

# ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON CENIZAS

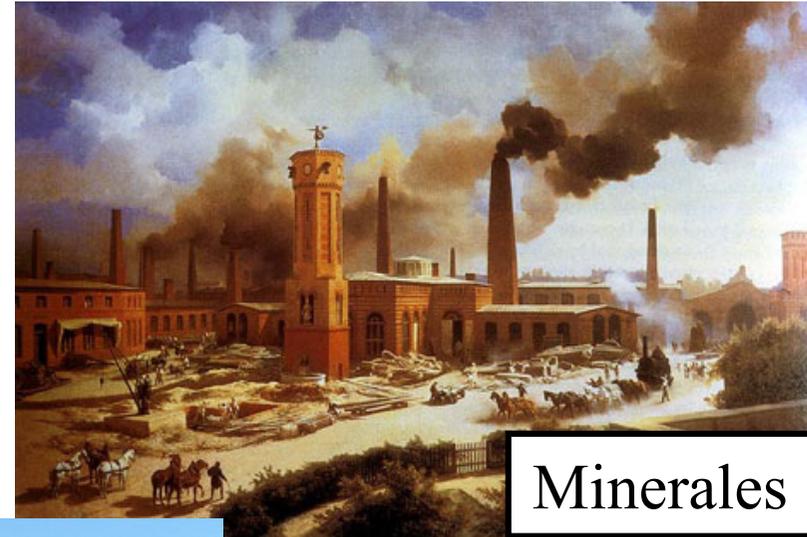
Curso de Actualización Profesional  
2019

## Cenizas

Minerales resultantes de combustión completa de diferentes materiales, compuesto por sustancias inorgánicas no combustibles



Naturales



Minerales



Biomasa

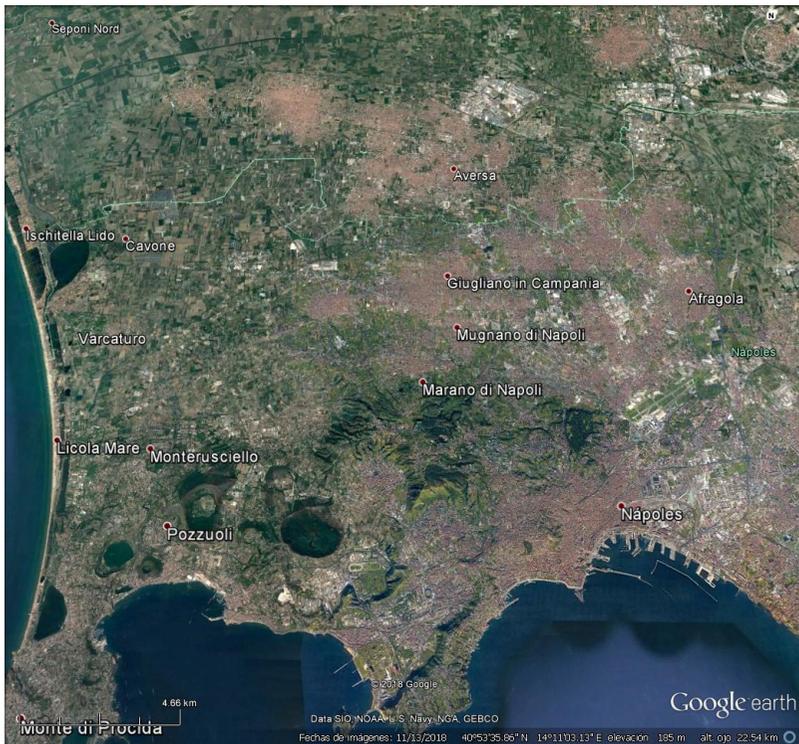
Residuo de bajo costo  
cuyo uso tiene  
beneficios ambientales

## Composición de las Cenizas

Mineral (%)	Cáscara de Arroz <sup>1,2</sup>		Bagazo de Caña <sup>3</sup>	Volcánica	Madera
Sílice (SiO <sub>2</sub> )	93,15	87,2	88,2	59,5	36,4
Alumina (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0,21	0,15	2,3	17,8	9,0
Óxido de Calcio (CaO)	0,41	0,55	0,6	6,3	23,8
Magnesia (MgO)	0,45	0,35	0,4	2,5	3,5
Óxido de Sodio (Na <sub>2</sub> O)	---	1,12	0,1	---	1,5
Potasio (K <sub>2</sub> O)	2,31	3,60	1,3	3,3	6,7
Óxido de Hierro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0,21	0,16	5,1	6,9	6,4
Óxido Fosfórico (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	---	---	0,4	---	1,9

<sup>1</sup>Basha et al. (2003); <sup>2</sup>Rodríguez (2002); <sup>3</sup>Sales & Lima (2010); <sup>4</sup>Hossain & Mol (2011); <sup>5</sup>Berra et al. (2015)

## Puzolana (ASTM C125)



Material silicoso y/o aluminoso que por sí solo posee poca o ninguna capacidad de cementación, aunque en forma finamente dividida y en presencia de agua reacciona químicamente con hidróxidos alcalinos y alcalinos terrosos para formar o contribuir a la formación de compuestos cementantes

## Cenizas de Origen Mineral (Carbón)

### ASTM C618

Clase F: No tienen capacidad de cementación

Clase C: Tiene capacidad de cementación

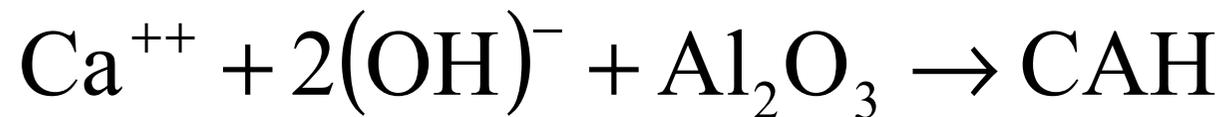
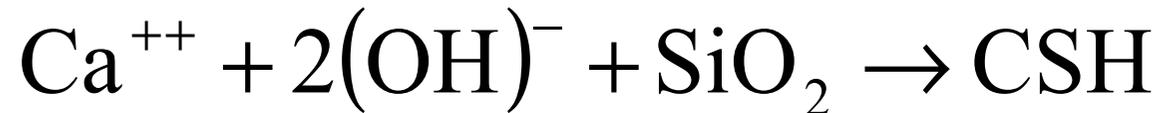
### ASTM C125

Ceniza Volante (Fly Ash): Transportada de zona de combustión a sistema de eliminación de partículas

Ceniza de Fondo (Bottom Ash): Porción más pesada que se asienta en el piso de las calderas

## Reacciones Puzolánicas

Materiales con hidróxidos alcalinos y alcalinos terrosos:  
Cal, Cemento Portland

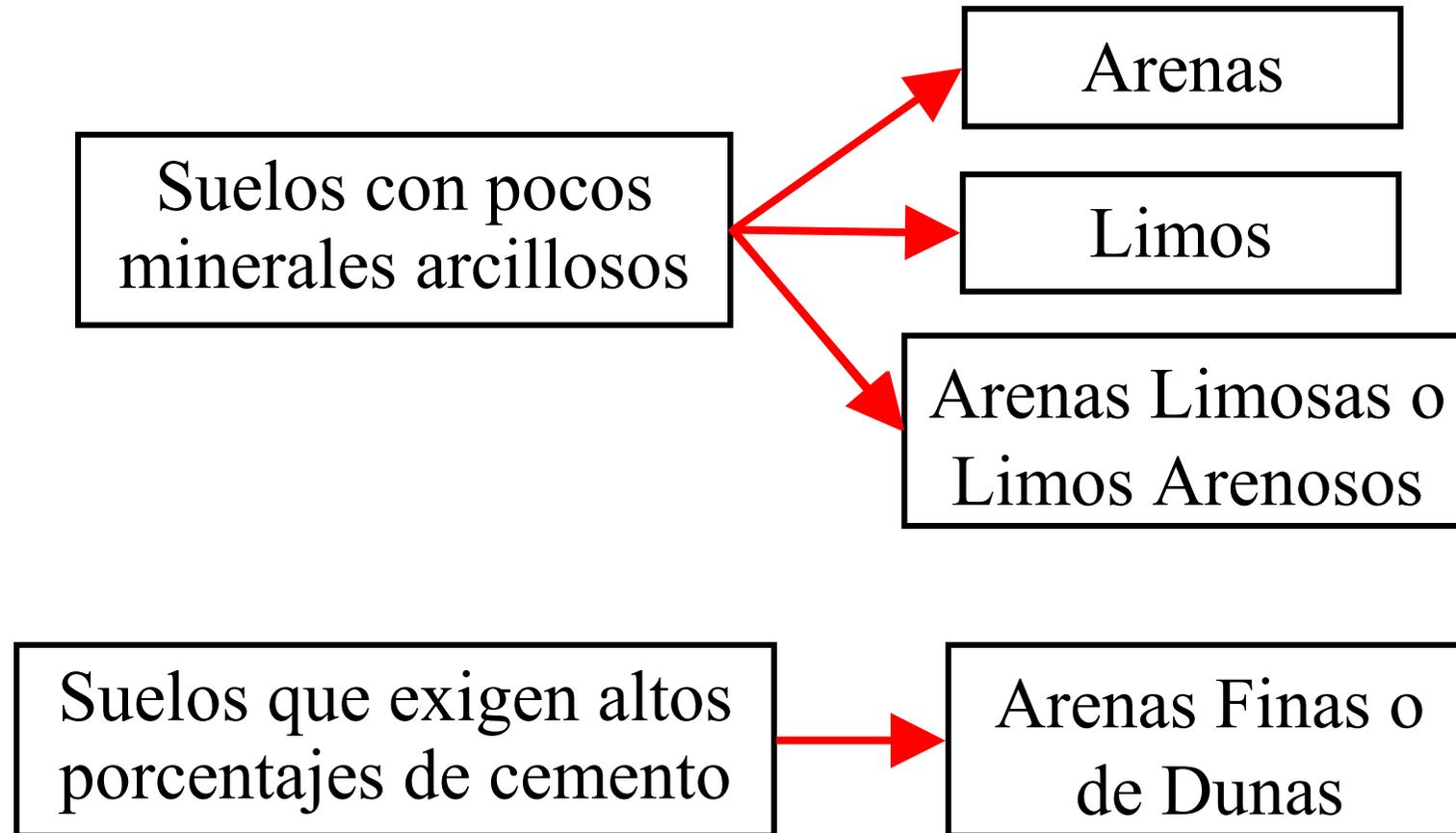


CSH: Silicato de Calcio Hidratado

CAH: Aluminato de Calcio Hidratado

CASH: Sílico-Aluminato de Calcio Hidratado

## Suelos Apropriados para Estabilizar con Cenizas



## Cenizas de Biomasa

Ceniza de Cáscara  
de Arroz (CCA)



Ceniza de Bagazo de Caña  
de Azúcar (CBCA)



Ceniza de Madera  
(CM)



## Reactividad Alcalina de Cenizas de Biomasa

### Estructura de Sílice y Alúmina



- Tipo de ceniza apropiada para reacciones puzolánicas es la amorfa y no la cristalizada (Boateng y Skeete, 1990)

### Contenido de Orgánico

- Retarda reacciones
- Afecta aumento de resistencia

## Clasificación de CCA (Houston, 1972)

Colores se asocian con grado de evolución de proceso de combustión y con transformaciones estructurales de la sílice en la ceniza (Boateng y Skeete, 1990)

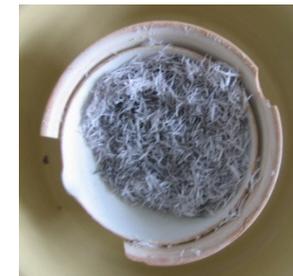
Ceniza con alto contenido de carbón (negra)



Ceniza de bajo contenido de carbón (gris)



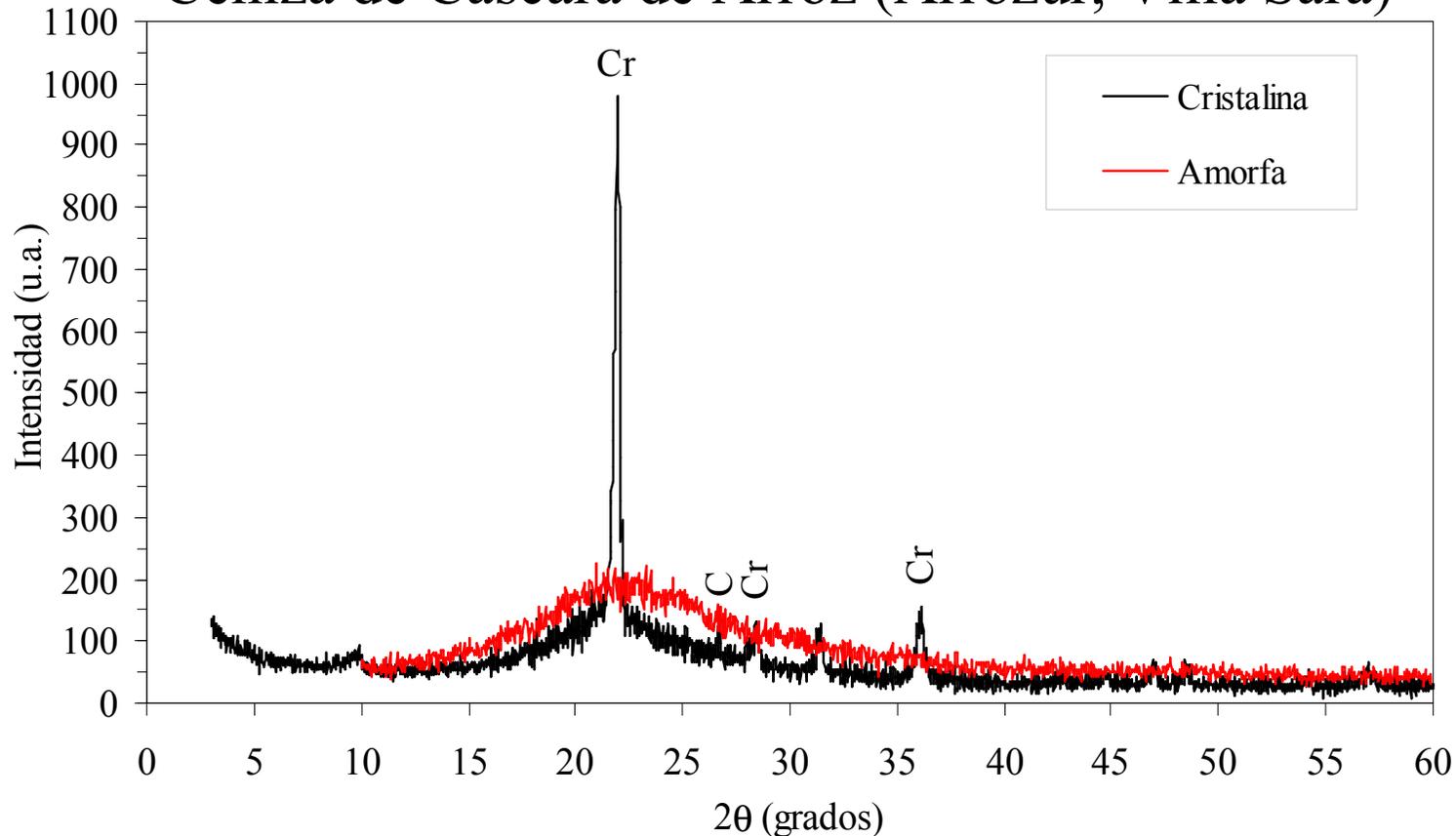
Ceniza libre de carbón (rosada o blanca)



## Determinación Cualitativa de Cristalinidad

### Difractometría de Rayos X

#### Ceniza de Cáscara de Arroz (Arrozur, Villa Sara)



Cr: Cristobalita; C: Carbón

## Contenido de Orgánico

### Ensayo de Pérdidas por Ignición (ASTM D7348)

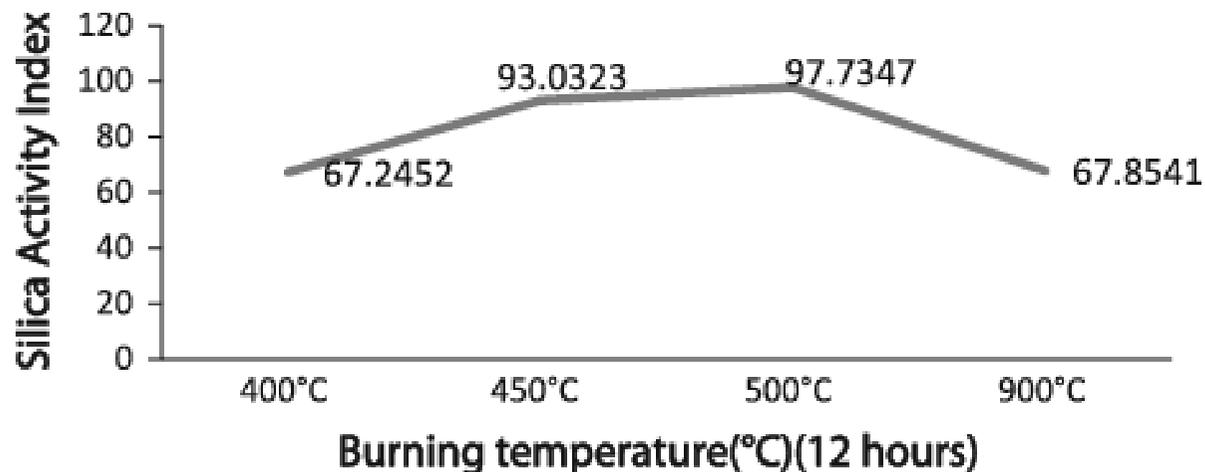
Pérdida de masa de muestra sometida a combustión en  
horno a 550°C por 3 h

Ceniza	LOI (%)
CCA Arrozur	18,6
CCA Galofer	15,0
CCA Arrozal 33	34,1
CCA Demelfor	38,8
CBCA Alur	71,4

## Determinación Cuantitativa de Reactividad Alcalina

Índice de Actividad de Sílice (IAS)  
(Mehta, 1979)

Porcentaje de sílice disponible que se disuelve en un exceso de 0,5M de hidróxido de sodio (NaOH) en un período de extracción de 3 minutos



Deshmukh et al. (2011)

## Factores que Afectan Reactividad de Cenizas

- Temperatura de Quema
  - Tiempo de Quema
- Tiempo de Enfriamiento
  - Modo de Quema

## Temperatura de Quema

Ceniza de Cáscara de Arroz de Arrozur (Behak, 2007)

T = 500 °C



T = 650 °C



T = 800 °C



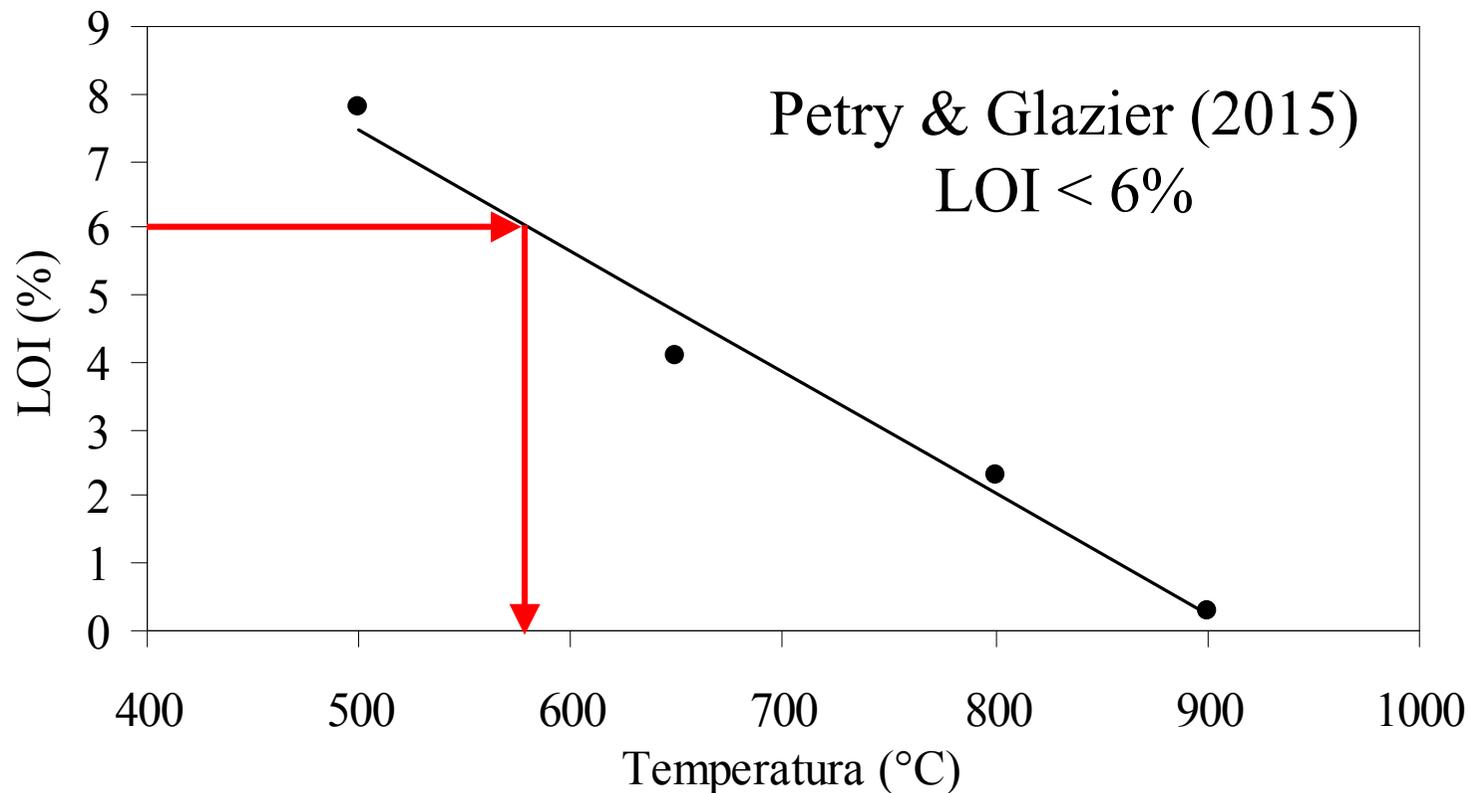
T = 900 °C



## Temperatura de Quema

Pérdidas por Ignición (LOI) a 1000 °C

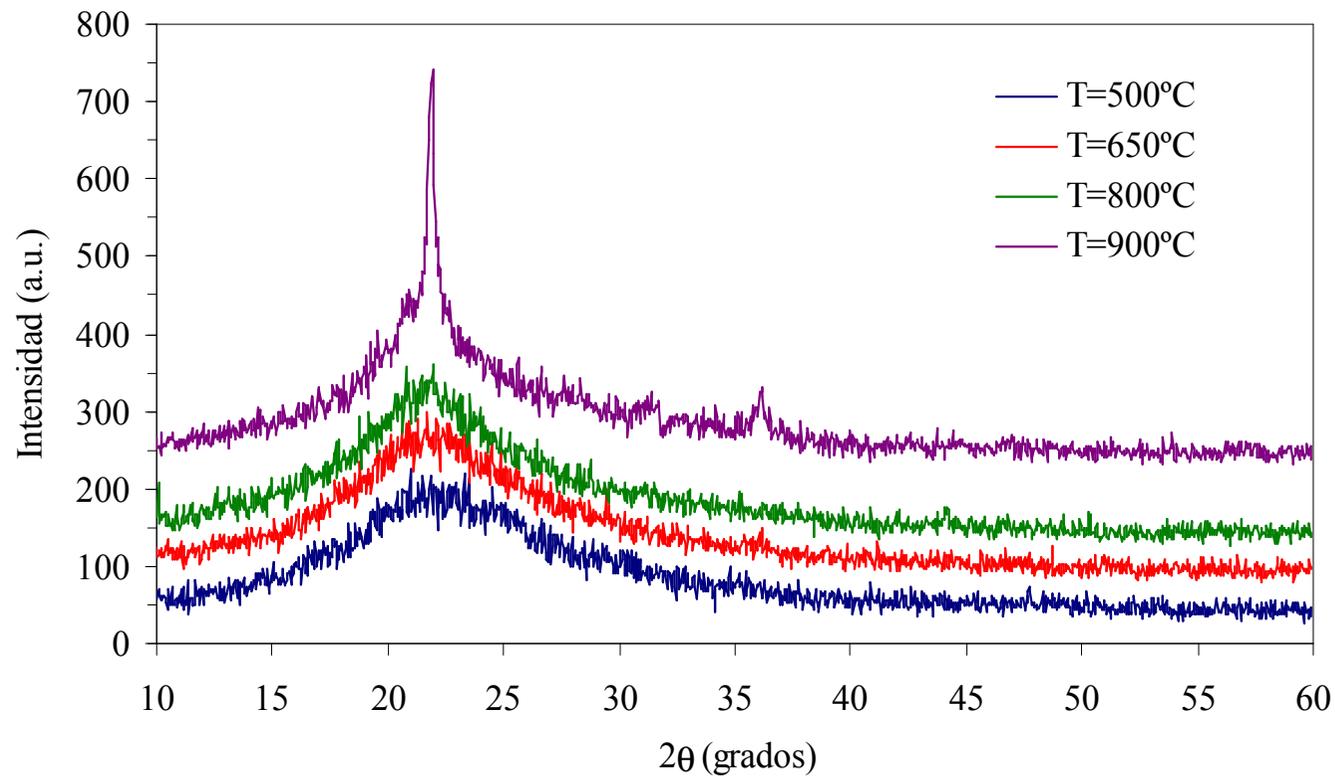
Ceniza de Cáscara de Arroz de Arrozur (Behak, 2007)



## Temperatura de Quema

### DRX

Ceniza de Cáscara de Arroz de Arrozur (Behak, 2007)



## Temperatura de Quema

Behak (2007)

- Temperaturas  $< 650^{\circ}\text{C}$  dejan remanente de orgánico no admisible
- Temperaturas  $> 800^{\circ}\text{C}$  producen formas cristalinas no deseables
- Temperaturas de quema de cáscara de arroz entre  $650^{\circ}\text{C}$  y  $800^{\circ}\text{C}$  producen CCA de máxima reactividad alcalina

## Temperatura de Quema

### Boateng y Skeete (1990)

- Quema de cáscara de arroz entre 550°C y 700°C generalmente produce sílice amorfa
- Temperaturas  $> 900^{\circ}\text{C}$  producen formas cristalinas no deseables
  - CCA con remanente de orgánico  $< 3\%$  quemando a temperatura controlada de 800°C (Rahman, 1986)

## Tiempo de Quema

- Mehta (1979): Sílice esencialmente amorfa con  $T < 500\text{ °C}$  durante período prolongado o hasta  $680\text{ °C}$  con  $t < 1\text{ min}$
- Yeoh et al. (1979): CCA amorfa a  $T$  hasta  $900\text{ °C}$  si  $t < 1\text{ h}$ , y sílice cristalina se produce a  $1000\text{ °C}$  con  $t > 5\text{ min}$
- Smith y Kamwanja (1986): Sílice cristalina en pequeñas proporciones para  $T < 800\text{ °C}$  mantenidas durante  $12\text{ h}$
- Nair et al. (2008):  $T$  de  $500\text{ °C}$  y  $700\text{ °C}$  y  $t$  de más de  $12\text{ h}$  favorecen producción de CCA reactivas

## Modo de Quema

- Tecnología de producción varía desde quema a cielo abierto hasta incineradores especialmente proyectados (Mehta, 1979)
- Incineración a cielo abierto produce cenizas de baja reactividad por altos gradientes de temperatura y formación de sílice cristalina (Boateng y Skeete, 1990)
- Incineración a cielo abierto o en hornos convencionales produce ceniza cristalina (Mehta, 1975)
- Incineración en hornos a temperatura controlada produce ceniza blanca altamente reactiva que mezclada con cal se transforma en un cemento tan bueno como el cemento Portland (Mehta, 1975)

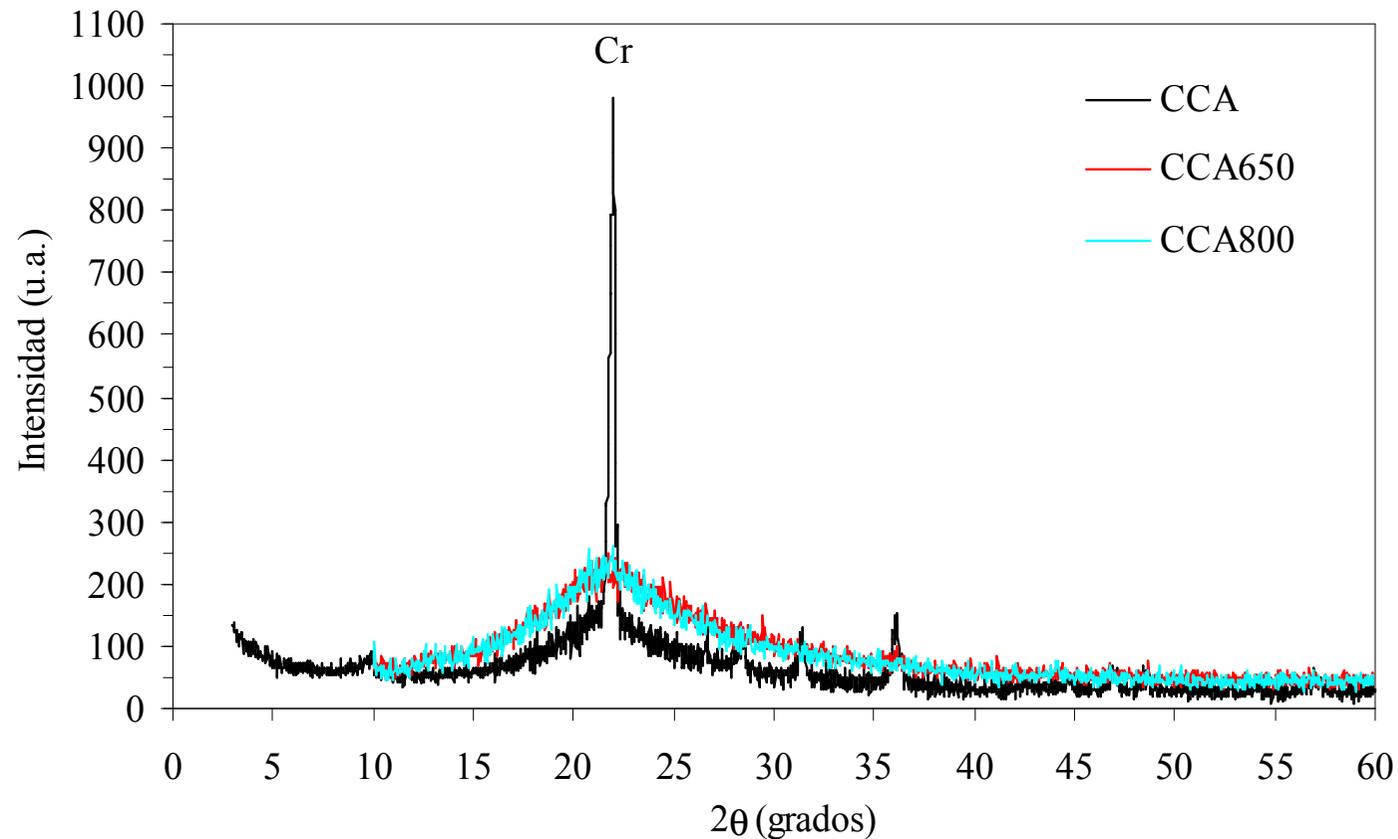
## Modo de Quema

Behak (2017); Behak et al. (2015)

Tipo	Ceniza	LOI (%)
No Controlada	CCA Arrozur	16,8
	CCA Galofer	15,0
	CCA Arrozal 33	34,1
	CCA Demelfor	38,8
	CBCA Alur	71,4
Controlada	CCA Arrozur650	4,1
	CCA Arrozur800	2,3

## Modo de Quema

Ceniza de Cáscara de Arroz de Arrozur (Behak, 2007)



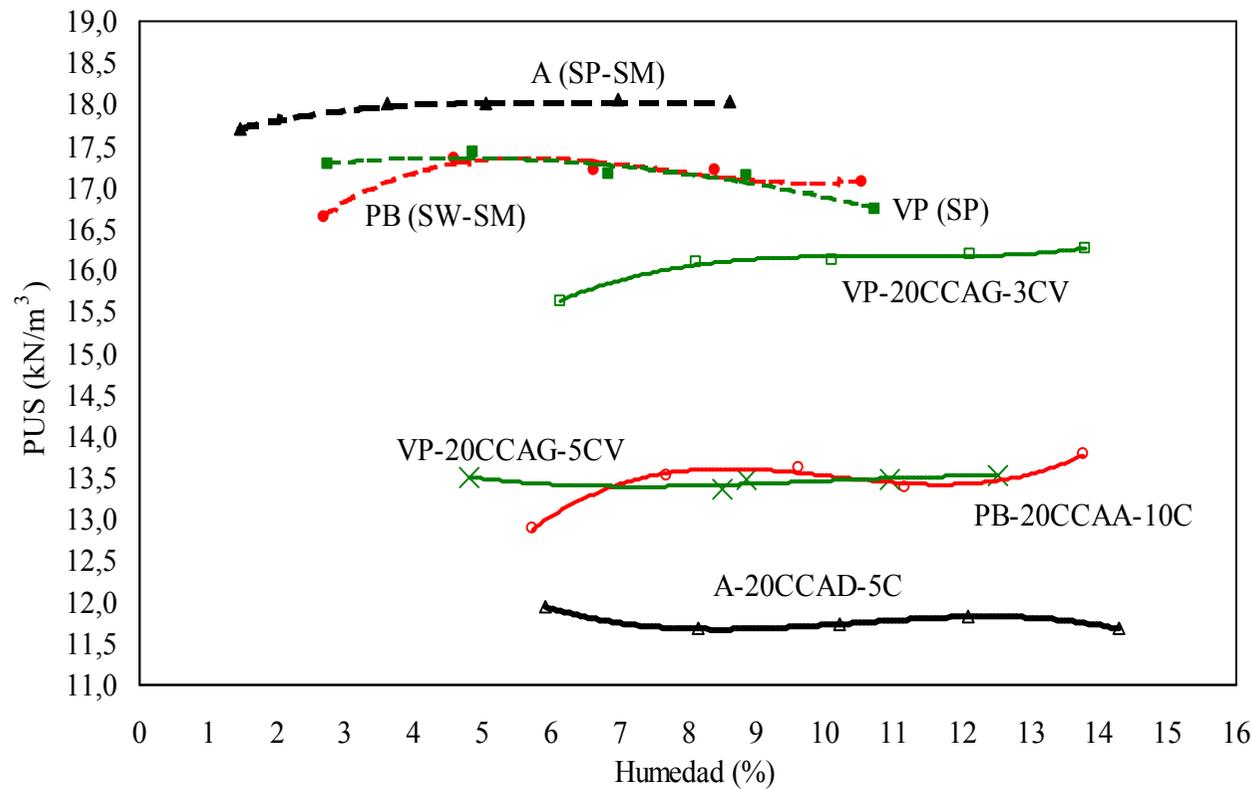
## Método de Dosificación

### Método de RCI (Thompson, 1966)

- Moldear probetas de suelo tratado con diferentes contenidos de ceniza
- Curar probetas durante 48h a temperatura de 48,9°C o durante 28 días en cámara húmeda a temperatura de 22,8°C.
  - Ensayar probetas a compresión inconfiada

# Efectos de la Estabilización con Ceniza Compactación

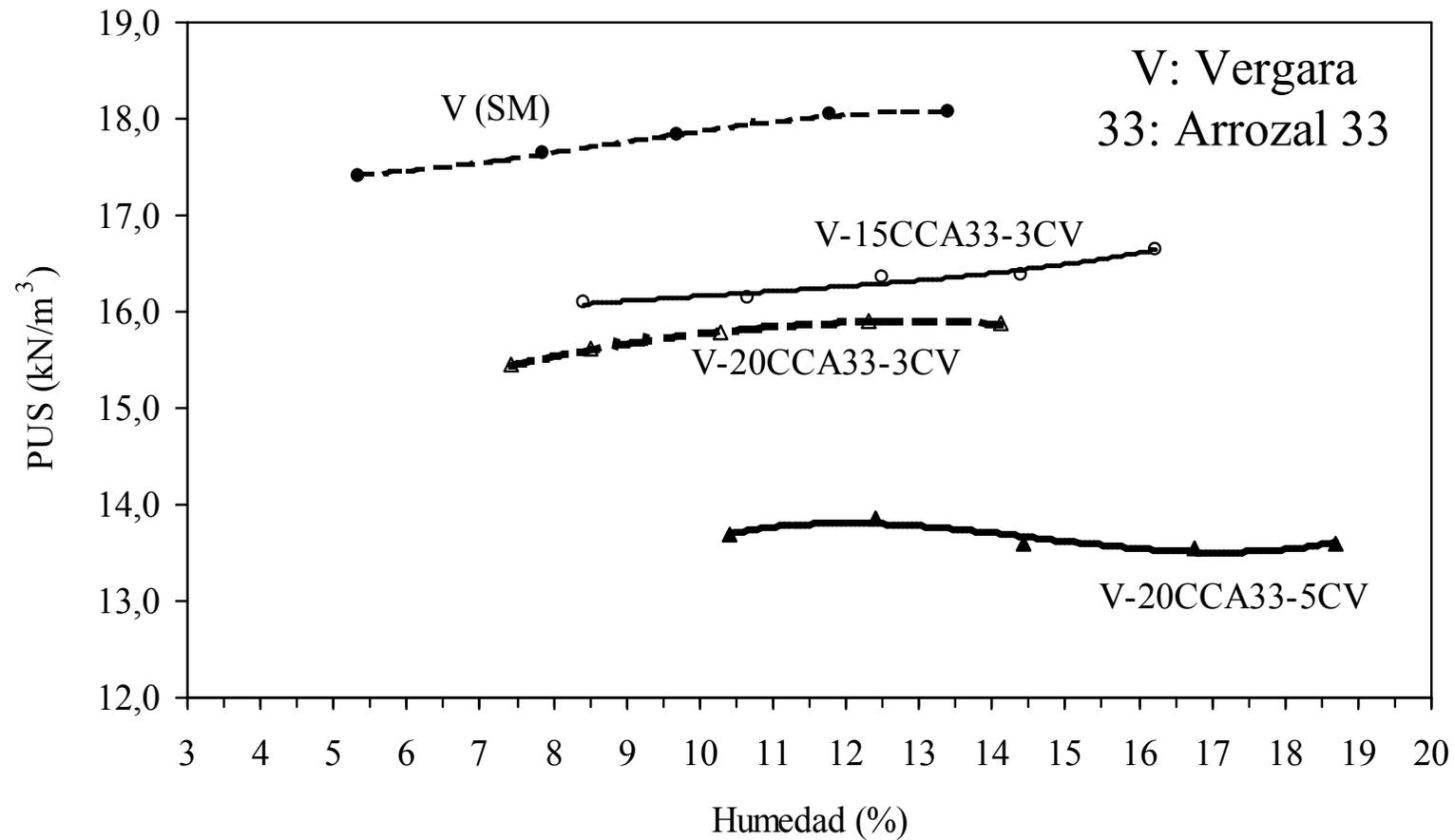
CCAs (Behak, 2017)



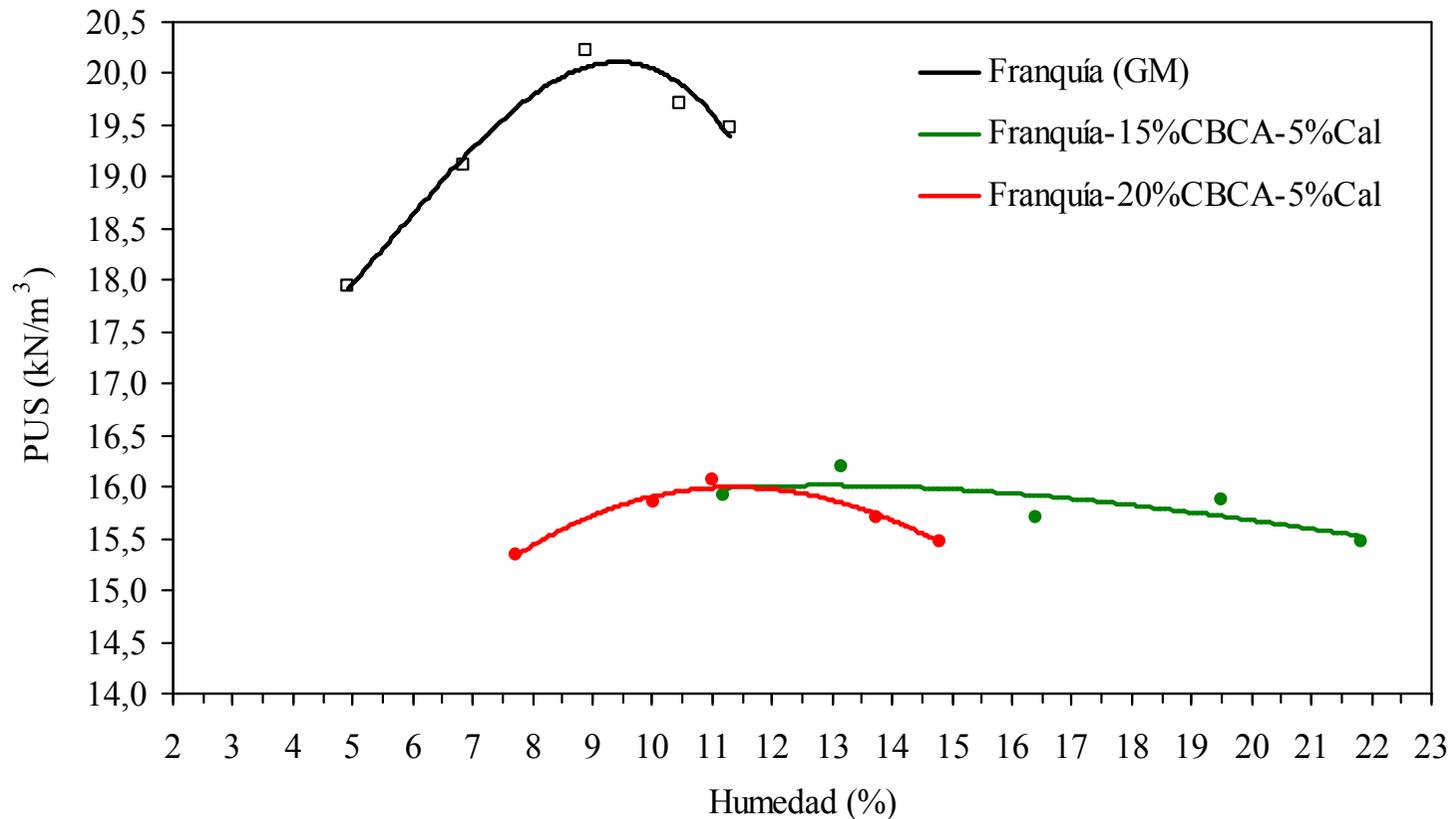
PB: Pérez Bustos; A: Arenisca Tacuarembó; VP: Villa Passano  
A: Arrozur; D: Demelfor; G: Galofer

## Efectos de la Estabilización con Ceniza

### Compactación CCAs (Behak, 2017)

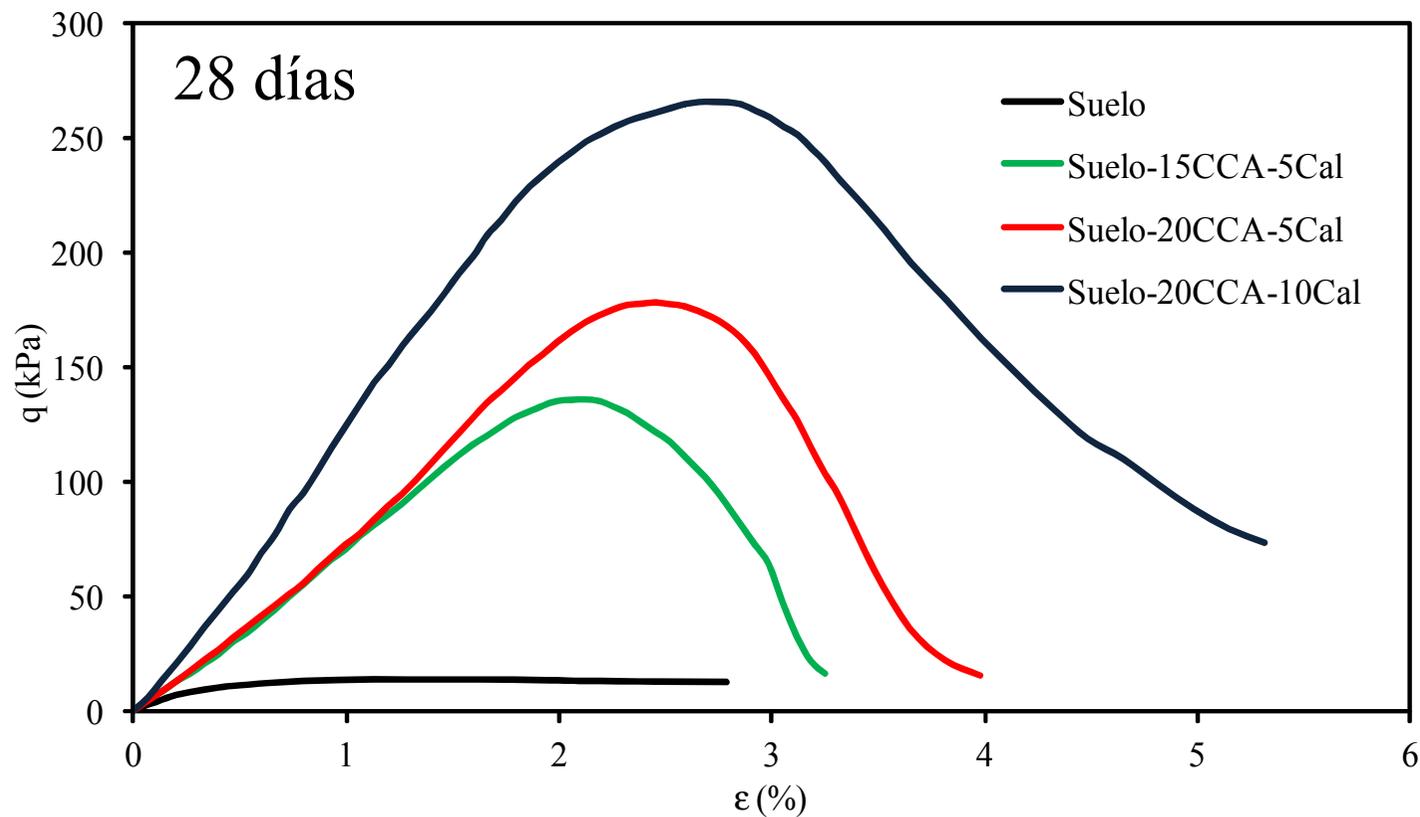


# Efectos de la Estabilización con Ceniza Compactación CBCA (Behak et al., 2015)



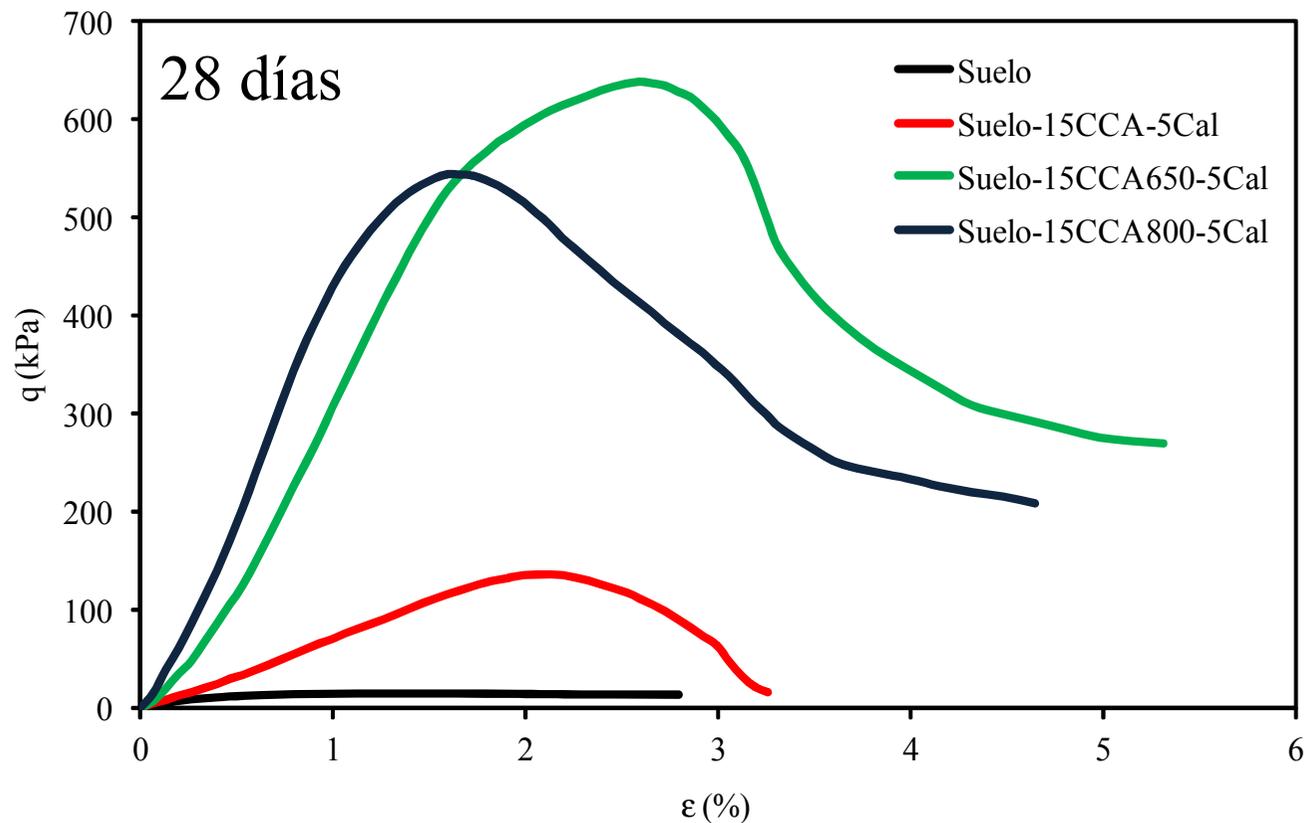
## Efectos de la Estabilización con Ceniza Comportamiento Tensión-Deformación

Suelo de Cantera Pérez Busto (SW-SM)-CCA de Arrozur-Cal  
(Behak, 2007)



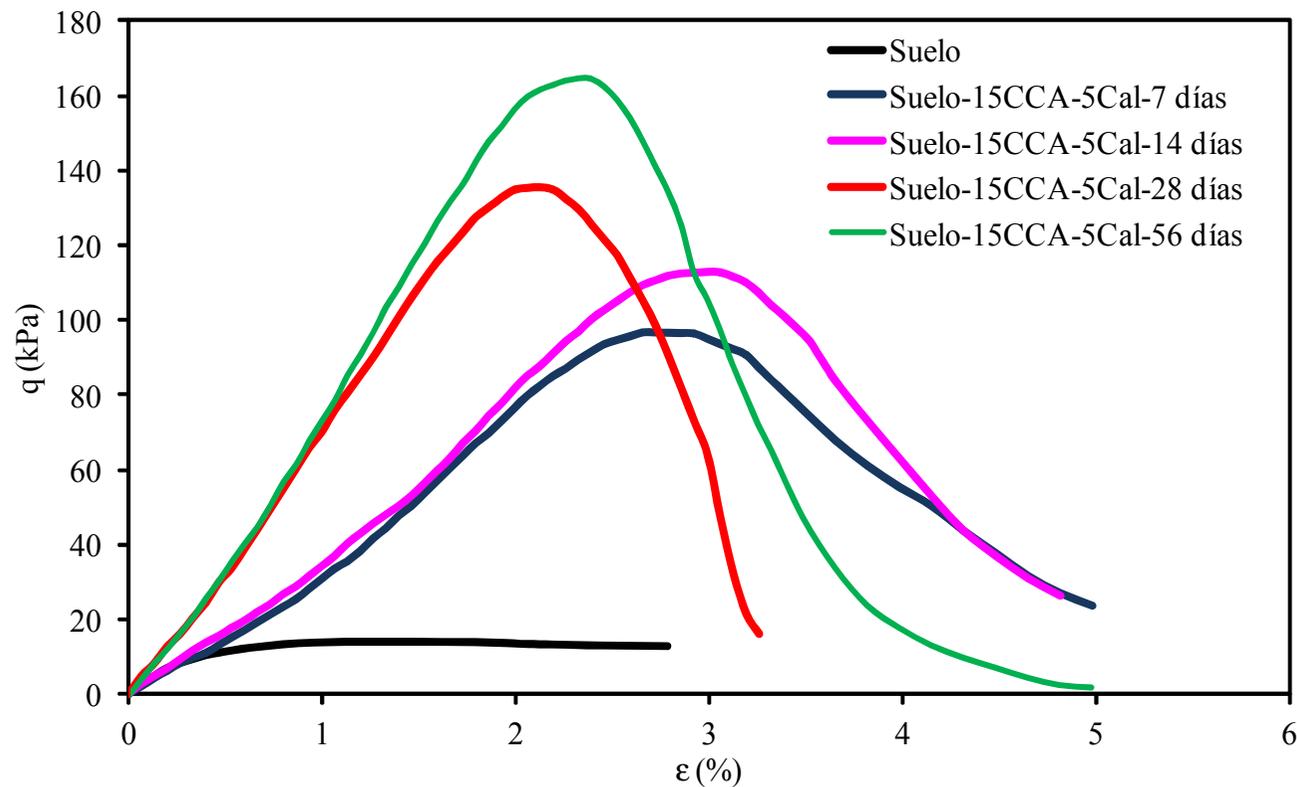
## Efectos de la Estabilización con Ceniza Comportamiento Tensión-Deformación

Suelo de Cantera Pérez Busto (SW-SM)-CCA de Arrozur-Cal  
(Behak, 2007)



## Efectos de la Estabilización con Ceniza Comportamiento Tensión-Deformación

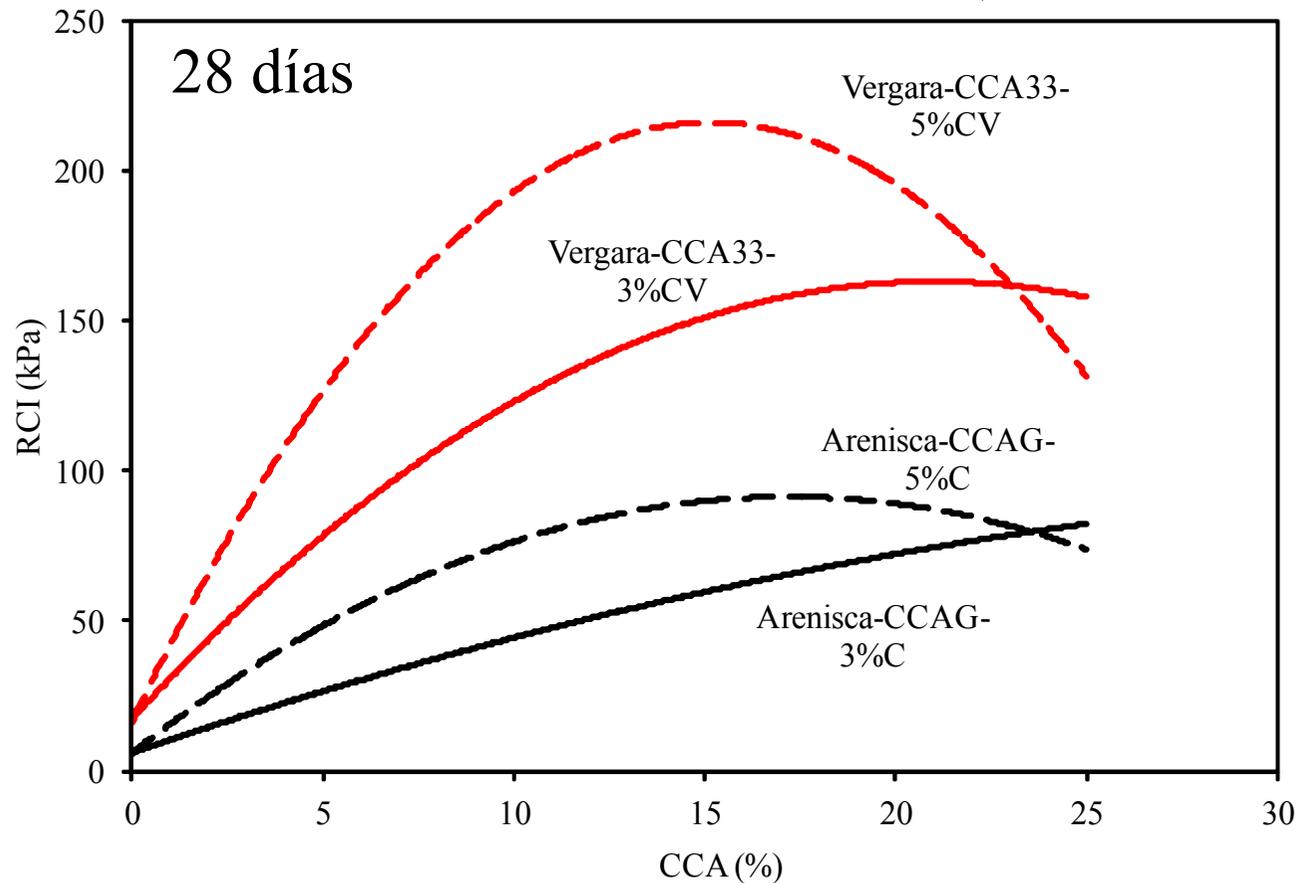
Suelo de Cantera Pérez Busto (SW-SM)-CCA de Arrozur-Cal  
(Behak, 2007)



## Efectos de la Estabilización con Ceniza

### Resistencia a la Compresión Inconfinada (RCI)

Relación con el Contenido de Ceniza (Behak, 2017)

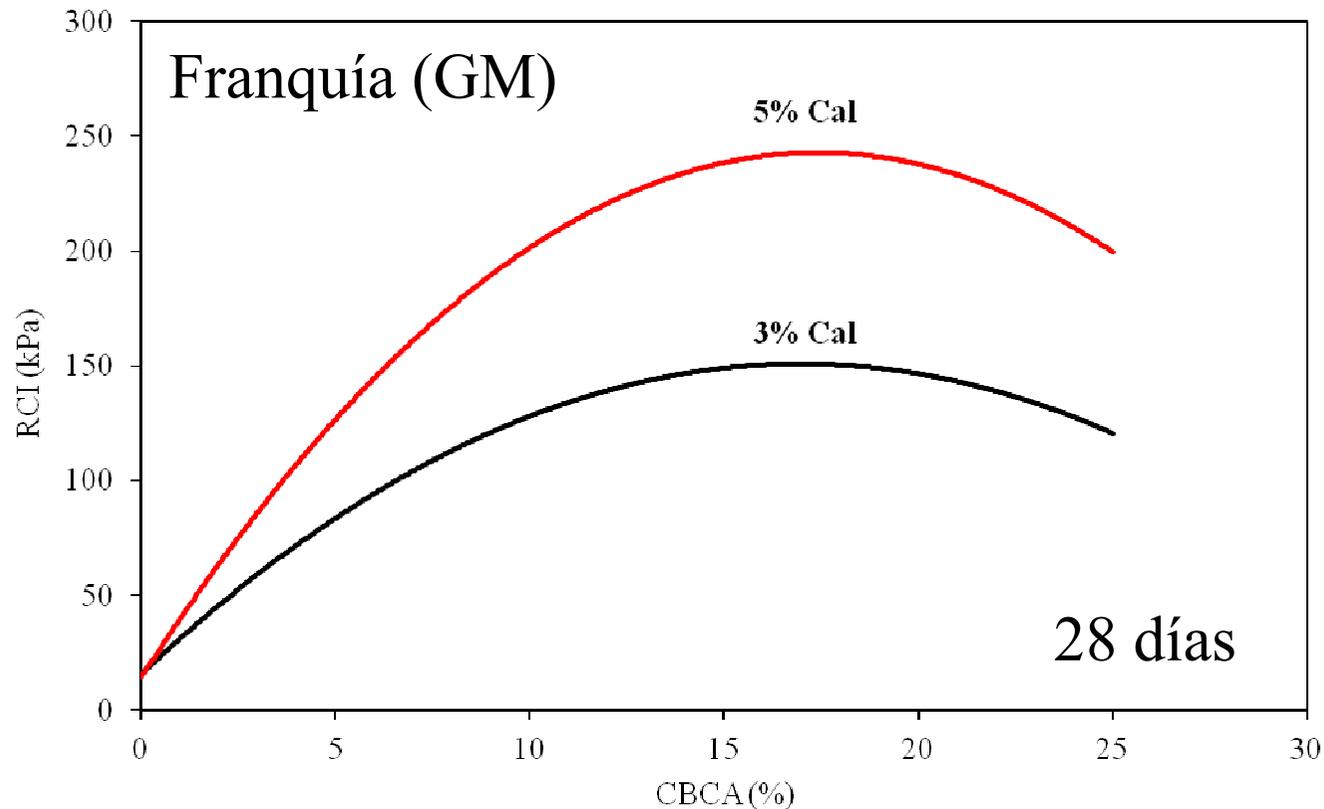


Arenisca (SP-SM); Vergara (SM)

## Efectos de la Estabilización con Ceniza

### RCI

Relación con el Contenido de Ceniza (Behak et al., 2015)

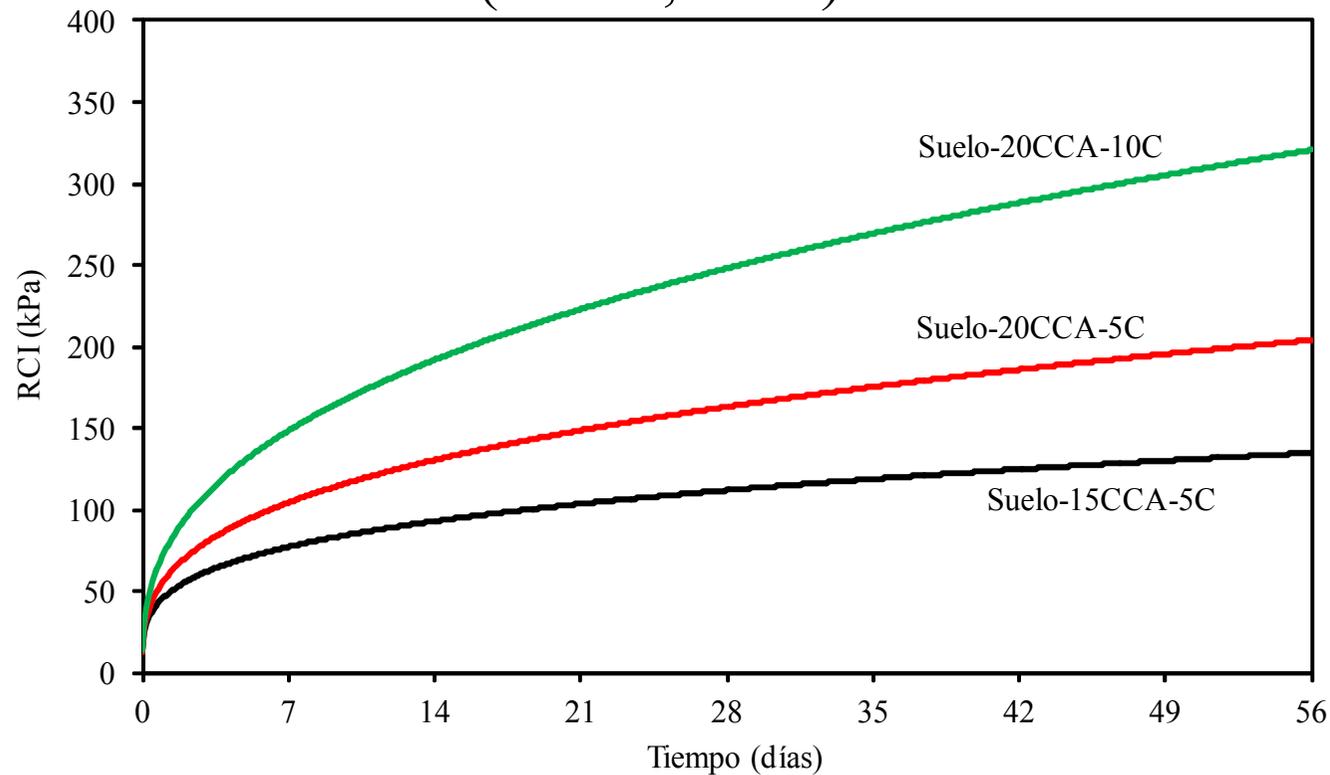


## Efectos de la Estabilización con Ceniza

### RCI

#### Relación con el Tiempo

Suelo de Cantera Pérez Busto (SW-SM)-CCA de Arrozur-Cal  
(Behak, 2007)



## Efectos de la Estabilización con Ceniza

### RCI

Relación con Reactividad de Ceniza

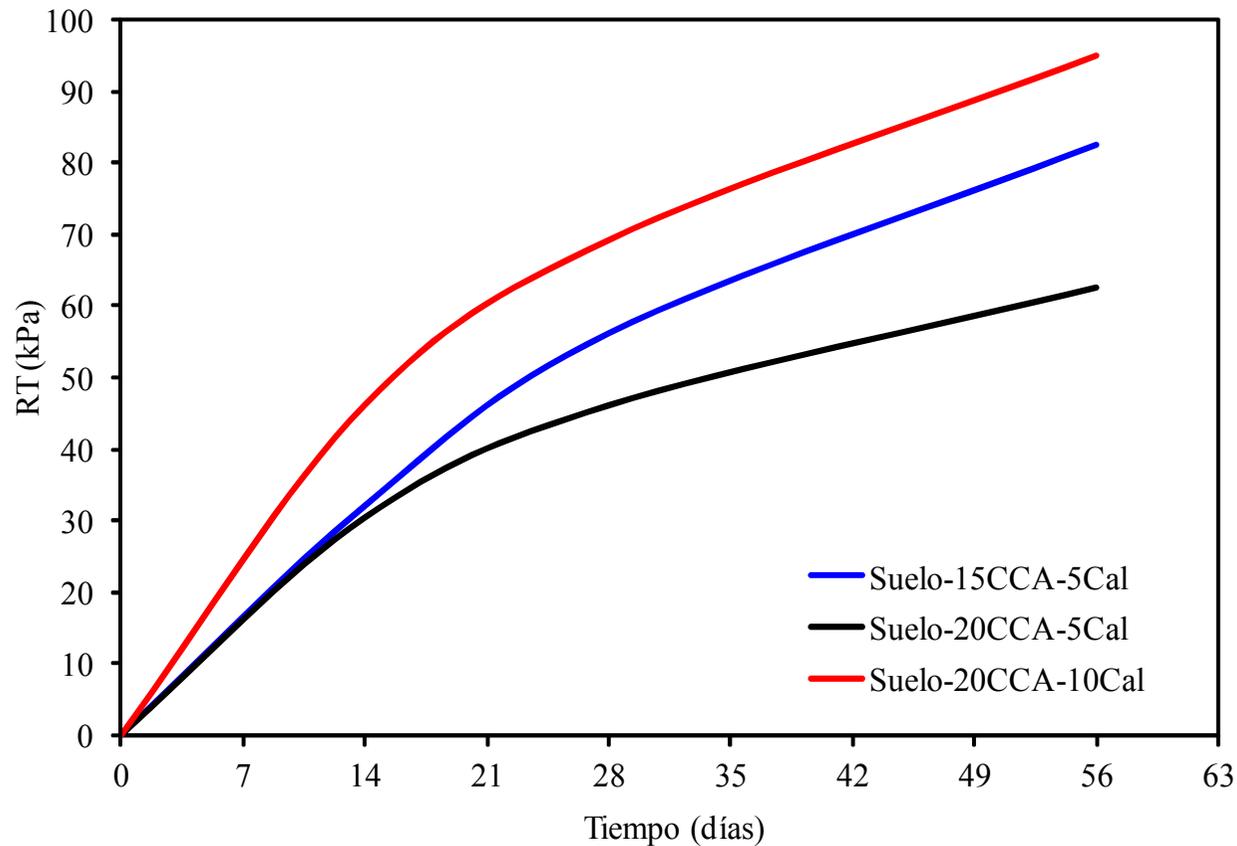
Suelo Pérez Busto (SW-SM)-CCA Arrozur-Cal (28 días)  
(Behak, 2007)

<b>MATERIAL</b>	<b>RCI (kPa)</b>
Suelo	14
Suelo-15CCA-5C	118
Suelo-20CCA-5C	181
Suelo-20CCA-10C	247
Suelo-15CCA650-5C	570
Suelo-15CCA800-5C	504

Efectos de la Estabilización con Ceniza  
Resistencia a la Tracción

Dependencia con Contenido de Ceniza y Tiempo

Suelo Pérez Busto-CCA Arrozur-Cal (Behak, 2007)



Efectos de la Estabilización con Ceniza

Durabilidad

Humedecimiento y Secado

Método de Iowa (Hoover et al., 1958)

Suelo Pérez Busto-CCA Arrozur-Cal (Behak, 2007)

<b>MATERIAL</b>	<b>RCI (kPa)</b>		<b>Q<sub>r</sub> (%)</b>
	Sin Ciclos	Con Ciclos	
Suelo-15CCA-5Cal	210	134	64
Suelo-20CCA-5Cal	197	141	72
Suelo-20CCA-10Cal	364	279	77

$$Q_r < 80\% \text{ (Marcon, 1977)}$$