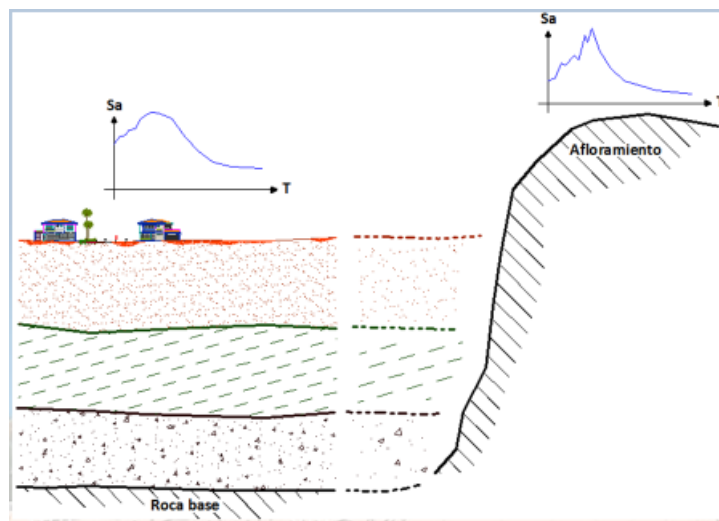


Clasificación de los suelos para efectos sísmicos

En una nota anterior se comentó que los depósitos de suelos blandos amplifican las ondas sísmicas cuando estas atraviesan las capas en su viaje desde la roca basal hacia la superficie. Como consecuencia las aceleraciones en la superficie del depósito de suelo van a ser mayores que en la roca profunda o en los lugares donde la roca aflora a la superficie. Como para diseñar las estructuras necesitamos la *aceleración en la superficie del suelo* es importante en cuenta este fenómeno. En otra nota dijimos que la herramienta básica para calcular las fuerzas que producen los terremotos es lo que se conoce como un *espectro de diseño sísmico*. Este es un gráfico que nos da la aceleración máxima en una estructura de un piso como función del periodo natural de la estructura (en realidad, el espectro nos da una cantidad que se conoce como la pseudo-aceleración, pero no vamos a entrar en estos detalles).

Intentaremos explicar esto con una figura. Los códigos definen el espectro de diseño en una roca superficial (un afloramiento) como se muestra en la siguiente figura a la derecha. Este gráfico es distinto del espectro en la superficie del suelo (la curva a la izquierda) por la amplificación y el filtrado de las ondas sísmicas que discutimos en una nota anterior. Entonces de alguna manera debemos *modificar el espectro en roca* a la derecha para obtener el *espectro en la superficie* del depósito de suelo a la izquierda. Para esto los códigos clasifican los suelos a base de cuan rápido viajan las ondas sísmicas en los estratos del depósito, en particular las ondas **S** o de corte.



Estas clasificaciones han cambiado a lo largo del tiempo. Por ejemplo. En las versiones de la década de los 80 del Uniform Building Code (UBC) había solo tres clasificaciones que se conocían como “soil profiles” (perfiles de suelo) y que se presentan en la siguiente figura:

Tipo de Suelo	Descripción del perfil de suelo
S1	Material tipo roca con $V_s > 762$ m/s (2500 ft/s) o suelos medios-denso a denso o medios-rígidos a rígidos con profundidad < 61 m (200 ft).
S2	Depósito con suelos sin cohesión o arcillas rígidas de profundidad superior a 61 m (200 ft).
S3	Depósito con más de 6 m (20 ft) de arcillas suaves a medio rígidas, pero no más de 12 m (40 ft) de arcillas blandas. Se usa si no se tiene información del perfil.

El terremoto de México del año 1985 demostró que la clasificación anterior no era adecuada. Se agregó entonces un tipo de suelo **S4** para tener en cuenta los perfiles de suelo como aquel donde ocurrieron las amplificaciones en Ciudad de México:

S4	Perfil de suelo que contiene más de 12 m (40 ft) de arcillas blandas con V_s menor que 152 m/s (500 ft/s).
-----------	--

En 1989 ocurrió el terremoto de Loma Prieta (M 6.9) conocido como el “terremoto de la Serie Mundial” porque ocurrió durante el juego entre los San Francisco Giants y Auckland Athletics. Nuevamente la amplificación en algunas zonas fue superior a la que predecían los códigos de entonces. Se tomó la decisión de cambiar totalmente la clasificación a la que se presenta en la tabla siguiente. Hasta hoy en día se sigue usando esta clasificación (conocida como NEHRP). Como se puede ver, los depósitos de suelos se dividen ahora en lo que se llama “*clase de sitio*” (“site class”) que van desde la **A** hasta la **F**. Esto es similar a las notas de un curso, excepto que hay una “nota” **E** antes de la **F**.

Se dice que la clase de sitio **A** corresponde a rocas muy rígidas que solo se encuentran en la costa este de los Estados Unidos, por lo que este tipo no aplica a Puerto Rico.

Tipo de Suelo	Descripción del perfil de suelo
A	Roca dura con velocidad de onda de corte promedio $V_{s30m} > 1500$ m/s (5000 ft/s)
B	Roca con velocidad de onda de corte promedio: 760 m/s (2500 ft/s) $< V_{s30m} < 1500$ m/s (5000 ft/s)
C	Suelo muy denso y roca suave con velocidad de onda promedio 360 m/s (1200 ft/s) $< V_{s30m} < 760$ m/s (2500 ft/s), o con un conteo de golpes promedio de SPT $N_{30m} > 50$, o con resistencia al corte no drenada promedio $S_u > 100$ kPa (2000 psf)
D	Suelo rígido con velocidad de onda de corte promedio 180 m/s (600 ft/s) $< V_{s30m} < 360$ m/s (1200 ft/s), o con un conteo de golpes promedio de SPT $15 \leq N_{30m} \leq 50$, o con resistencia al corte no drenada promedio 50 kPa (1000 psf) $\leq S_u \leq 100$ kPa (2000 psf)
E	Perfil de suelo con velocidad de onda de corte promedio $V_{s30m} < 180$ m/s (600 ft/s), o con un conteo de golpes promedio de SPT $N_{30m} < 50$, o $S_u < 50$ kPa (1000 psf) * o cualquier perfil con más de 30 m (10 ft) de arcilla suave, definida como un suelo con índice de plasticidad $PI > 20$, contenido de agua $w \geq 40$ por ciento y una resistencia al corte no drenada $S_u < 25$ kPa (500 psf)
F	Suelos que requieren evaluaciones específicas en el sitio: por ejemplo, suelos licuables, capas orgánicas o de turba, arcillas suaves o de alta plasticidad, y otras condiciones especiales de sitio.

Para determinar la clase de sitio (el tipo de suelo) hay que hacer uno de tres tipos de ensayos. Los dos más sencillos (y económicos) son:

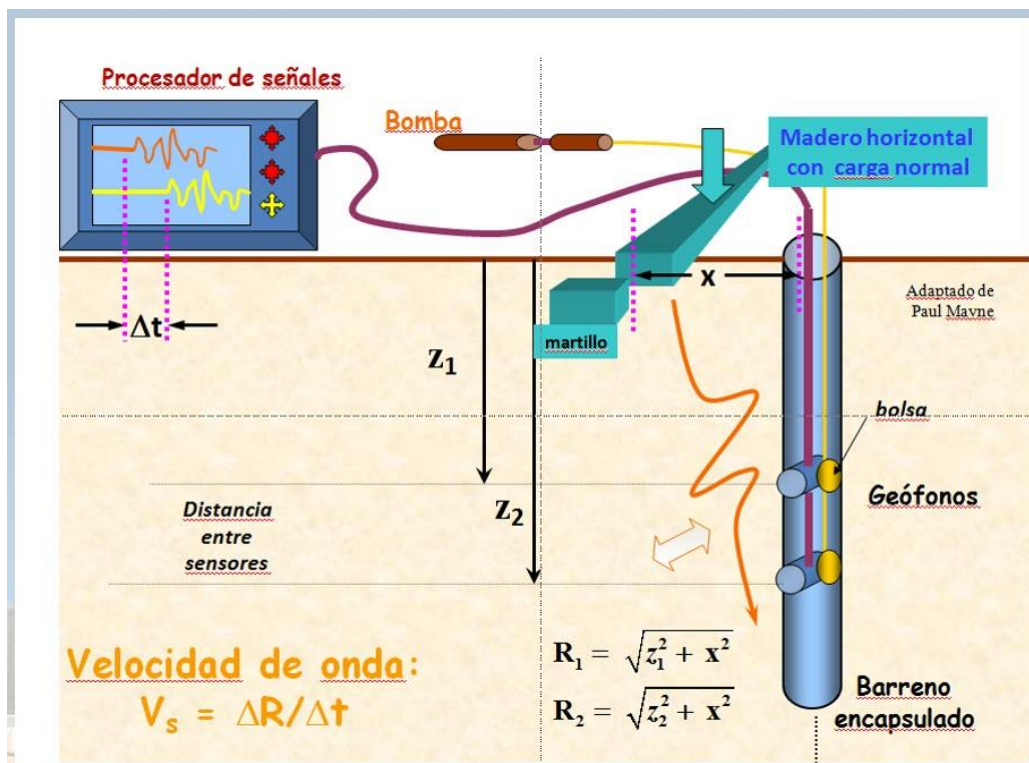
- A base del número \bar{N} (resistencia promedio a la penetración estándar). Este ensayo consiste en medir el número de golpes (N) necesarios para que una herramienta de penetración estándar se introduzca 1 pie en el suelo con un martillo estándar. Es el ensayo más usado para determinar el tipo de suelo.
- A base de la resistencia promedio al cortante en suelos no drenados \bar{S}_u .

Estos dos ensayos tienen algunas limitaciones, en especial para suelos más rígidos. Hay otros ensayos, llamados *geofísicos*) que son más confiables y robustos, pero son lamentablemente más caros y requieren de más experiencia para implementarlos. Estos ensayos persiguen determinar la velocidad de propagación de las ondas sísmicas **S** en las distintas capas de suelo para luego determinar con ellas una velocidad promedio \bar{v}_s . El ensayo (el barreno) debe llegar hasta 100 pies (o 30 m) o hasta encontrar roca o un suelo muy competente. Los ensayos más comunes para determinar \bar{v}_s son:

- El ensayo "Downhole"
- El ensayo "Crosshole"
- El ensayo Análisis Espectral de Ondas Superficiales (SASW, Spectral Analysis of Surface Waves)
- El ensayo de refracción sísmica
- El ensayo de prueba de penetración de cono (CPT, Cone Penetration Test)

La siguiente figura muestra un resumen gráfico del ensayo "downhole", posiblemente el más usado entre los anteriores. Vamos a resumir la explicación del método:

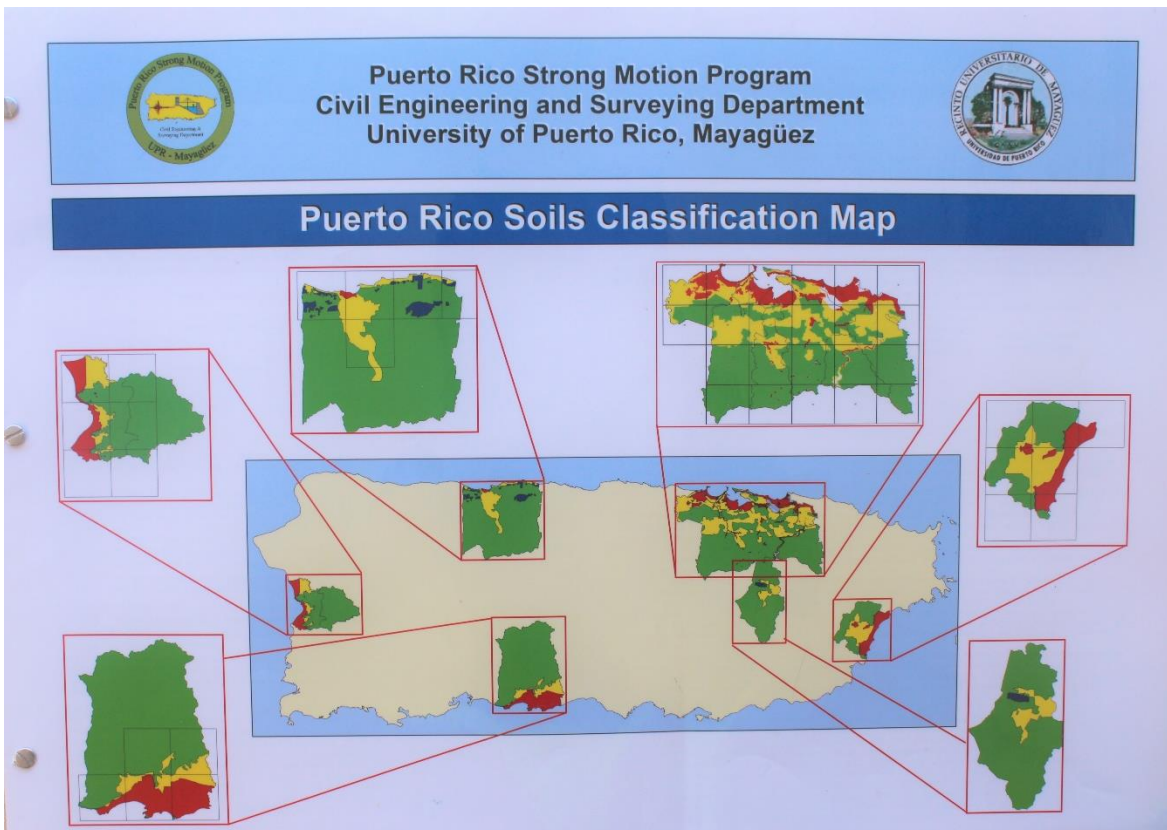
- Se hace un barreno hasta 100 pies (si se puede) y se lo encapsula.
- Se le aplica un golpe horizontal al suelo en el tope del barreno (por ejemplo, mediante un madero presionado contra el suelo) para generar ondas **S**.
- Se mide la velocidad en dos puntos del suelo con dos sensores conocidos como geófonos que están separados una distancia fija Δx (como 2 pies, por ejemplo).
- Usando la diferencia del tiempo Δt en que comienzan las dos señales medidas y la distancia Δx se calcula la velocidad V_s de la onda **S** en esa capa.
- Se bajan más los dos geófonos y se repite todo el proceso anterior.
- Una vez que está tabuladas las velocidades V_s en cada capa se calcula su promedio ponderado.
- Se entra a la tabla de la figura anterior y se obtiene el tipo de perfil de suelo para el sitio.



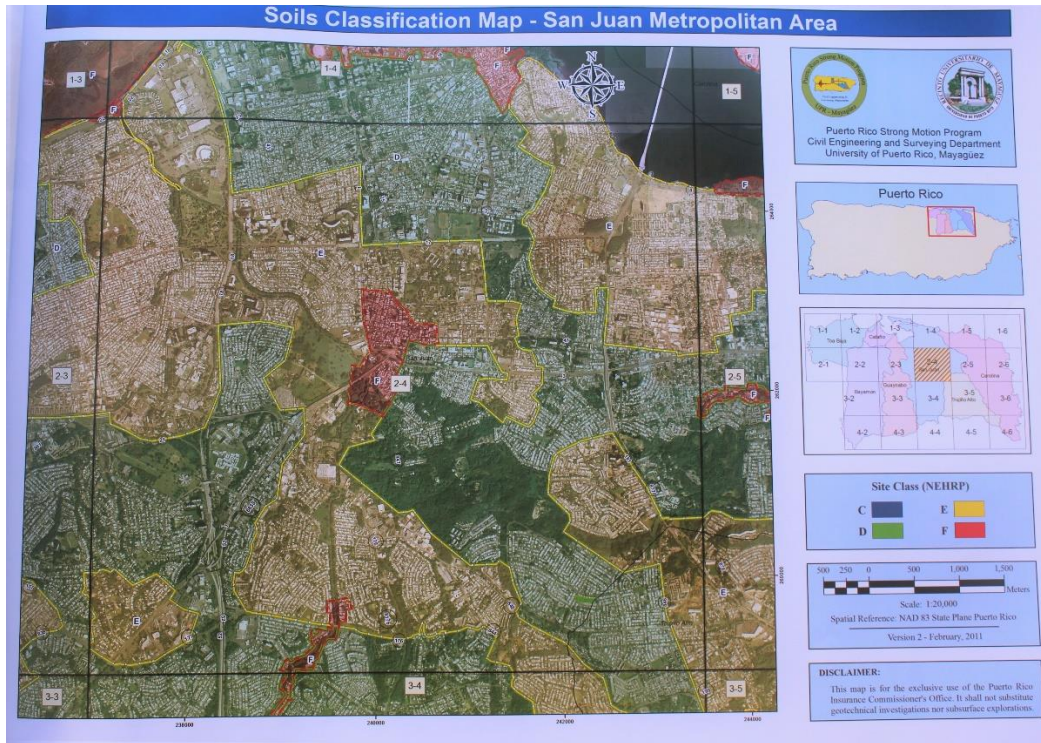
Debido a las dificultades y costos de hacer estos ensayos, solo se justifican para estructuras críticas como por ejemplo un hospital terciario (o donde el dueño está dispuesto a cubrir los costos, como para una compañía farmacéutica). Para otros casos, y como la gran mayoría de las veces no se conoce el perfil del suelo, los códigos recomiendan suponer que la clase de sitio es **D**. Esta suposición es *usualmente* conservadora, pero no siempre. Se recuerda que hay otras clasificaciones que son “peores” que esta: la **E** y la **F**.

Encontrarnos con una clase de sitio **F** causa problemas. Para comenzar, para las clases de sitio **F** no hay mapas del USGS de donde se obtienen las aceleraciones del suelo para el diseño de estructuras. En estos casos se requiere que el diseñador contrate a un experto para que le desarrolle espectros de respuesta *específicos para el sitio*. Posiblemente lo mejor es aplicar técnicas geotécnicas para “mejorar” el suelo y que pase al menos al tipo **E**.

Para ahorrar trabajo y costos a los constructores y diseñadores, y para ayudar a los planificadores urbanos se pueden generar mapas de tipos de suelos para una zona o ciudad determinada. El Departamento de Ingeniería Civil y Agrimensura ha desarrollado mapas de tipo de suelo (clases de sitio) para algunas de las principales ciudades de Puerto Rico. El trabajo fue encargado hace algunos años por la Oficina del Comisionado de Seguros de Puerto Rico. Los mapas de suelos están basados en mucha y diversa información: ensayos geofísicos disponibles, cientos de barrenos provistos por compañías geotécnicas, mapas geológicos, mapas de suelo del USDA, mapas de humedales, etc., etc. Debe tenerse presente que estos mapas no son oficiales, vale decir que no hay ninguna obligación legal de seguirlos impuesta por algún código. La siguiente figura muestra la portada del documento que contiene estos mapas.



Y aquí un ejemplo de lo que contiene este documento para el área de San Juan:



Una vez que se conoce la clase de sitio (A, B, C, D, o E) y siguiendo el procedimiento indicado en los códigos, se genera un **espectro de diseño sísmico** para el sitio de la estructura que tendrá en cuenta (aproximadamente) la amplificación que ocurre en el depósito de suelo debajo de ella. Por ejemplo, la siguiente figura muestra el espectro de diseño del código IBC -09 para Yauco, PR, para los cinco tipos de suelo.

Se recuerda que el espectro de diseño es la herramienta fundamental para el diseño sísmico porque si se multiplica la masa del edificio por la aceleración que se obtiene de este espectro se obtiene la fuerza total máxima que el sismo le aplica a la estructura. Esta fuerza es la que necesitamos para comenzar con el análisis y luego el diseño.

