                  | 1.5      | 1.88      | 1.91                    |
| 3                                                                        | 0.10                                     | 0.30            | 0.15      | 0.50      | 1.80                  | 1.4      | 3.00      | 2.84                    | 0.30                           | 0.75            | 0.15      | 0.55      | 1.61                  | 1.5      | 1.88      | 1.91                    |
| 4                                                                        | 0.10                                     | 0.30            | 0.15      | 0.50      | 1.80                  | 1.4      | 3.00      | 2.84                    | 0.30                           | 0.75            | 0.15      | 0.50      | 1.46                  | 1.5      | 1.88      | 1.66                    |
| 5                                                                        | 0.10                                     | 0.30            | 0.15      | 0.50      | 1.80                  | 1.4      | 3.00      | 2.84                    | 0.35                           | 0.90            | 0.15      | 0.50      | 1.49                  | 1.5      | 2.25      | 1.99                    |
| 6                                                                        | 0.10                                     | 0.30            | 0.15      | 0.50      | 1.80                  | 1.4      | 3.00      | 2.84                    | 0.35                           | 0.90            | 0.15      | 0.50      | 1.49                  | 1.5      | 2.25      | 1.99                    |
| 7                                                                        | 0.10                                     | 0.36            | 0.15      | 0.55      | 2.24                  | 1.4      | 3.60      | 3.90                    | 0.35                           | 0.90            | 0.15      | 0.65      | 1.94                  | 1.5      | 2.25      | 2.95                    |
| 8                                                                        | 0.10                                     | 0.30            | 0.15      | 0.50      | 1.80                  | 1.4      | 3.00      | 2.84                    | 0.30                           | 0.75            | 0.15      | 0.50      | 1.46                  | 1.5      | 1.88      | 1.66                    |
| 9                                                                        | 0.075                                    | 0.25            | 0.15      | 0.40      | 1.55                  | 1.4      | 2.50      | 1.73                    | 0.25                           | 0.60            | 0.15      | 0.60      | 1.84                  | 1.4      | 1.50      | 1.83                    |

# ANTECEDENTES (1ª etapa) Bello



| Zona Homogénea | Coeficientes Espectrales para los Sismos de Control de Daños y de Diseño |              |           |           |           |              |                          |                                           |              |           |           |           |              |                          |
|----------------|--------------------------------------------------------------------------|--------------|-----------|-----------|-----------|--------------|--------------------------|-------------------------------------------|--------------|-----------|-----------|-----------|--------------|--------------------------|
|                | Sismo de Control de Daños $a_{max} = 0.03\text{ g}$                      |              |           |           |           |              |                          | Sismo de Diseño $a_{max} = 0.14\text{ g}$ |              |           |           |           |              |                          |
|                | $A_{max}$ [g]                                                            | $Sa$ max [g] | $T_o$ [s] | $T_c$ [s] | $T_L$ [s] | $\alpha$ [1] | $F_v$ [s <sup>-1</sup> ] | $A_{max}$ [g]                             | $Sa$ max [g] | $T_o$ [s] | $T_c$ [s] | $T_L$ [s] | $\alpha$ [1] | $F_v$ [s <sup>-1</sup> ] |
| 1              | 0.06                                                                     | 0.16         | 0.10      | 0.50      | 1.64      | 1.4          | 2.13                     | 0.20                                      | 0.50         | 0.15      | 0.60      | 1.90      | 1.4          | 1.43                     |
| 2              | 0.07                                                                     | 0.20         | 0.15      | 0.50      | 1.72      | 1.4          | 2.67                     | 0.25                                      | 0.65         | 0.15      | 0.50      | 1.62      | 1.4          | 1.86                     |
| 3              | 0.06                                                                     | 0.16         | 0.10      | 0.50      | 1.64      | 1.4          | 2.13                     | 0.20                                      | 0.50         | 0.10      | 0.60      | 1.90      | 1.4          | 1.43                     |
| 4              | 0.07                                                                     | 0.20         | 0.10      | 0.30      | 1.04      | 1.4          | 2.67                     | 1.24                                      | 0.30         | 0.10      | 0.45      | 1.38      | 1.5          | 2.29                     |
| 5              | 0.06                                                                     | 0.16         | 0.10      | 0.50      | 1.64      | 1.4          | 2.13                     | 0.25                                      | 0.65         | 0.15      | 0.45      | 1.47      | 1.4          | 1.86                     |
| 6              | 0.06                                                                     | 0.16         | 0.15      | 0.40      | 1.32      | 1.4          | 2.13                     | 1.48                                      | 0.20         | 0.50      | 0.15      | 0.45      | 1.43         | 1.43                     |
| 7              | 0.06                                                                     | 0.16         | 0.15      | 0.40      | 1.32      | 1.4          | 2.13                     | 1.48                                      | 0.25         | 0.65      | 0.20      | 0.55      | 1.79         | 1.4                      |
| 8              | 0.07                                                                     | 0.20         | 0.15      | 0.50      | 1.74      | 1.4          | 2.67                     | 2.53                                      | 0.30         | 0.80      | 0.15      | 0.45      | 1.38         | 1.5                      |
| 9              | 0.06                                                                     | 0.12         | 0.10      | 0.50      | 1.35      | 1.4          | 1.60                     | 1.52                                      | 0.20         | 0.50      | 0.10      | 0.45      | 1.43         | 1.4                      |
| 10             | 0.07                                                                     | 0.20         | 0.10      | 0.30      | 1.04      | 1.4          | 2.67                     | 1.24                                      | 0.30         | 0.80      | 0.10      | 0.45      | 1.38         | 1.5                      |



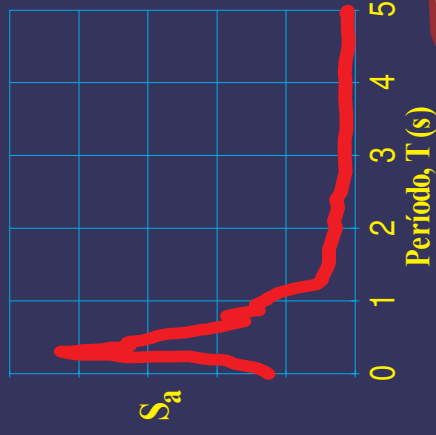
*Area*

**METROPOLITANA**  
del Valle de Aburrá

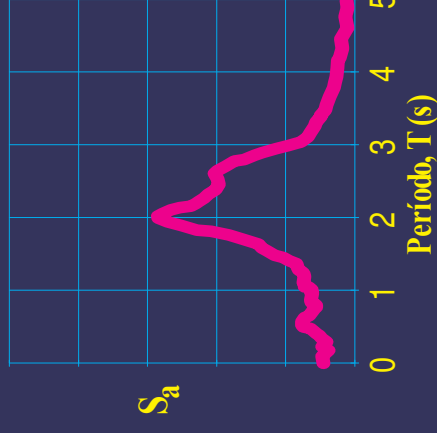
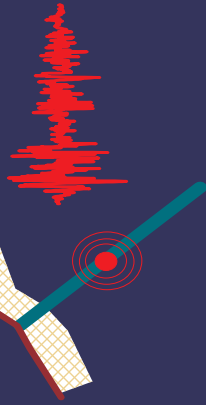




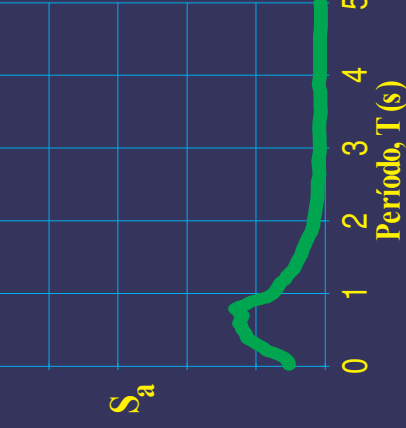
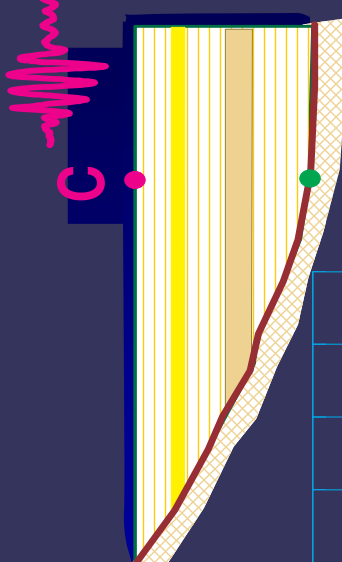
# MICROZONIFICACIÓN AREA 2006



A



C



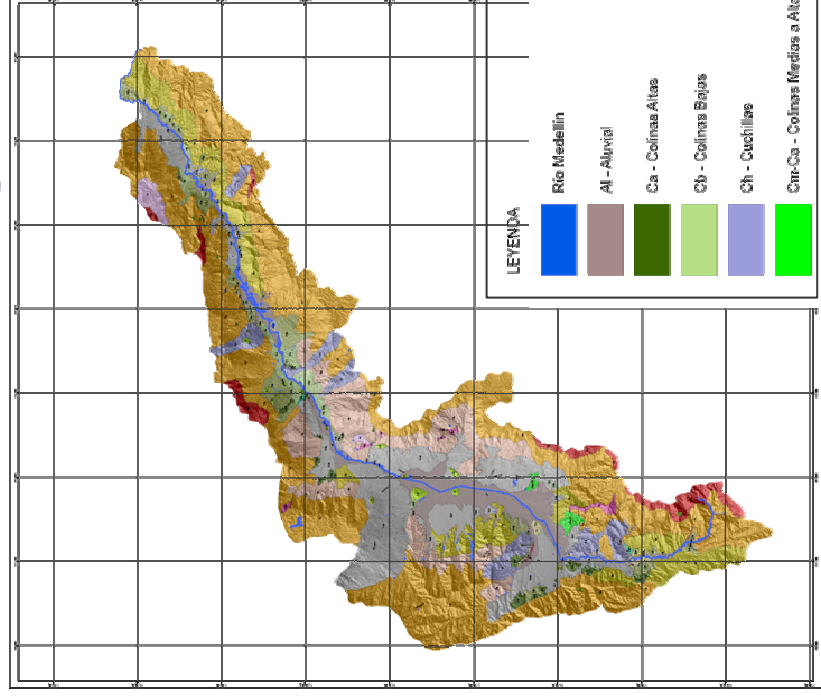
B



- ✓ Efecto del suelo
- ✓ Efectos locales

# MICROZONIFICACIÓN

## Geomorfología

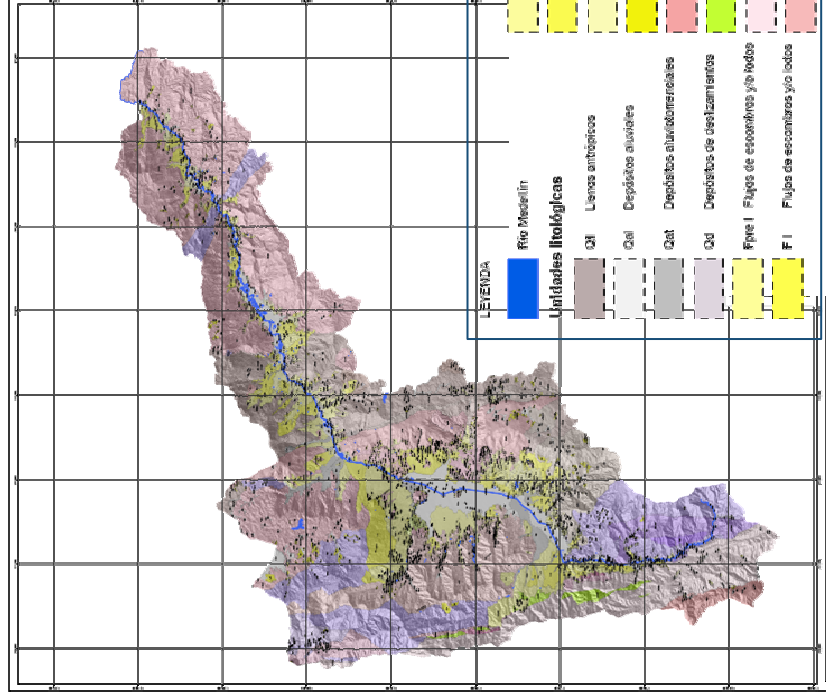


*Area*

**METROPOLITANA**  
del Valle de Aburrá

# MICROZONIFICACIÓN

## Geología



|       |                                        |      |                       |      |                                  |
|-------|----------------------------------------|------|-----------------------|------|----------------------------------|
| F III | Flujos de escombros y/o lodos          | JuR  | Cabros de Romeral     | PRuM | Arbolitos de Medellín            |
| F III | Flujos de escombros y/o lodos          | JuSD | Sierra de San Diego   | PRuM | Migmatitas de Puente Peñas       |
| F IV  | Flujos de escombros y/o lodos          | JuR  | Peridotita de Romeral | PRuM | Grutas de La Caja                |
| Fa    | Flujos de escombros y/o lodos aislados | KuR  | Sierra de Arboleda    | PRuM | Grutas Monjico de Sogonia        |
| TRga  | Granodiorita de Aragua                 | KuR  | Sierra de Arboleda    | PRuM | Arbolitos granatíferos de Cargas |
| KuR   | Membreo Volcanosedimentario            | KuP  | Molagato de Pisacho   | PRuM | Esquistos                        |
| KuR   | Membreo Volcánico                      | KuP  | Grutas de la Iguala   | PRuM | Grutas de Fontana                |
| ag    | Galeros sin diferenciar                | KuM  | Duritas de Medellín   | PRuM | Grutas de Alto de Minas          |

*Area*

**METROPOLITANA**  
del Valle de Aburrá

# MICROZONIFICACIÓN

✓ Geotecnia

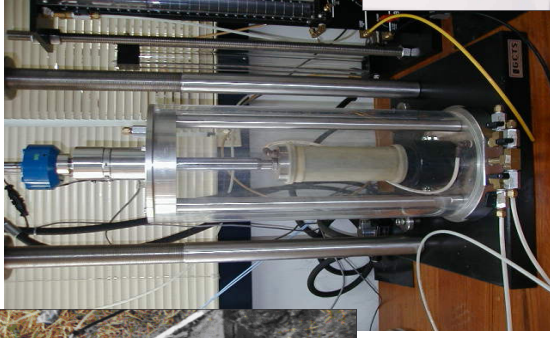


PERFORACIONES

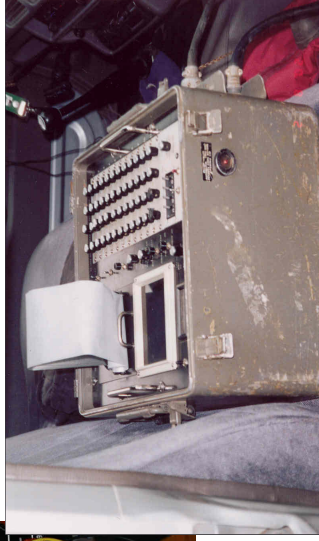


# MICROZONIFICACIÓN

## ✓ Geotecnia



- ✓ Ensayos geofísicos (Down-hole)
- ✓ Ensayos estáticos (granulometría, límites de consistencia, triaxiales)
- ✓ Ensayos dinámicos (triaxial dinámico, columna resonante)
- ✓ Módulo dinámico de rigidez al esfuerzo cortante
- ✓ Fracción de amortiguamiento crítico
- ✓ Velocidad de propagación de onda de corte





# CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA

## METODOLOGÍA

1. Agrupación de suelos por origen y procedencia.
2. Recopilación de información – Base de datos.
3. Exploración: Perforaciones, SPT.
4. Ensayos geofísicos: Down hole
4. Laboratorio {
  - Ensayos estáticos: clasificación, triaxial CU
  - Ensayos dinámicos: bender element, columna resonante, triaxial cíclico.
5. Análisis estáticos de base de datos y de resultados de ensayos de laboratorio por origen y procedencia.
6. Ajuste de curvas de degradación de rigidez y amortiguamiento.
7. Cálculo de velocidad de onda de corte a partir de propiedades estáticas.

# CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA SUELOS POR ORIGEN Y PROCEDENCIA

| Número | Formación                                             | Códigos asociados                 |
|--------|-------------------------------------------------------|-----------------------------------|
| 1      | Suelo residual de Anfibolita                          | PRaM, PaG                         |
| 2      | Suelo residual de Gneis                               | Pni AM, PRnms, PRnLC, PnP, Knl    |
| 3      | Suelo residual de Dunita                              | KuM, JuR                          |
| 4      | Suelo residual de Esquisto                            | Pes                               |
| 5      | Suelo residual de Granodiorita y Cuarzodiorita        | TRgA, Kcd, PRgN                   |
| 6      | Suelo residual de Diorita                             | KdA                               |
| 7      | Suelo residual de Gabro                               | KmP, JgSD, Jg, JgR                |
| 8      | Suelo residual de Migmatita                           | PRmPP                             |
| 9      | Suelo residual de Rocas Volcánicas                    | Kv QG, KvsQG                      |
| 10     | Depósito de Deslizamiento o vertiente                 | Qd                                |
| 11     | Flujos de Lodos y escombros, recientes y Meteorizados | F Pre, F I, F II, F III, F IV, Fa |
| 12     | Depósitos Aluviales                                   | Qal                               |
| 13     | Depósitos Aluvio torrentiales                         | Qat                               |

*Area*

**METROPOLITANA**  
del Valle de Aburrá



# CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN

Cantidad de ensayos estáticos recopilados por municipio

| MUNICIPIO    | W (%)       | LL (%)      | $\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> ) | N <sub>SPT</sub> |
|--------------|-------------|-------------|---------------------------------|------------------|
| COPACABANA   | 32          | 30          | 17                              | 89               |
| BARBOSA      | 4           | 3           | 2                               | 64               |
| GIRARDOTA    | 48          | 29          | 23                              | 231              |
| BELLO        | 39          | 16          | 14                              | -                |
| MEDELLIN     | 4669        | 1703        | 1626                            | 7787             |
| CALDAS       | 121         | 50          | 61                              | 333              |
| ENVIGADO     | 409         | 269         | 133                             | 1435             |
| ITAGUI       | 122         | 104         | 64                              | 448              |
| SABANETA     | 95          | 66          | 26                              | 191              |
| LA ESTRELLA  | 62          | 43          | 28                              | 261              |
| <b>TOTAL</b> | <b>5601</b> | <b>2313</b> | <b>1994</b>                     | <b>10839</b>     |

## FUENTES:

- ✓ Base de datos de Solingral: EXPLORA (1955-2007)
- ✓ MZSM (1999), MZSVA (2002)

# CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA EXPLORACIÓN

NÚMERO DE PERFORACIONES: 36

Caldas: 5

La Estrella: 5

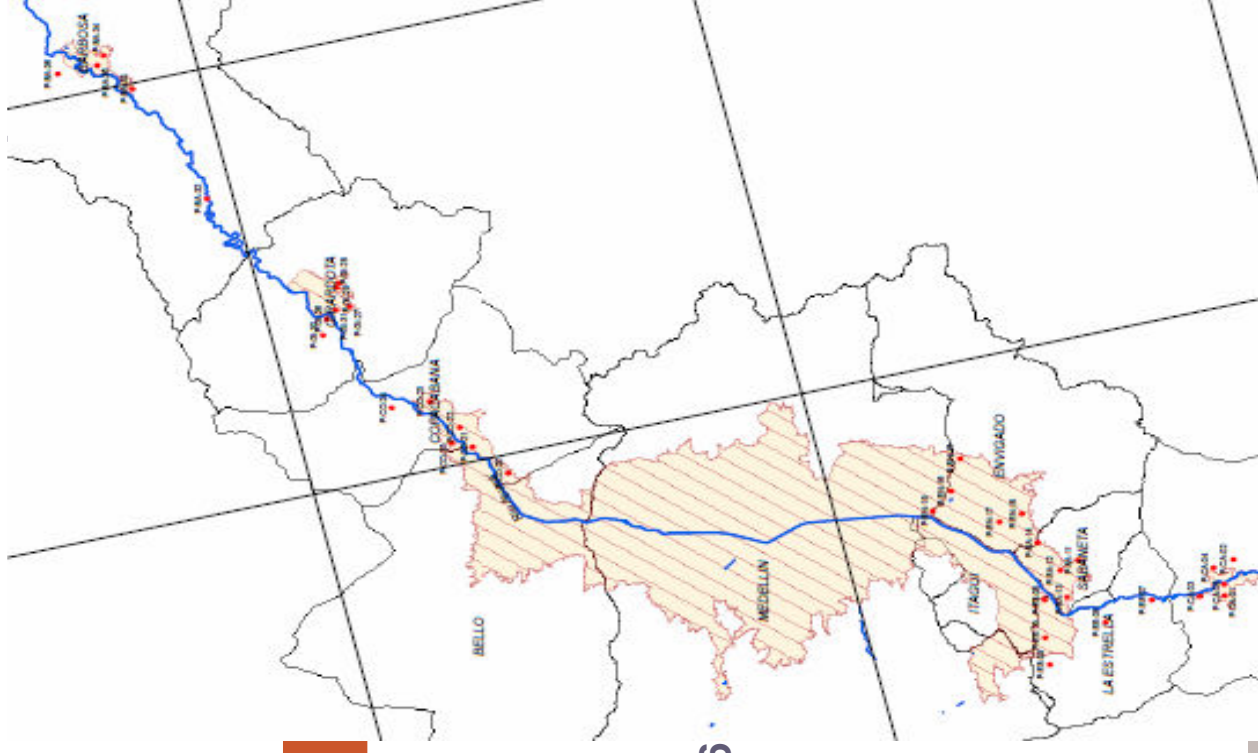
Sabaneta: 4

Envigado: 5

Copacabana: 6

Girardota: 6

Barbosa: 5

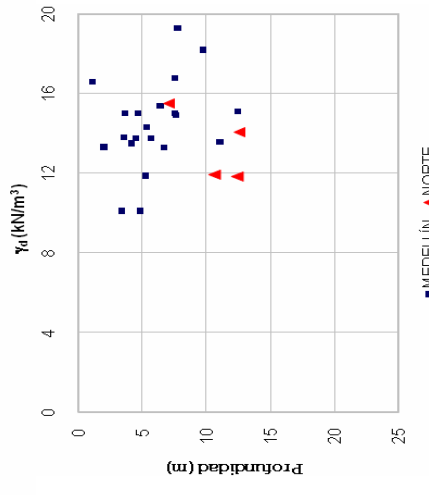
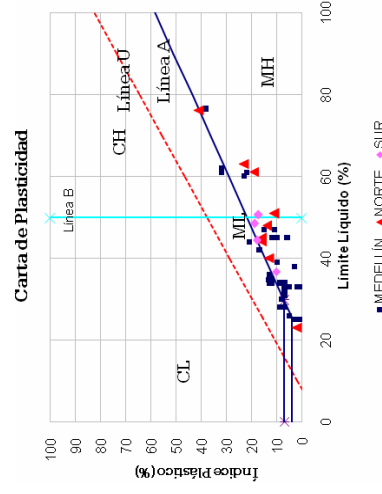
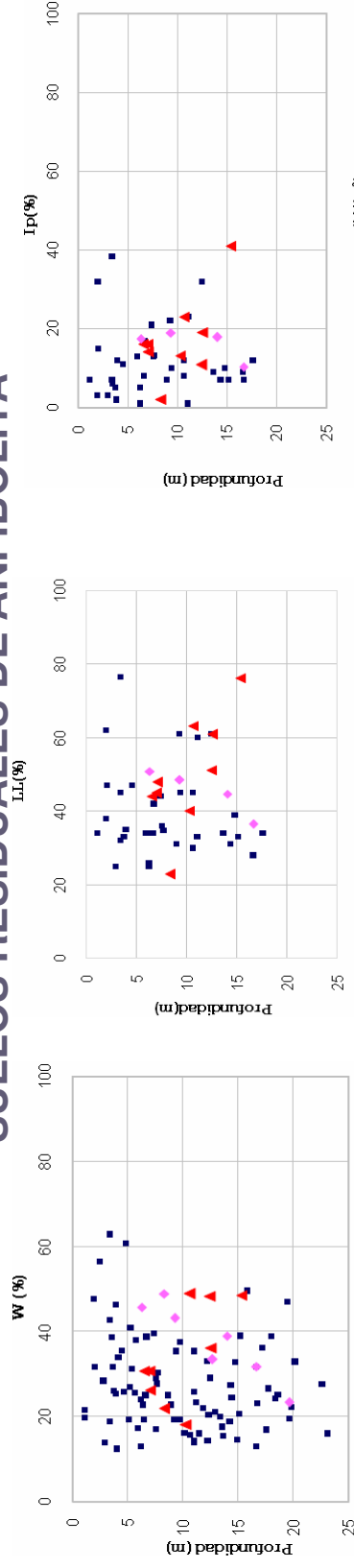


*Area*  
**METROPOLITANA**  
del Valle de Aburrá

# CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA

## PROPIEDADES ÍNDICE

### SUELOS RESIDUALES DE ANFIBOLITA



**Area**

**METROPOLITANA**  
del Valle de Aburrá







# CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA

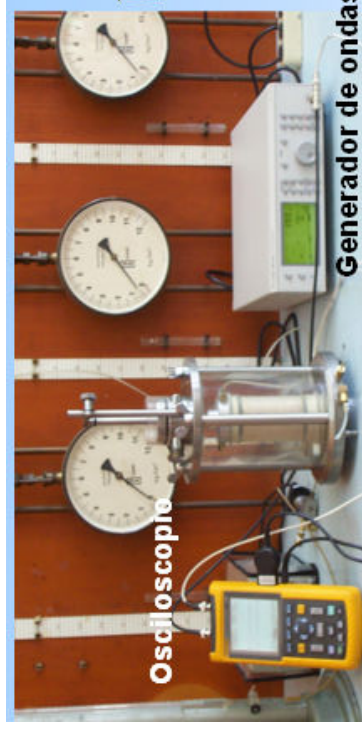
## ENSAYOS DINÁMICOS



TRIAXIAL CÍCLICO



COLUMNA RESONANTE



BENDER ELEMENT

# CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA

## PARÁMETROS DE AJUSTE HIPERBÓLICO

| Formación                                                              | Curva de Degradación<br>Módulo G (Hardin) |      |                |                | Amortiguamiento, % (Romo) |                 |                |                |                  |
|------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|------|----------------|----------------|---------------------------|-----------------|----------------|----------------|------------------|
|                                                                        | N                                         | m    | $\gamma_{max}$ | $\gamma_{lim}$ | $\beta_{red}$             | $\beta_{red,z}$ | $\gamma_{max}$ | $\gamma_{lim}$ | $\gamma_{lim,z}$ |
| 1. S.R. Anfibolita                                                     | 1,10                                      | 0,35 | 0,018          | 0,003          | 2,67                      | 24,53           | 0,02           | 0,002          | 0,002            |
| 2. S.R. Gneis                                                          | 1,55                                      | 0,40 | 0,048          | 0,005          | 1,96                      | 27,82           | 0,15           | 0,006          | 0,006            |
| 3. S.R. Dunita                                                         | 0,80                                      | 0,60 | 0,080          | 0,006          | 6,96                      | 30,67           | 0,80           | 0,040          | 0,040            |
| 4. S.R. Esquistos                                                      | 2,50                                      | 0,25 | 0,030          | 0,012          | 3,00                      | 22,00           | 0,20           | 0,010          | 0,010            |
| 5. S. R. Granodiorita y<br>Cuarzodiorita                               | 1,30                                      | 0,45 | 0,075          | 0,010          | 4,01                      | 28,38           | 0,01           | 0,090          | 0,090            |
| 6. S.R. Diorita                                                        | 2,20                                      | 0,30 | 0,025          | 0,008          | 4,49                      | 14,90           | 0,01           | 0,150          | 0,150            |
| 7. S. R. Gabro                                                         | 1,50                                      | 0,45 | 0,050          | 0,008          | 3,13                      | 14,77           | 0,01           | 0,200          | 0,200            |
| 8. vertientes. R.<br>Migmatitas                                        | 1,80                                      | 0,35 | 0,090          | 0,005          | 3,0                       | 23,0            | 0,007          | 0,19           | 0,19             |
| 9. S. R. Rocas<br>Volcánicas                                           | 1,80                                      | 0,35 | 0,090          | 0,005          | 3,0                       | 23,0            | 0,007          | 0,19           | 0,19             |
| 10. Depósitos de<br>deslizamiento y de<br>vertiente                    | 1,50                                      | 0,35 | 0,050          | 0,005          | 0,22                      | 16,15           | 0,02           | 0,300          | 0,300            |
| 11. Flujos de lodos y<br>escombros, <u>recientes</u> y<br>meteorizados | 1,80                                      | 0,35 | 0,090          | 0,005          | 3,00                      | 23,00           | 0,007          | 0,19           | 0,19             |
| 12. Depósitos<br>Aluviales                                             | 1,60                                      | 0,45 | 0,150          | 0,007          | 1,33                      | 23,00           | 0,02           | 0,001          | 0,001            |
| 13. Depósitos <u>Aluvio-</u><br>torrenciales                           | 2,00                                      | 0,21 | 0,008          | 0,002          | 4,78                      | 23,52           | 0,50           | 0,060          | 0,060            |

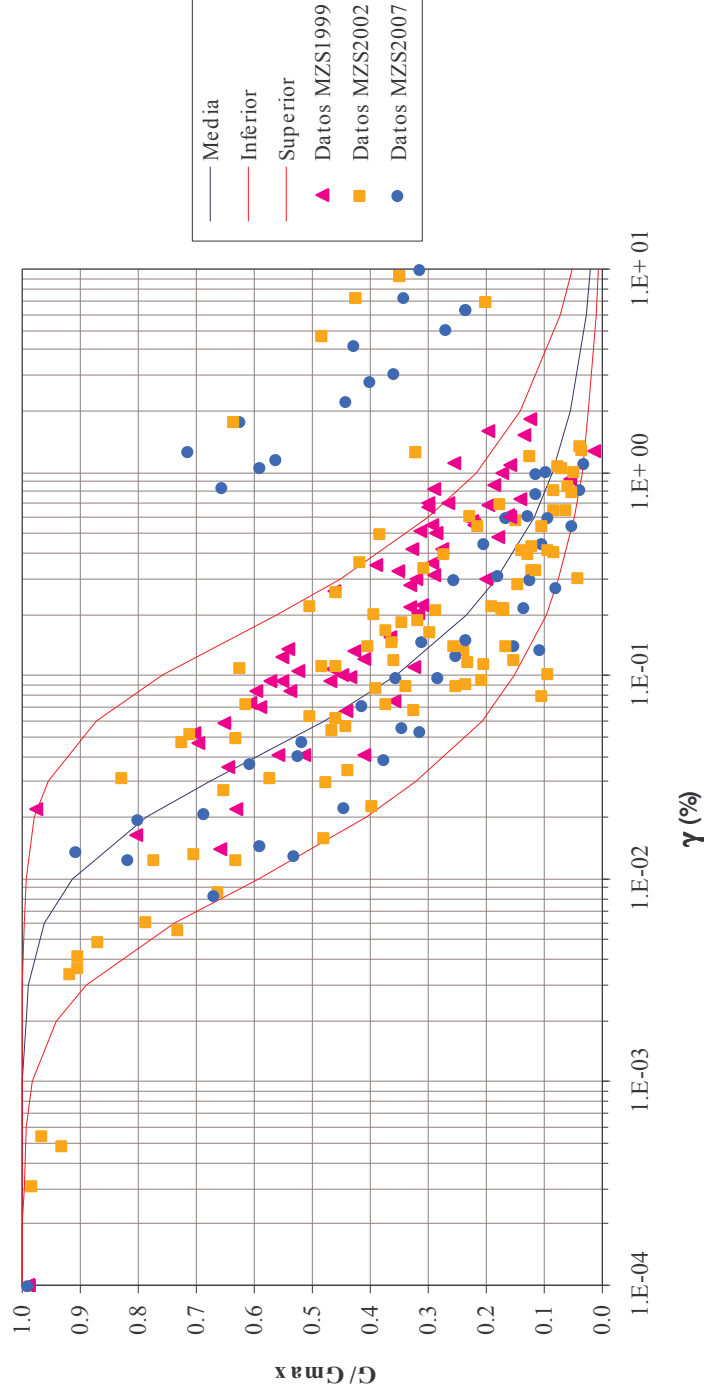
*Area*

**METROPOLITANA**  
del Valle de Aburrá



# CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA

## DATOS Y CURVAS DE AJUSTE

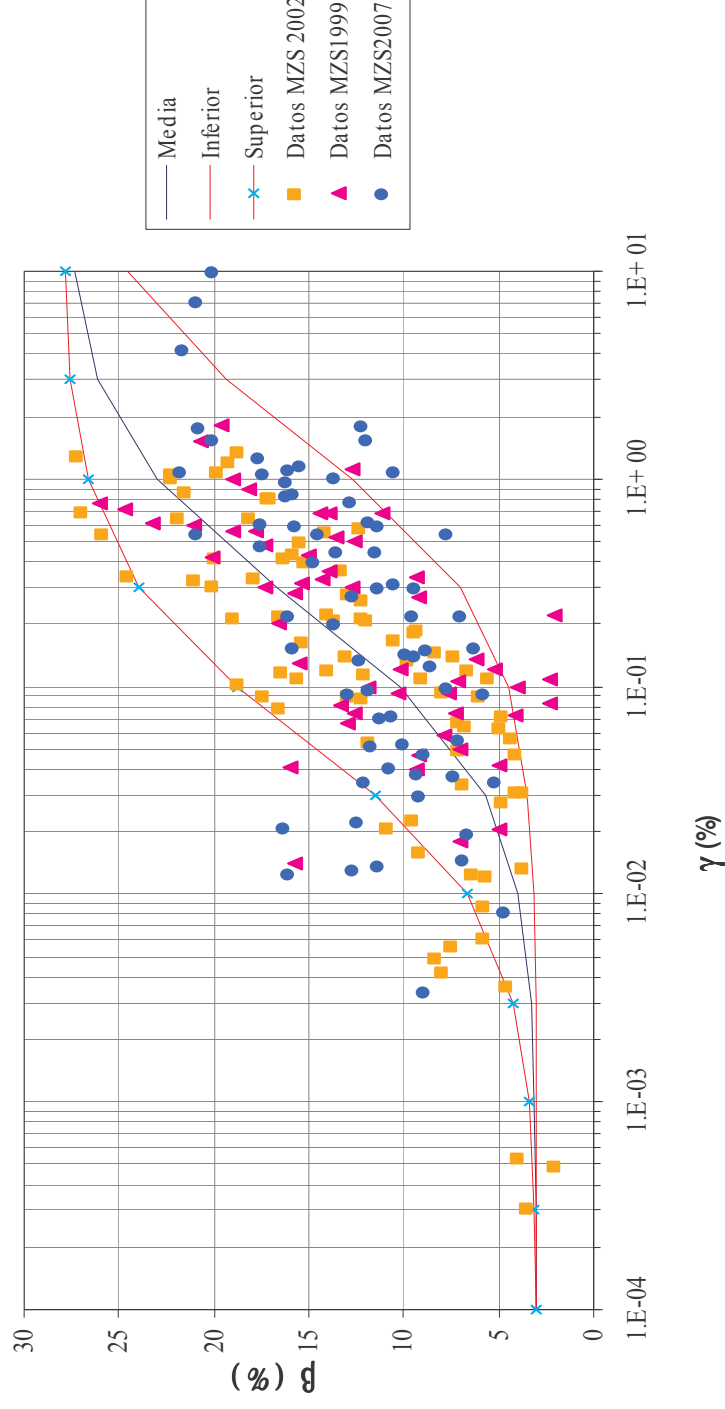


## DEGRADACIÓN DEL MÓDULO DE RIGIDEZ FLUJOS DE Lodos Y ESCOMBROS

*Area*  
METROPOLITANA  
del Valle de Aburrá

# CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA

## DATOS Y CURVAS DE AJUSTE



### AMORTIGUAMIENTO

### FLUJOS DE Lodos Y ESCOMBROS

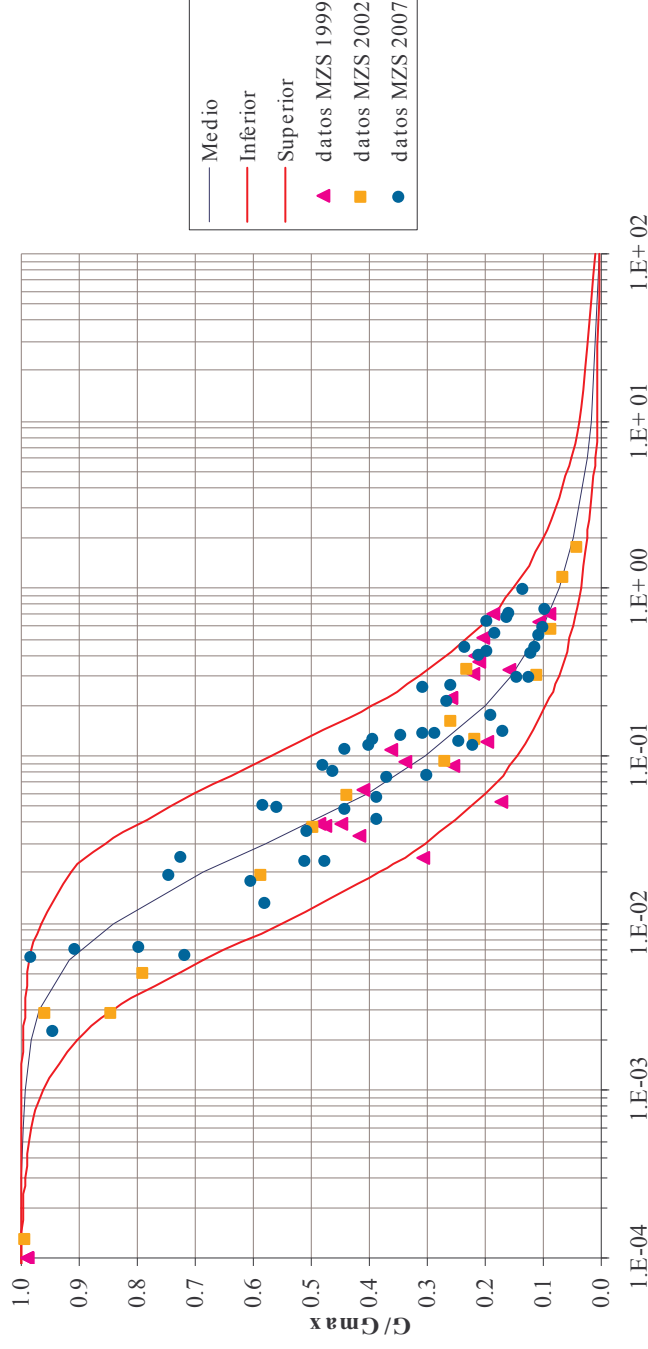
*Area*

**METROPOLITANA**  
del Valle de Aburrá



# CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA

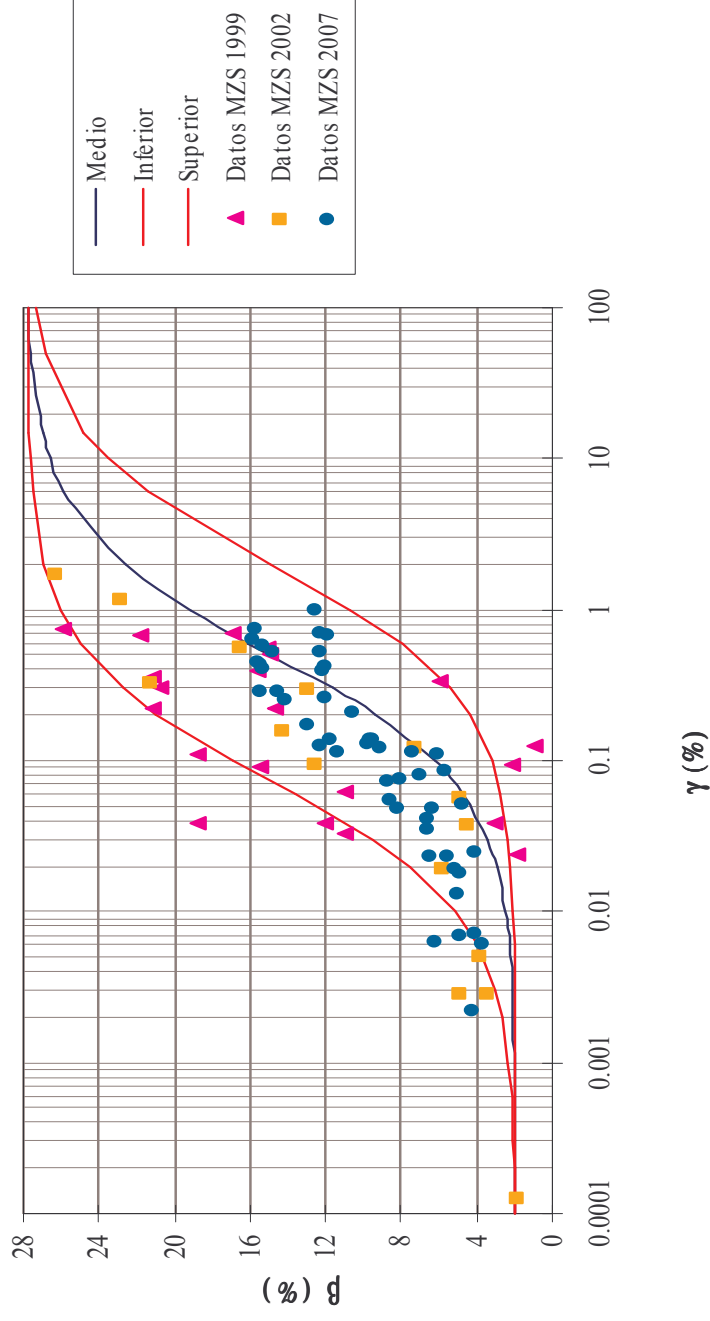
## DATOS Y CURVAS DE AJUSTE



### DEGRADACIÓN DEL MÓDULO DE RIGIDEZ SUELO RESIDUAL DE GNEIS

# CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA

## DATOS Y CURVAS DE AJUSTE



### AMORTIGUAMIENTO SUELO RESIDUAL DE GNEIS

*Area*  
METROPOLITANA  
del Valle de Aburrá

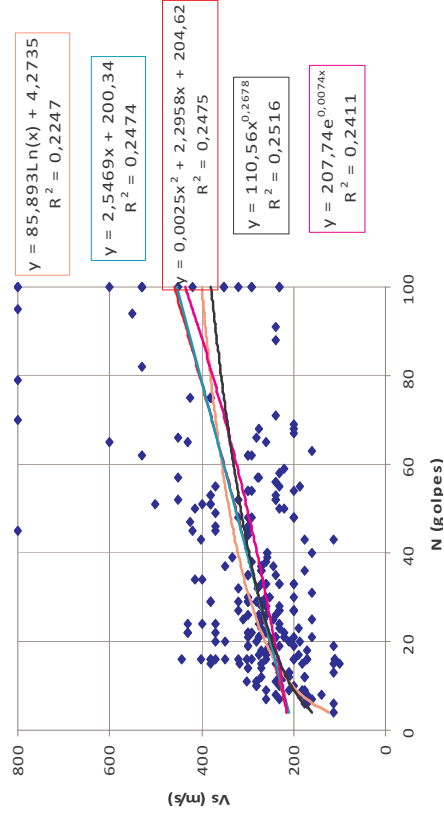
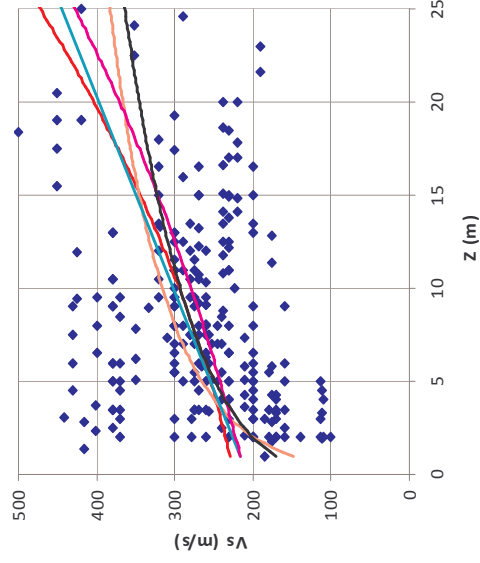
# CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA

## VELOCIDAD DE ONDA DE CORTE.

## CORRELACIONES

| UNIDAD                 | ECUACION                                                                              | $R^2$<br>(%) | $\sigma$ (m/s) |
|------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|--------------|----------------|
| Anfibolita             | $V_s = 55,6054 + 15,2633Z + 0,930851N + \varepsilon\sigma$                            | 78,4         | 80             |
| Dunita                 | $V_s = -37,3737 + 1477,78W^{-0,4131} + \varepsilon\sigma$                             | 51,5         | 61             |
| Gneis                  | $V_s = 493,558 + 182,794e^{0,024Z} - 149,361Ln(W) + \varepsilon\sigma$                | 74,2         | 47             |
| Esquisto               | $V_s = 19,7613 + 15,1092Z + 71,4851e^{0,0118N} + \varepsilon\sigma$                   | 83,9         | 67             |
| D. Aluvial             | $V_s = 79,3983 + 10,5321Z + 94,3324e^{0,0091N} + \varepsilon\sigma$                   | 58,9         | 105            |
| D. Aluvio-torrencial   | $V_s = 45,27 + 30,1788Z - 199,267e^{0,010N} + 1142,08e^{-0,042W} + \varepsilon\sigma$ | 88,6         | 103            |
| Residual cuarzodiorita | $V_s = 153,06 + 3,744N - 0,1206Z + \varepsilon\sigma$                                 | 44,0         | 121            |
| Residual de gabra      | $V_s = 134 + 2,65214N - 0,36287Z + \varepsilon\sigma$                                 | 73,0         | 50             |
| Depósito de vertiente  | $V_s = 196 + 2,4639N - 3,288664Z + \varepsilon\sigma$                                 | 23,0         | 99             |
| Flujos                 | $V_s = 181 + 1,89189N + 4,68611Z + \varepsilon\sigma$                                 | 28,0         | 109            |

# CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA VELOCIDAD DE ONDA DE CORTE. CORRELACIONES

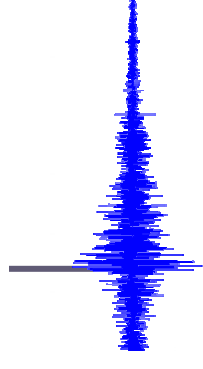
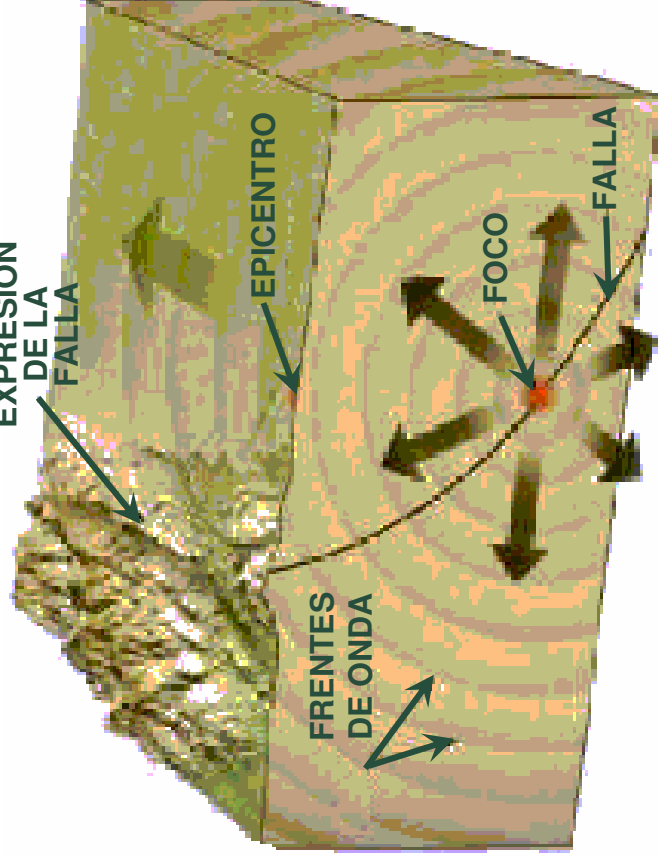


## FLUJO DE LODOS Y ESCOMBROS

— Logarítmica — Lineal — Polinómica — Potencial — Exponencial

# MICROZONIFICACIÓN

## RESPUESTA SÍSMICA DEL SUELO



SUELO A

SUELO B

SUELO C

ROCA

*Area*

METROPOLITANA  
del Valle de Aburrá

Solingral

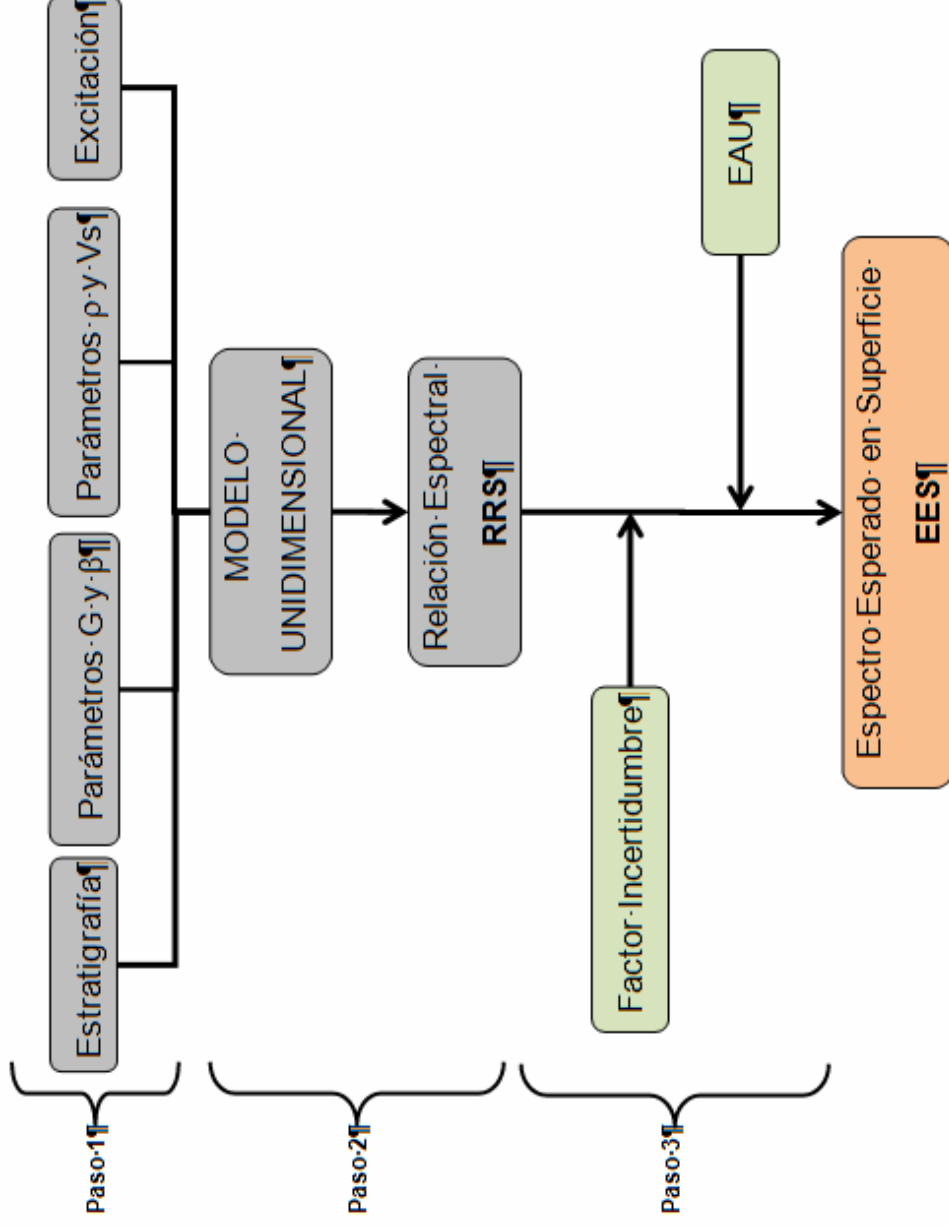
Integración integral  
INTEINSA  
INTEGRACIÓN INTEGRAL

INTEGRAL  
INTEGRACIÓN INTEGRAL

UNIVERSIDAD EAFIT  
Abierta al mundo

UNIVERSIDAD NACIONAL  
DE COLOMBIA  
SEDE NARIÑO

# MICROZONIFICACIÓN



- ♦ Metodología empleada para la determinación de la respuesta sísmica

*Area*  
METROPOLITANA  
del Valle de Aburrá



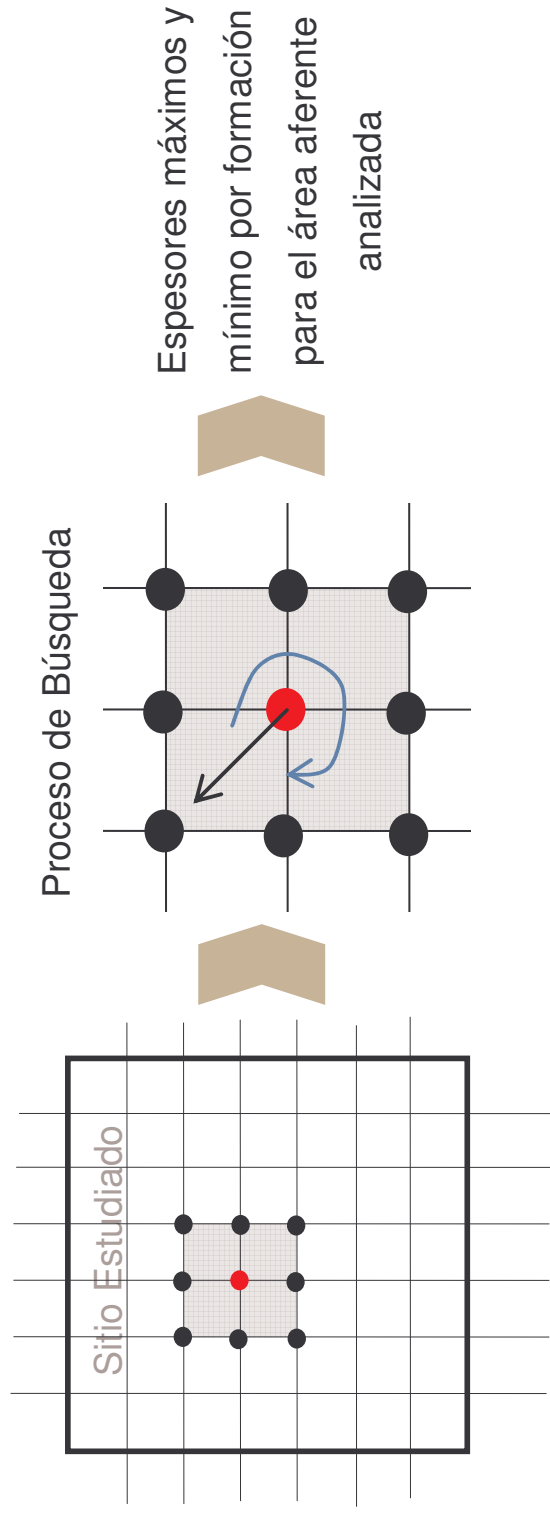
# MICROZONIFICACIÓN

- ♦ **PASO 1.** Determinación de los parámetros geométricos, físicos y dinámicos para el perfil de suelo de suelo evaluado, considerando la incertidumbre relacionada con la determinación y desconocimiento de los parámetros.
- ♦ **PASO 2.** Evaluación de la respuesta a partir del modelo unidimensional para cada uno de los de los sitios estudiados.
- ♦ **PASO 3.** Cálculo de la incertidumbre asociada a la determinación de la respuesta, la cual se obtiene involucrando un factor de incertidumbre dentro de la relación espectral entre el espectro de respuesta en superficie y el espectro de respuesta en la base rígida ( $RRS$ ).

# MICROZONIFICACIÓN

## PASO 1

**Estratigrafía:** Determinar la estratigrafía a partir de la interpretación geológica y la exploración directa e indirecta realizadas en un sitio.



- Puntos por evaluar
- Sitio a evaluar
- Área Aferente

*Area*

METROPOLITANA  
del Valle de Aburrá

# MICROZONIFICACIÓN

## PASO 1.

**Determinación de Cuadrículas:** La lectura de los diferentes perfiles estratigráficos por municipio, se estableció mediante una cuadrícula definida en 200 m por 200 m, aproximadamente, según los requerimientos de la escala de detalle de la información geológica, que corresponde a 1:10 000 y en puntos donde las características geológicas lo ameritaban.

### **Perfiles Por Municipios:**

Caldas: **32**  
La Estrella: **31**  
Sabaneta: **19**  
Envigado: **24**  
Copacabana: **24**  
Girardota: **12**  
Barbosa: **13**

# MICROZONIFICACIÓN

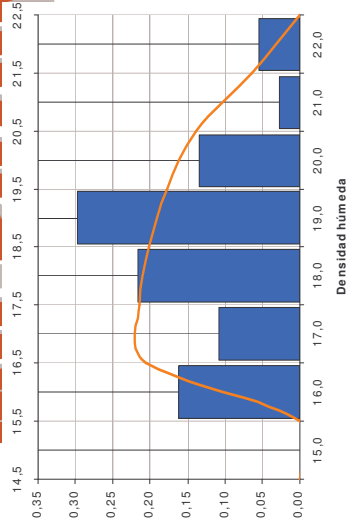
## PASO 1.

**Distribución Beta:** Análisis de correlación entre las variables con la profundidad.

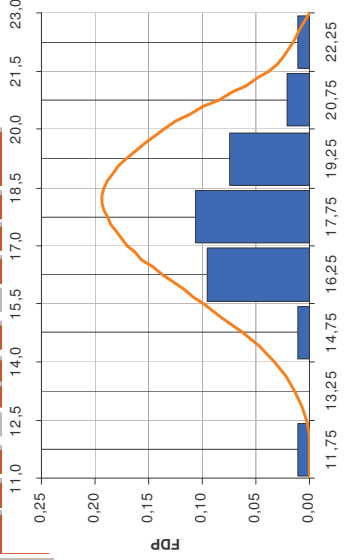
Las variables corresponden a la densidad húmeda y en algunas unidades litológicas a la humedad.

$$f(x, r, t, a, b) = \frac{1}{B(r, t)} \frac{(x - a)^{r-1} (b - x)^{t-1}}{(b - a)^{r+t-1}}$$

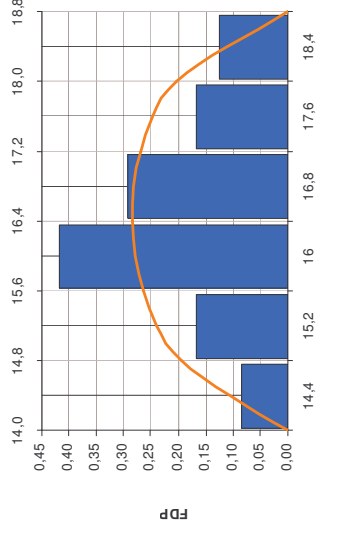
# MINISTERIO DE MINERÍA



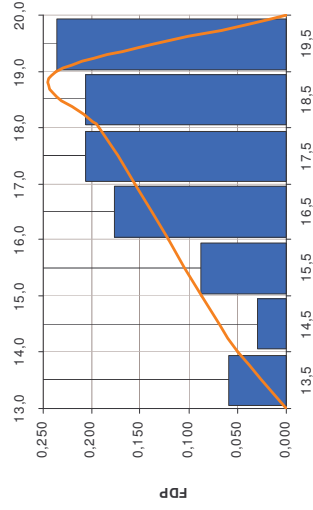
Formación Anfíbolita



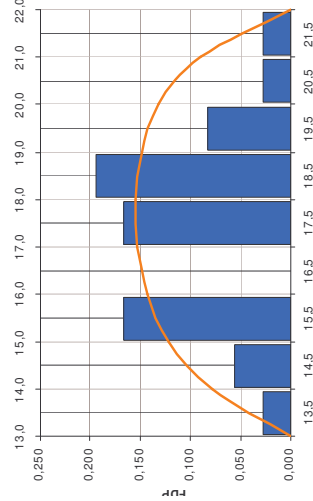
Formación Gneis



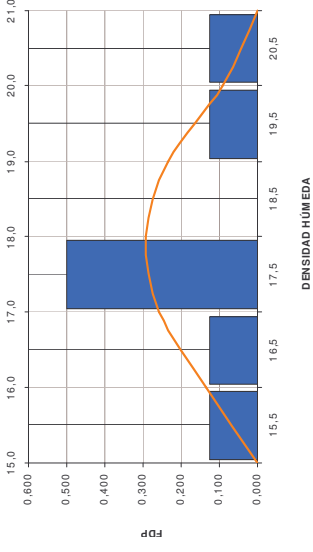
Formación Dunitas



Formación Esquistos



Formación D. Aluviales



D. aluviotorrencial

# MICROZONIFICACIÓN

## PASO 1.

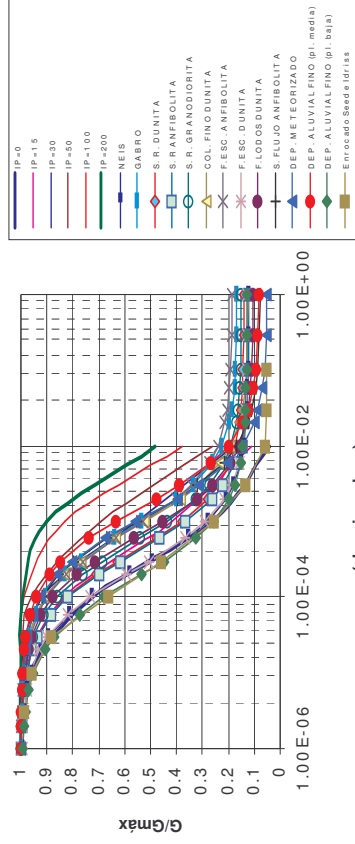
**Parámetros Dinámicos  $G$  y  $b$ :** Los parámetros que determinan el comportamiento dinámico del suelo son el módulo de rigidez al esfuerzo cortante y la relación de amortiguamiento crítico.

Considerando las variaciones que pueden presentarse en las curvas de degradación de los parámetros dinámicos dentro de una misma formación geológica, se propone asignar para cada uno de los análisis de respuesta sísmica las posibles variaciones que presentan las curvas dentro de cada formación.

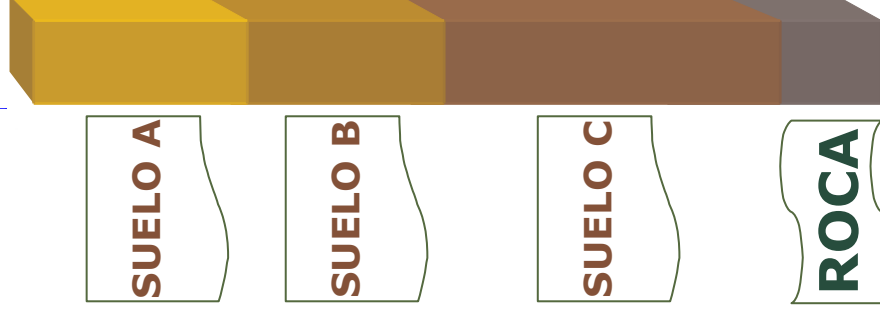
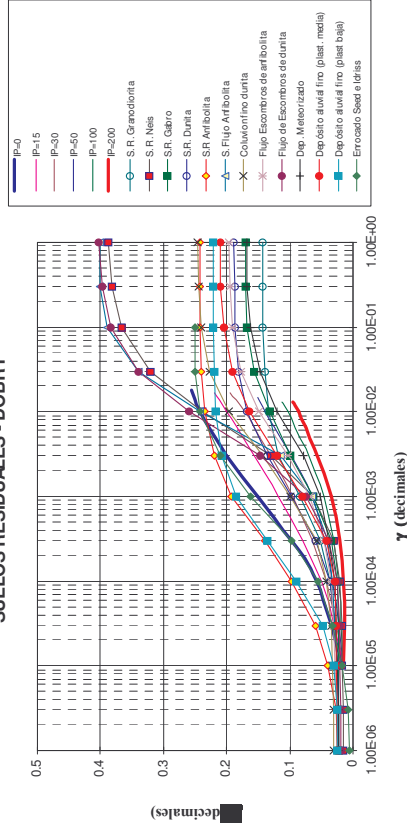


# MICROZONIFICACIÓN

RELACIÓN  $G/G_{m\acute{a}x}$  vs DEFORMACIÓN



FRACCIÓN DE AMORTIGUAMIENTO CRÍTICO vs DEFORMACIÓN  
SUELOS RESIDUALES - DOBRY



*Area*

**METROPOLITANA**  
del Valle de Aburrá

# MICROZONIFICACIÓN

## PASO 1.

**Excitación:** El modelo de evaluación de respuesta empleado en este estudio requiere de registros de aceleraciones que representen el ambiente tectónico de la zona de estudio.

En Colombia, se presentan dos claros procesos generadores de eventos sísmicos: i) un proceso de subducción, en el cual la corteza oceánica subduce a la corteza continental (Región occidental del país) y ii) un proceso intraplaca donde se presentan eventos sísmicos por el movimiento de fallas activas.

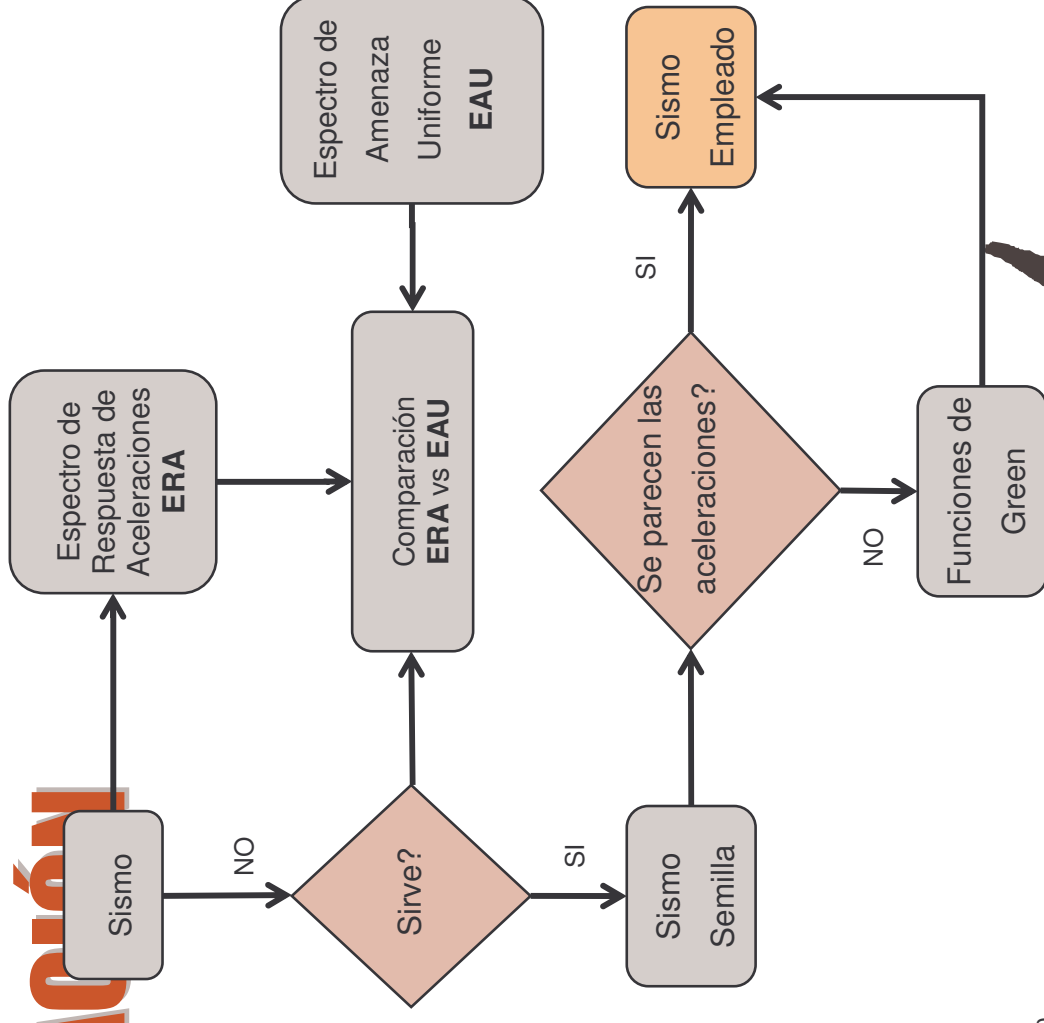
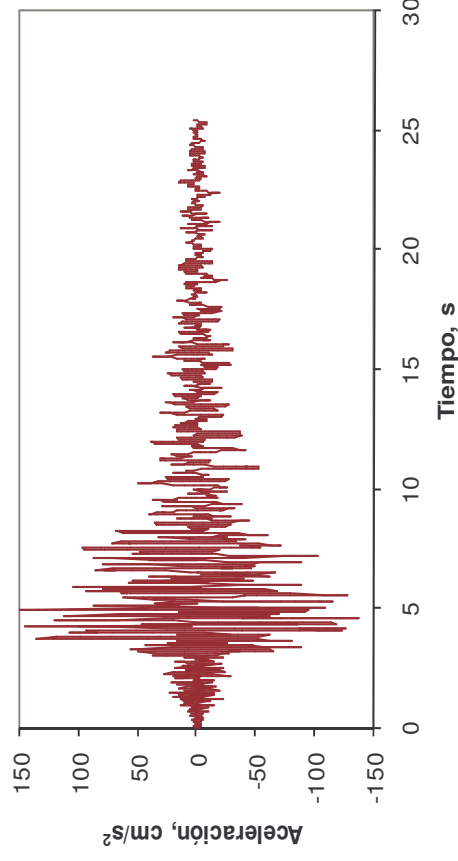
.

# MICROZONIFICACIÓN

| Evento<br>(dd/mm/aaaa) | Epicentro                  | Magnitud<br>(Mw) | Profundidad<br>(km) | Origen     |
|------------------------|----------------------------|------------------|---------------------|------------|
| 25/03/1990             | Cómbano de Punta Arenas    | 7.1              | 16.3                | Subducción |
| 22/12/1990             | Piedras Negras - Alajuela  | 6                | 5                   | Local      |
| 22/04/1991             | Valle de la Estrella Limón | 7.7              | 10                  | Local      |
| 20/08/1999             | Dominical de Osa           | 6.8              | 22                  | Subducción |
| 25/12/2003             | Puerto Armuelles de Panamá | 6.6              | 26                  | Local      |
| 20/11/2004             | Damas de Aguirre           | 6.2              | 25                  | Subducción |
| 09/05/1998             | Rivas de Pérez Zeledón     | 4.2              | 13                  | Local      |
| 16/09/2003             | Santiago de Puriscal       | 5.4              | 54.9                | Subducción |
| 17/10/2003             | Orosí                      | 4.2              | 10                  | Local      |

# MICROZONIFICACIÓN

La metodología desarrollada para la selección de los sismos empleados como excitación del modelo empleado para la obtención de la respuesta sísmica, consideró la siguiente metodología:



*Area*

**METROPOLITANA**  
del Valle de Aburrá

**Solingral**

**INTEINSA**  
Ingeniería Integral

**INTEGRAL**  
Ingeniería

**UNIVERSIDAD EAFIT**  
Abierta al mundo

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA**  
SERVICIO NACIONAL

# MICROZONIFICACIÓN

## ♦PASO 2.

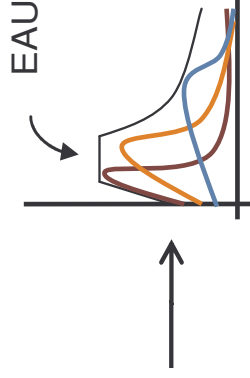
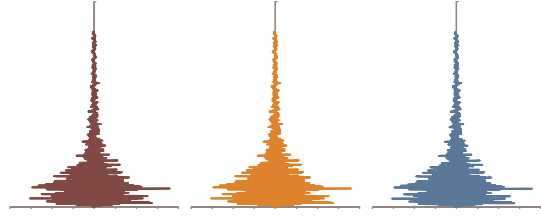
### Se emplearon:

**3 sismos** cuyos espectros de respuesta cubren diferentes zonas de los espectros de amenaza uniforme para 475 años y 9.3 años  
**30 casos** de variación de las variables involucradas y con ello se producen 30 respuestas asociadas a cada sismo de excitación.

### Se obtienen:

**Las relaciones espectrales,  $RRS$  (Ratio Response Spectra).**

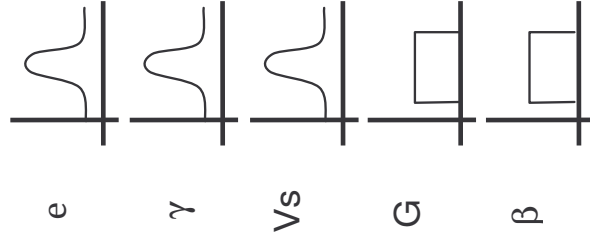
## EXCITACIÓN



90 respuestas  
sísmicas en  
superficie

Relación  
Espectral  
RRS

## SUELO



Se proponen  
aleatoriamente 30  
Casos por sismo a  
partir de las  
variaciones de las  
propiedades



# MICROZONIFICACIÓN

## PASO 3

A partir de la metodología propuesta en este estudio se propone establecer:

- i) Los efectos que puede sufrir el perfil de suelo evaluado, para diferentes condiciones de excitación del mismo, a través de la RRS
- ii) El espectro de aceleraciones esperado en superficie a partir de la multiplicación del espectro de amenaza uniforme esperado para el sitio evaluado por la media de la relación espectral obtenida en el paso anterior.

Para considerar las incertidumbre dentro de la RRS, Jaramillo (2006) propone un factor que permite cuantificar dicha incertidumbre a través de la media obtenida de la relaciones espectrales entre la señal de roca y la respuesta obtenida a partir del modelo 1D.

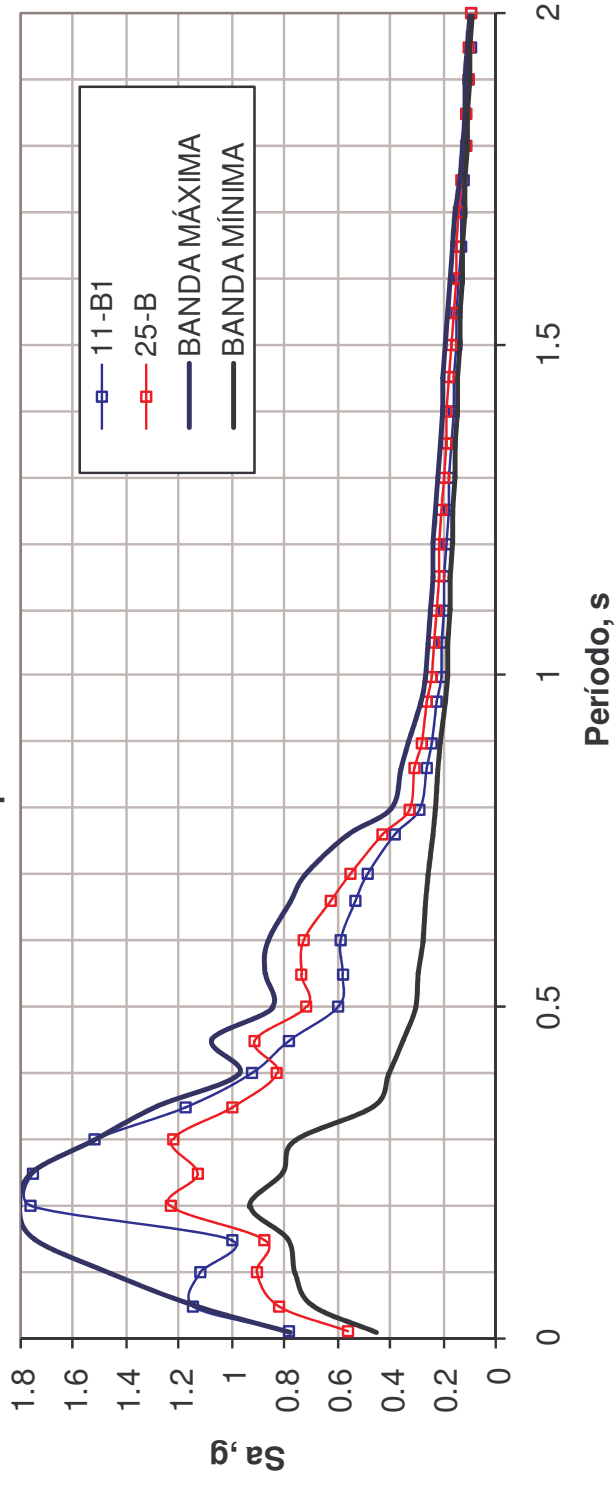
*Ara*

**METROPOLITANA**  
del Valle de Aburrá

# MICROZONIFICACIÓN

## ✓ Espectros

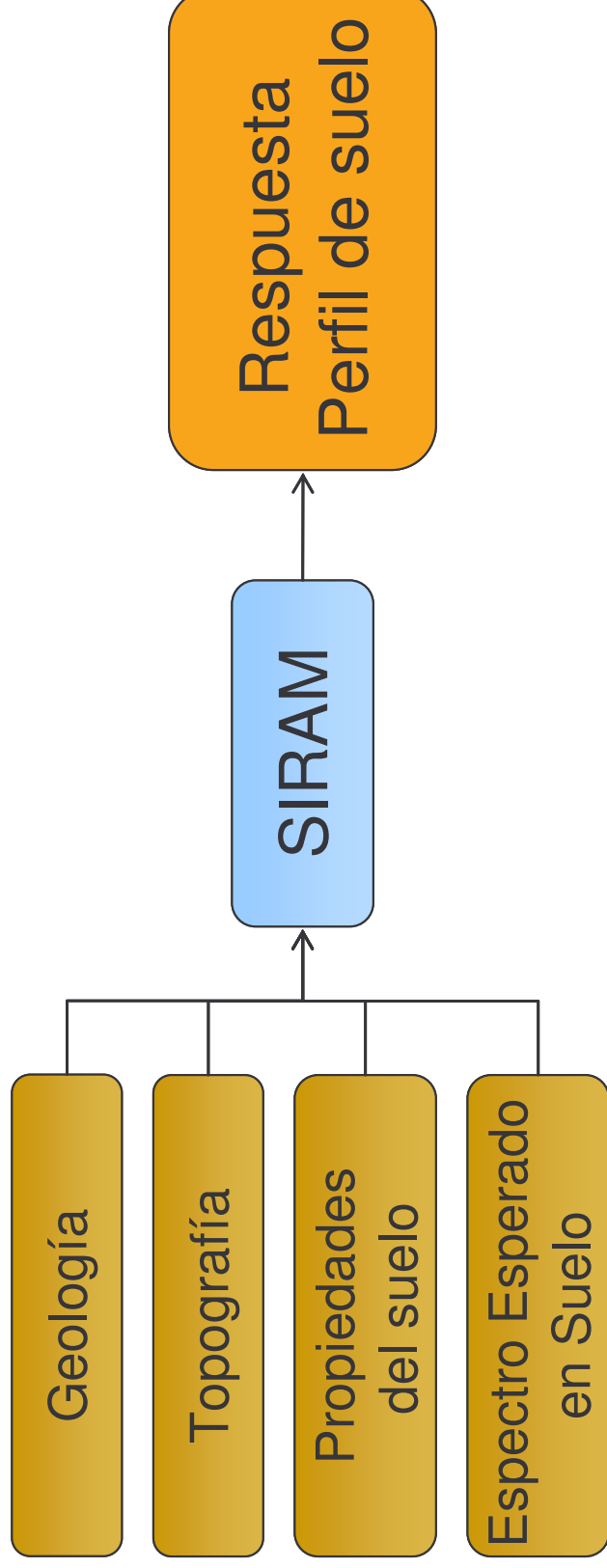
Perfil típico de suelo: KvQg  
Municipio de Caldas



*Area*  
METROPOLITANA  
del Valle de Aburrá

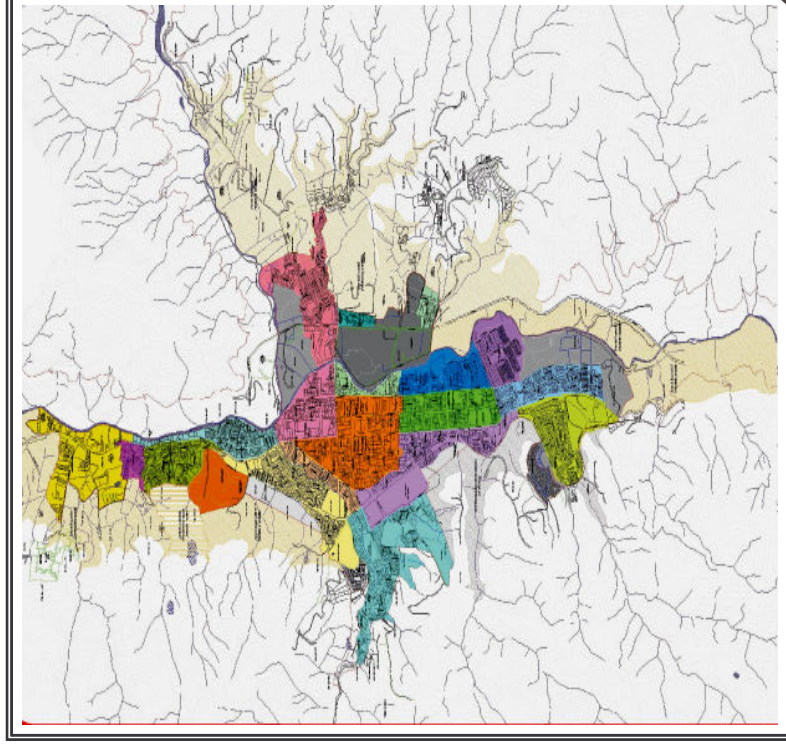
# MICROZONIFICACIÓN

✓ Sistema Integrado de Respuesta del Área Metropolitana



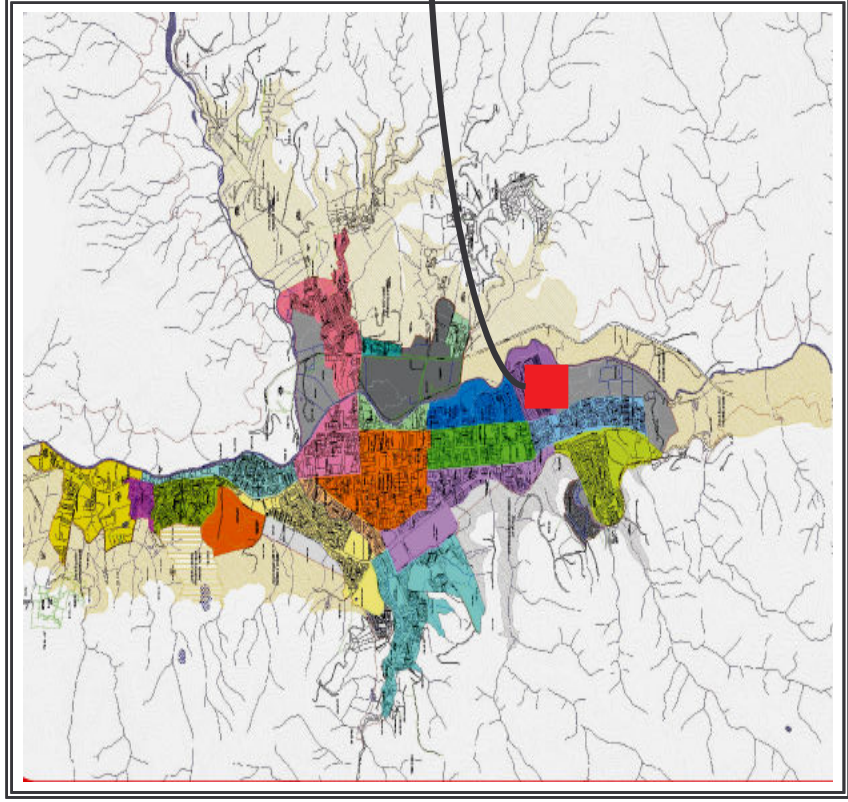


## MUNICIPIO DE CALDAS



*Area*  
**METROPOLITANA**  
del Valle de Aburrá

## MUNICIPIO DE CALDAS



## SITIO DE EVALUACIÓN

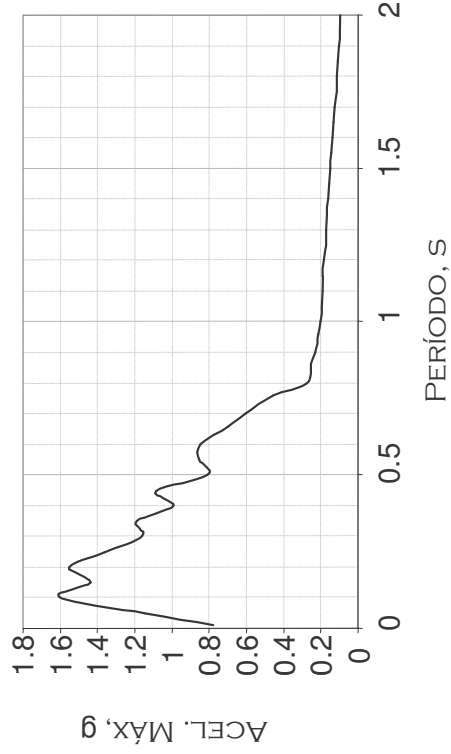
### PERFIL DE SUELO TÍPICO:

FLUJO ROCA VOLCÁNICA

ESPESOR PROMEDIO: 8 — 12 M

ROCA: FORMACIÓN QUEBRADA GRANDE

### ESPECTRO ESPERADO EN SUELO



| Perfil                                        | $S_{am\acute{a}x}$<br>(g) | Periodo<br>Fundamental<br>(s) | Observaciones                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|-----------------------------------------------|---------------------------|-------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Suelo residual de<br>roca volcánica<br>(KvQg) | 1,2 – 1,8                 | 0,22                          | Bajo las variaciones consideradas dentro del análisis, las posibles respuestas para este perfil típico de suelo, presentan un pico dominante alrededor de 0,22 s. La respuesta máxima y mínima se presenta en la Figura 8.15. Las variaciones de espesores entre ambos sitios son de: 8m para el sitio 11B1 ( $S_{am\acute{a}x}=1,8g$ ) y de 22 m para el sitio 25-B ( $S_{am\acute{a}x}=1,2g$ ).<br>Un segundo pico se presenta en períodos más bajos alrededor de 0,08 s, con una aceleración máxima que puede moverse entre 0,9g y 1,2g. |

Perfil típico de suelo: KvQg  
Municipio de Caldas

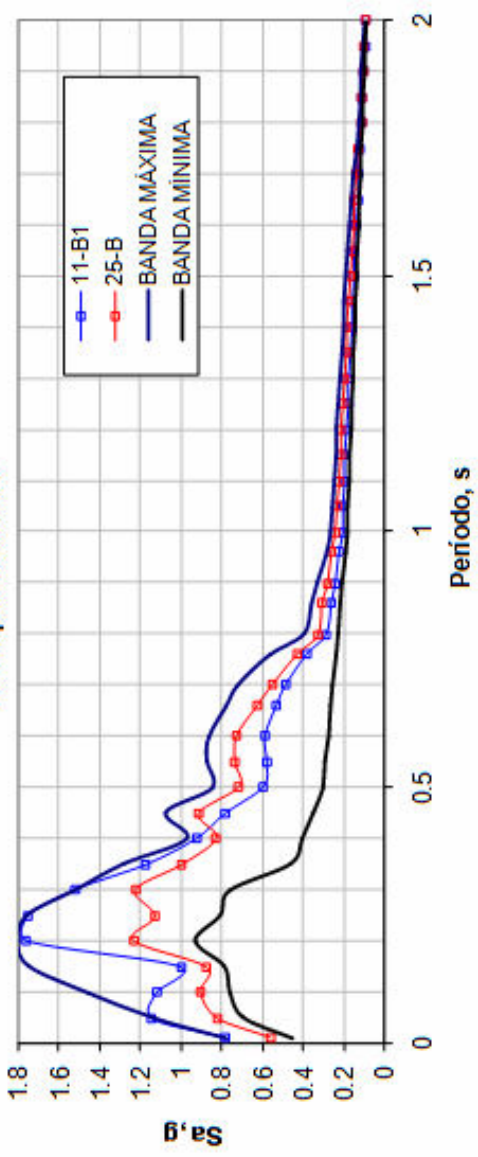


Figura 8.15. Respuesta máxima y mínima obtenida para el suelo residual de roca volcánica.



# CONCLUSIONES

- ✓ Se presenta la evolución en las metodologías empleadas en la evaluación de la amenaza sísmica local y la microzonificación sísmica en los trabajos realizados desde 1996 para la Ciudad de Medellín y el AREA Metropolitana del Valle de Aburrá.
- ✓ Para la elaboración de la microzonificación se han venido incorporando las incertidumbres que se tienen en cuanto a geología, disposición de los perfiles estratigráficos, propiedades de los materiales, escenarios sísmicos esperados y respuesta de los suelos presentes en el AREA Metropolitana.
- ✓ El SIRAM (Sistema Integrado de La Respuesta del AREA Metropolitana) permite definir los espectro de respuesta de aceleración para el sismo de diseño y el sismo de control de daños para los terrenos que conforman cada uno de los municipios del AREA Metropolitana.
- ✓ Esta herramienta tiene importantes aplicaciones en la evaluación del riesgo sísmico y prevención de desastres.

*Area*

**METROPOLITANA**  
del Valle de Aburrá



# Gracias!

CONSORCIO MICROZONIFICACIÓN 2006  
Grupo de Sismología de Medellín

METROPOLITANA  
del Valle de Aburrá



[www.metropol.gov.co](http://www.metropol.gov.co)