



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE BOGOTÁ
FACULTAD DE INGENIERÍA
ÁREA CURRICULAR DE INGENIERÍA CIVIL Y AGRÍCOLA



Doctorado en Ingeniería

Ingeniería Civil

DESARROLLO DE UN MODELO DE PROBABILIDAD DE OCURRENCIA DE LA REACCIÓN ÁLCALI – SÍLICE (RAS) EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO

Geol. NYDIA ROMERO BUITRAGO
Esp. Patología de la Construcción

Doctorado en Ingeniería

un

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA



ORGULLO un



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

SEDE BOGOTÁ
FACULTAD DE INGENIERÍA

ÁREA CURRICULAR DE INGENIERÍA CIVIL Y AGRÍCOLA



LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: SISTEMAS ESTRUCTURALES Y MATERIALES PARA LA CONSTRUCCIÓN

Tutor:

Juan Manuel Lizarazo-Marriaga PhD

Doctorado en Ingeniería

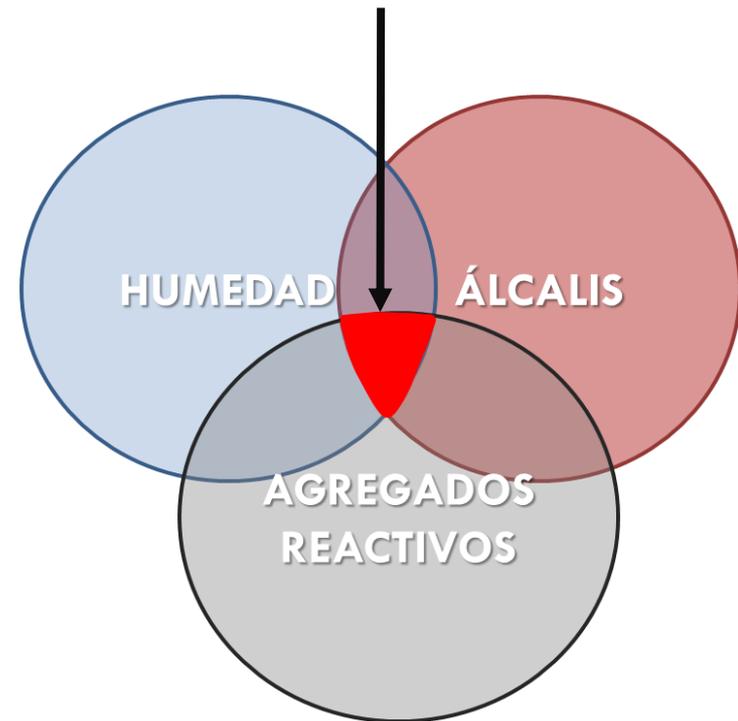
Ingeniería Civil

LA REACCIÓN ÁLCALI – SÍLICE (RAS)

Definición:

- La reacción álcali – sílice involucra reacciones químicas entre los agregados reactivos y los álcalis contenidos en el concreto, los cuales producen un aumento de volumen en la matriz del concreto e inducen la rotura prematura y / o la pérdida de la prestación de servicio de las estructuras.

REACCIÓN ÁLCALI – SÍLICE



RAS: FENÓMENO QUE AFECTA LA DURABILIDAD DEL CONCRETO

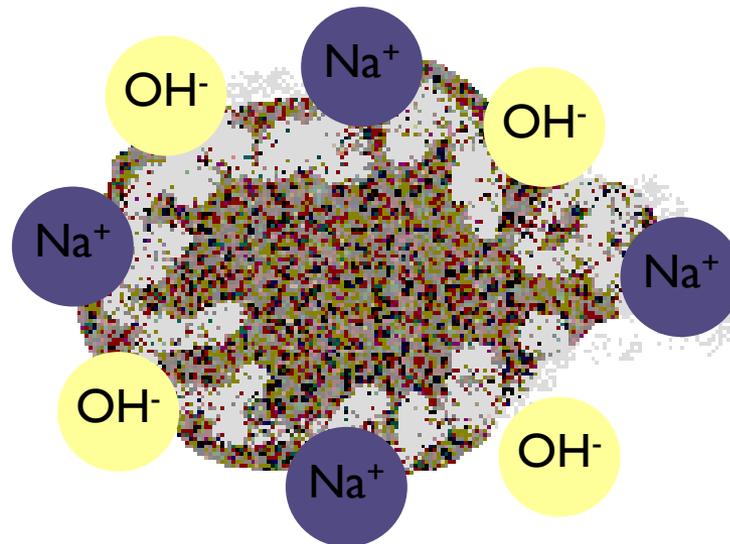


Benoit Fournier (2010): Alkali-aggregate Reactions in Concrete - A review -

MECANISMO DE LA REACCIÓN

Disolución de la sílice por la disolución intersticial alcalina del concreto

Gel expansivo



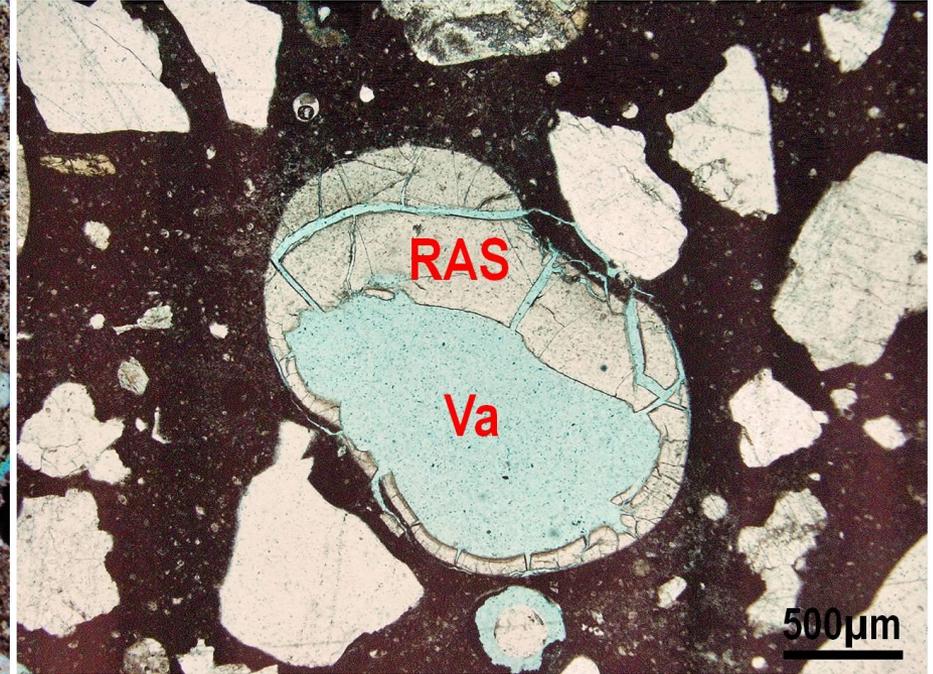
Doctorado en Ingeniería

Ingeniería Civil

RAS: Cáncer del concreto



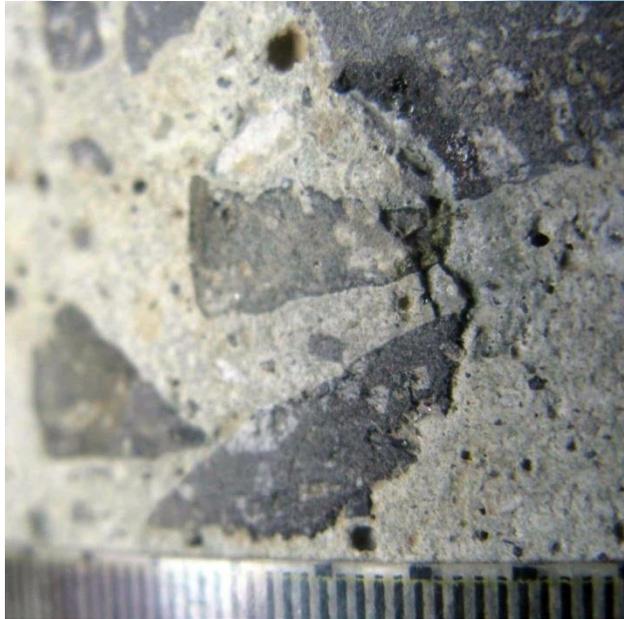
Detalle de un agregado con claros indicios de reacción álcali-sílice (RAS) hacia su periferia



Gel producto de reacción álcali-sílice (RAS) presentes en un vacío de aire (Va)

Fuente propia

RAS: Cáncer del concreto



Fuente propia

Doctorado

Ingeniería Civil

RAS: 14 CONFERENCIAS INTERNACIONALES DESDE 1974

Las actas de estas conferencias constituyen la fuente más importante de información sobre la investigación llegando a reunir más de 1270 artículos



Benoit Fournier (2010): Alkali-aggregate Reactions in Concrete - A review -

RAS: REACCIÓN MUY COMPLEJA

Esta reacción es **muy compleja** y depende de:

La estructura cristalina de la sílice

La textura de la roca

De la composición química del sistema, cemento

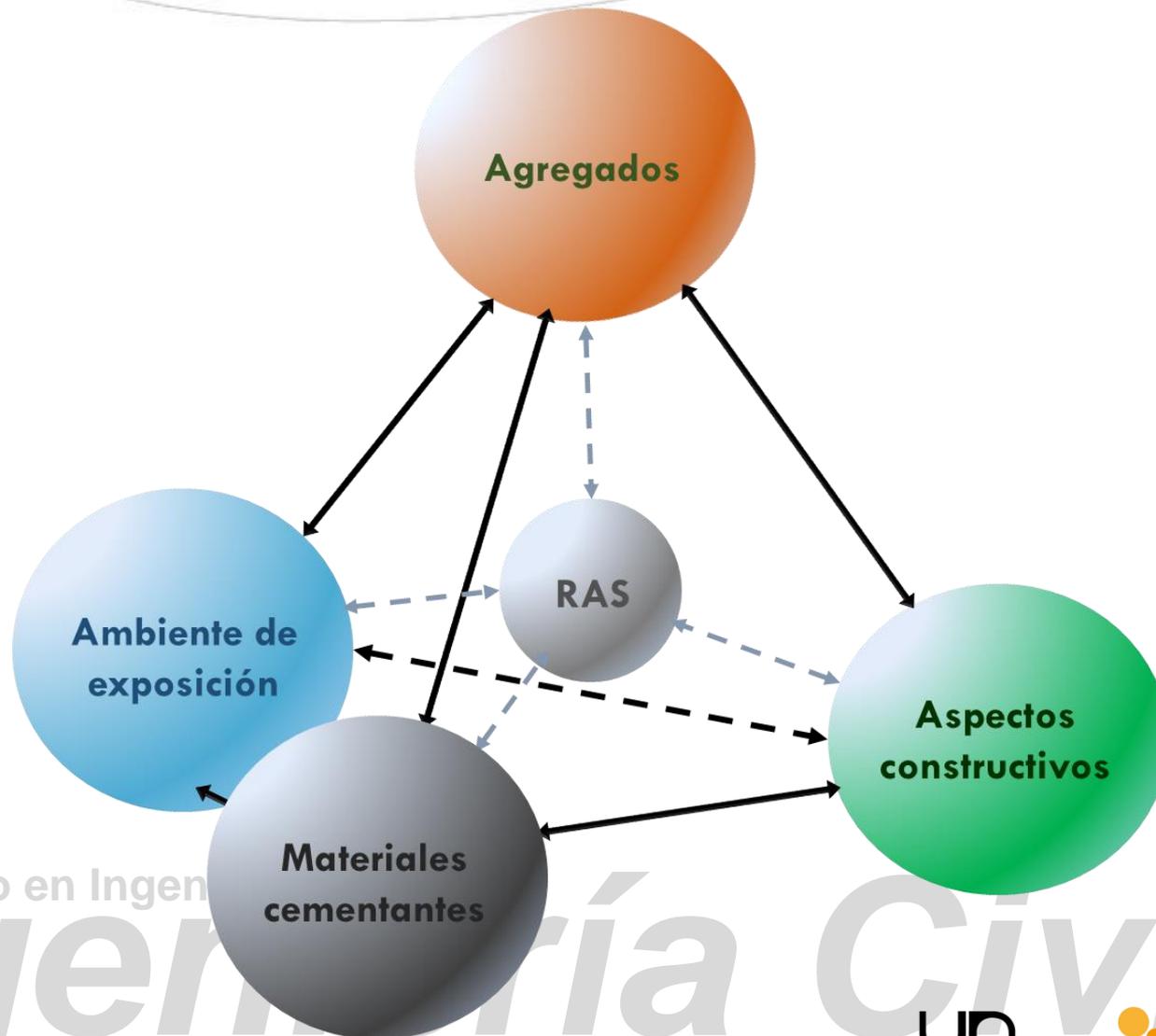
De la velocidad de disolución de la sílice.

De humedad ambiental y de la temperatura

Doctorado en Ingeniería

Ingeniería Civil

VARIABLES



Doctorado en Ingeniería

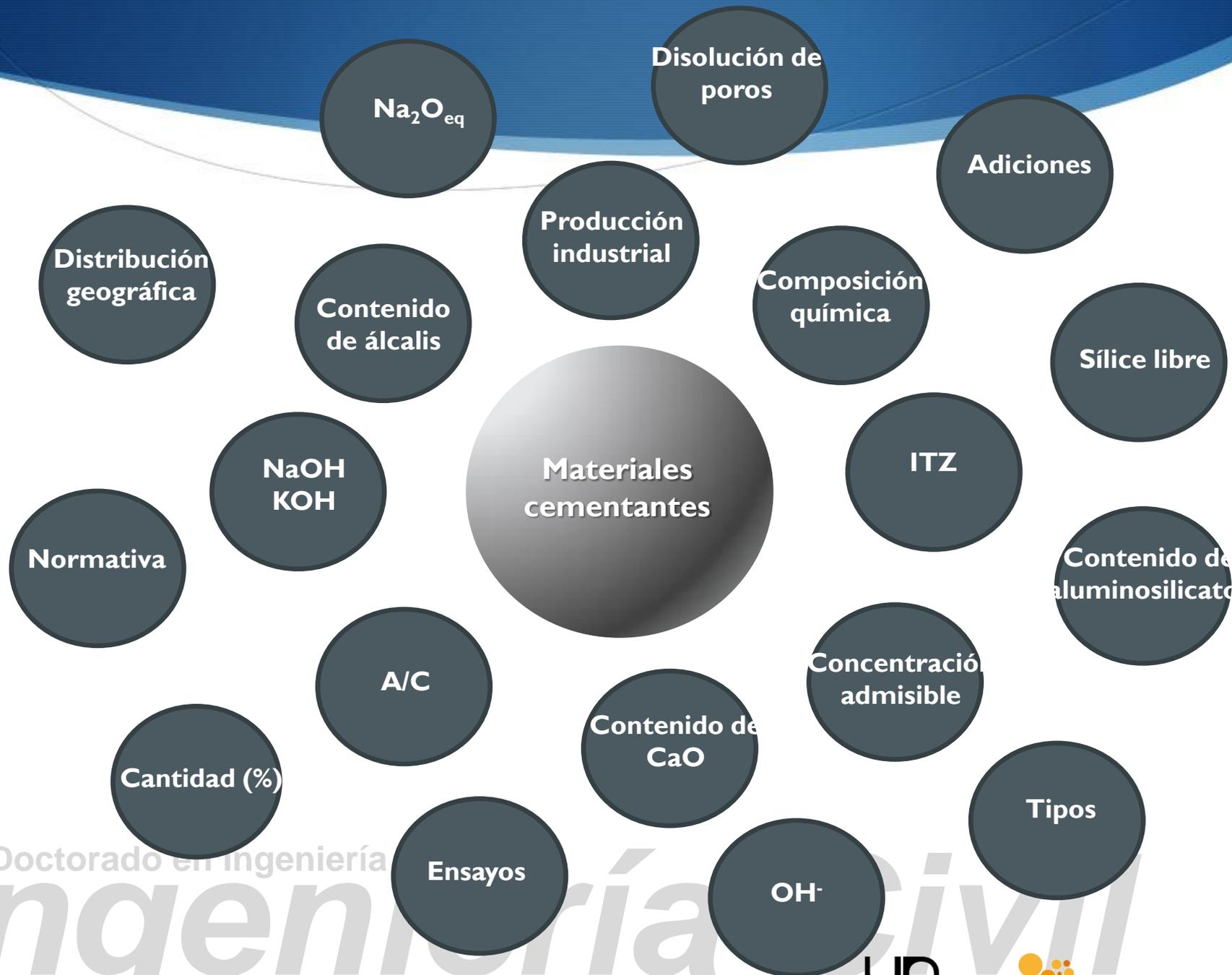
Ingeniería Civil





Doctorado en Ingeniería

Ingeniería Civil



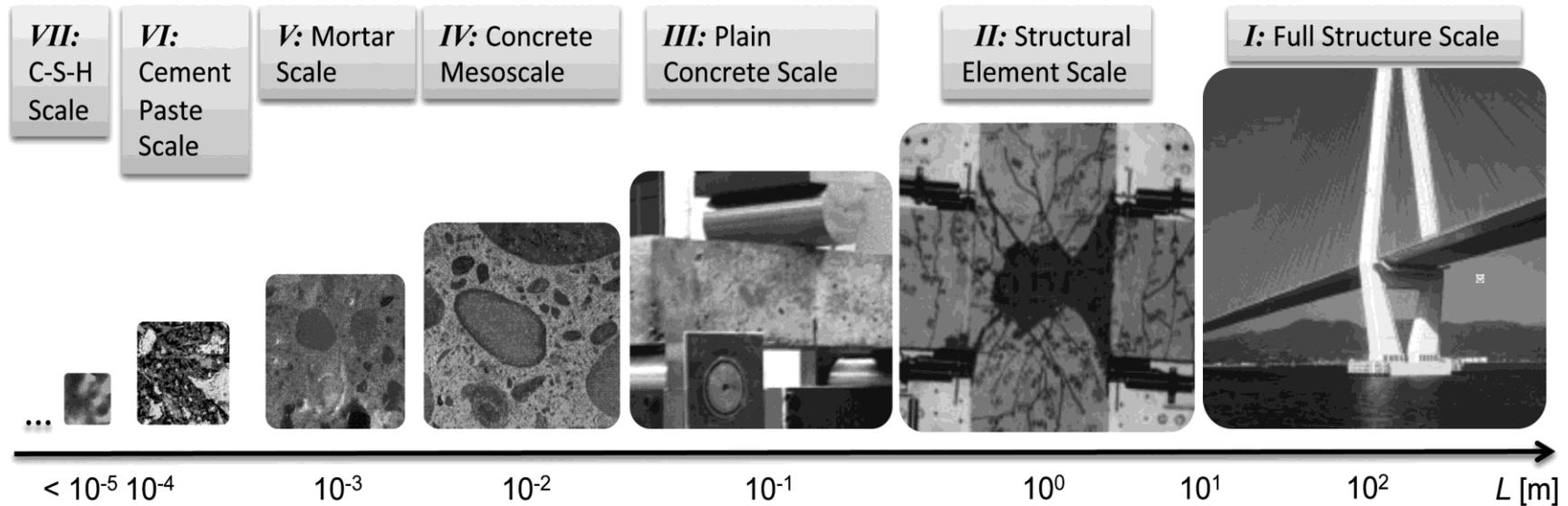
Doctorado en Ingeniería

Ingeniería Civil



ESCALA PARA LA MODELACIÓN DE MATERIALES Y ESTRUCTURAS DE CONCRETO

- De acuerdo con (Cusatis, Rezakhani, Alnaggar, Zhou, & Pelessone, 2014), las estructuras de concreto son sistemas multiescala, existiendo una gran variedad de escalas en longitud y tiempo.



Escalas en longitud de modelos de modelación del concreto ([Cusatis et. al. 2014](#))

Doctorado en Ingeniería

Ingeniería Civil

ESCALA Y MODELOS DESARROLLADOS PARA LA RAS

Escala VI, V – Micromodelos

Modelos teóricos

- ◆ Desarrollados con base a una descripción de la interacción entre el gel producto de la reacción RAS y la matriz del concreto en un elemento de volumen representativo Representative Volume Element (RVE).
- ◆ Los modelos teóricos tratan el mecanismo químico y el proceso de difusión de la reacción, la cinética de la disolución, la formación del gel y su crecimiento que induce el deterioro del concreto. El objetivo de los modelos se centra principalmente en la predicción de la expansión pésima en concretos afectados por RAS y el correspondiente tamaño pésimo en los agregados.

ESCALA Y MODELOS DESARROLLADOS PARA LA RAS

Escala VI, V – Micromodelos

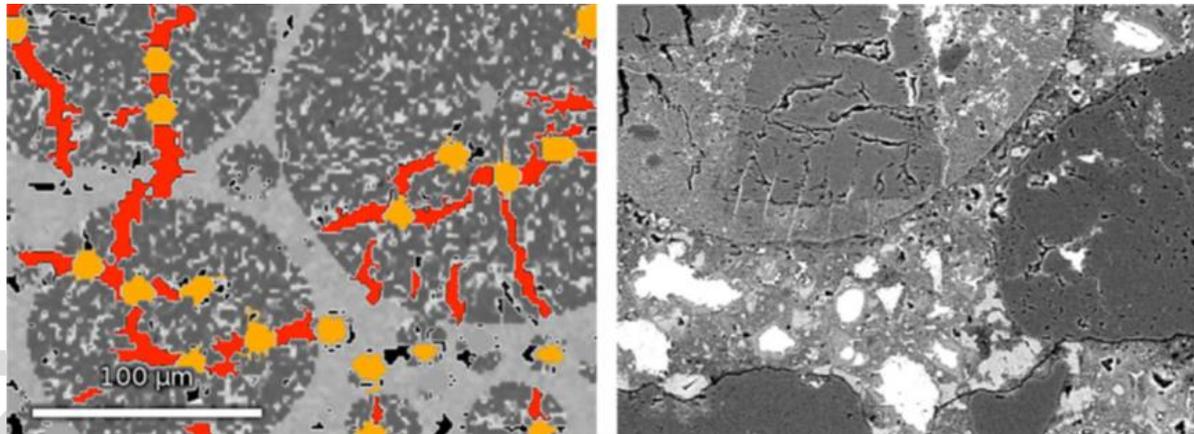
Modelos teóricos

- ◆ Hobbs (1981) propuso un modelo teórico basado en que la velocidad de reacción es directamente proporcional a la cantidad de agregados reactivos.
- ◆ Furusawa *et. al.* (1994) desarrollaron un modelo, en el cual, el proceso de expansión presenta dos etapas: 1) Difusión de los iones hidróxido y álcali dentro del agregado desencadenando la reacción química, 2) Expansión inducida por la RAS, bajo la hipótesis de la existencia de una zona porosa alrededor de los agregados y que la expansión solo comenzará cuando el volumen del producto de la reacción excede el volumen disponible de la zona porosa.

ESCALA Y MODELOS DESARROLLADOS PARA LA RAS

Escala IV – Mesomodelos o modelos mesoscópicos

- ◆ Dunant y Scrivener (2010) propusieron un modelo en el que el daño del concreto es debido al crecimiento de bolsas de gel de RAS en los agregados reactivos de acuerdo a lo observado a nivel microscópico y macroscópico. Este enfoque mostró que el patrón de agrietamiento inducido por RAS es concordante con observaciones experimentales.



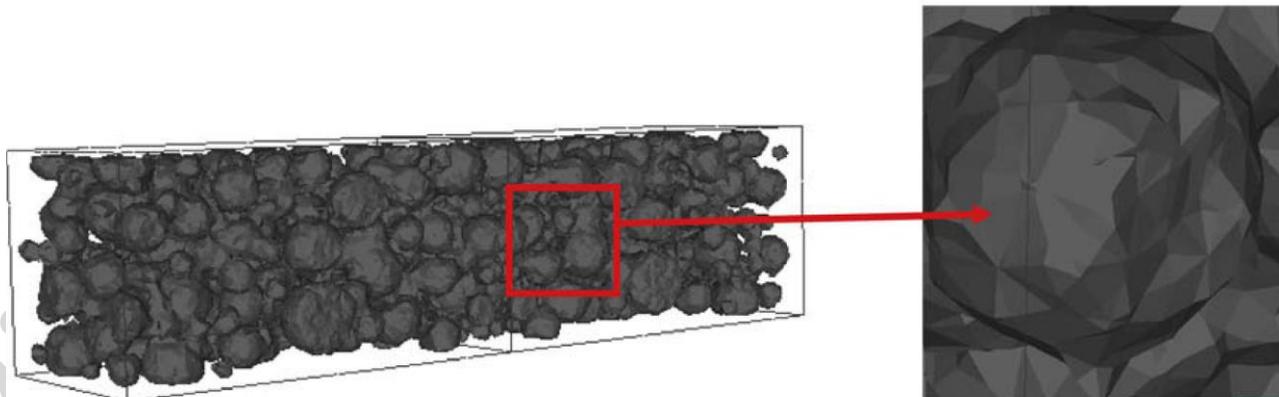
Detalle del patrón del fracturamiento a) generado por el modelo b) Microfotografía de SEM (Dunant y Scrivener, 2010)

ESCALA Y MODELOS DESARROLLADOS PARA LA RAS

Escala IV – Mesomodelos o modelos mesoscopicos

Son una extensión del enfoque anterior, tienen en cuenta la distribución del tamaño y ubicación de partículas reactivas, modeladas con elementos finitos a escala experimental.

- Comby-Peyrot *et. al.* (2009) presentaron un modelo tridimensional (3D). Este modelo reproduce el mapa de grietas inducidas por RAS y la consecuente degradación progresiva del concreto.

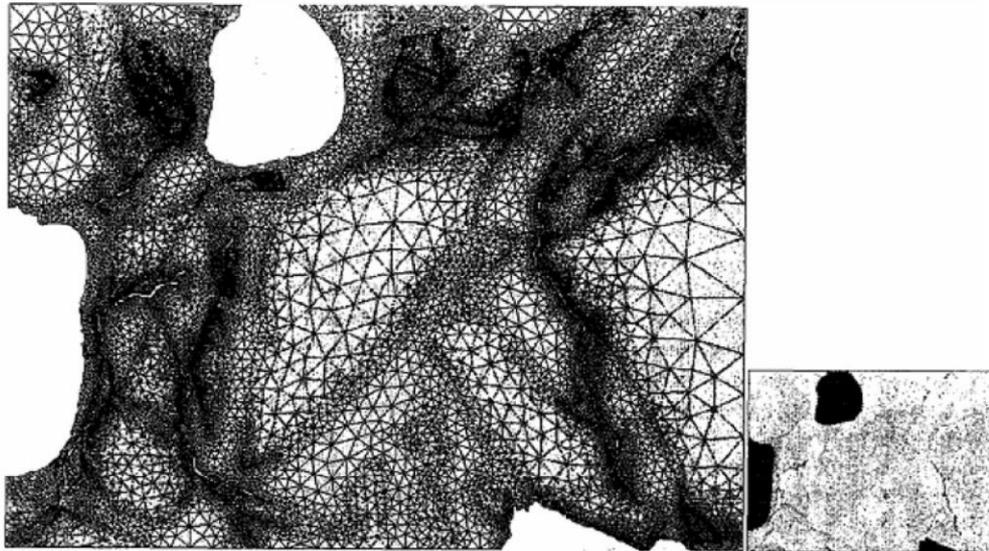


a) Muestra generada in FEMCAM, b) Aumento de un agregado en la muestra (Comby-Peyrot *et. al.* , 2009))

ESCALA Y MODELOS DESARROLLADOS PARA LA RAS

Escala IV – Mesomodelos o modelos mesoscópicos

- Shin *et. al.* (2009) aplicando el método de elemento finito elástico lineal bidimensional, desarrollaron una microestructura para analizar la respuesta mecánica del concreto afectado por RAS y predecir la expansión. En este modelo la afectación de la reacción se consideró como la presión debido al aumento del volumen del gel.



a) Malla de elementos finitos, b) imagen microestructural de una muestra de concreto (Shin *et. al.*, 2009)

ESCALA Y MODELOS DESARROLLADOS PARA LA RAS

Escalas I, II, III – Modelos macroscópicos

- ◆ Objetivos: reproducir el comportamiento observado de las estructuras e investigar el mecanismo de deterioro debido a la reacción álcali sílice.
- ◆ Se centran en el campo de desplazamientos, esfuerzos y daños por fisuración.
- ◆ Son aplicables a la predicción de los efectos a largo plazo de RAS con relación a la durabilidad y estabilidad de las estructura.
- ◆ La mayoría formulados en el marco del método de elementos finitos.

Doctorado en Ingeniería

Ingeniería Civil

ESCALA Y MODELOS DESARROLLADOS PARA LA RAS

Escalas I, II, III – Modelos macroscópicos

Modelos paramétricos

- ◆ Charlwood *et. al.* (1992) y Thompson *et. al.* (1994), determinan que la que la expansión anisotrópica es dependiente del estado de esfuerzo.
- ◆ Léger *et. al.* (1996) simulando numéricamente la expansión en presas de concreto, estableció que la deformación inducida por RAS de está dada por:

$$\varepsilon_{raa}^m = \beta^m(t) [F_C(\sigma_c, t) * F_T(t) * F_M(t) * F_R(t)]^m$$
$$\varepsilon_{raa}^m = \beta^m(t) * CTMR^m$$

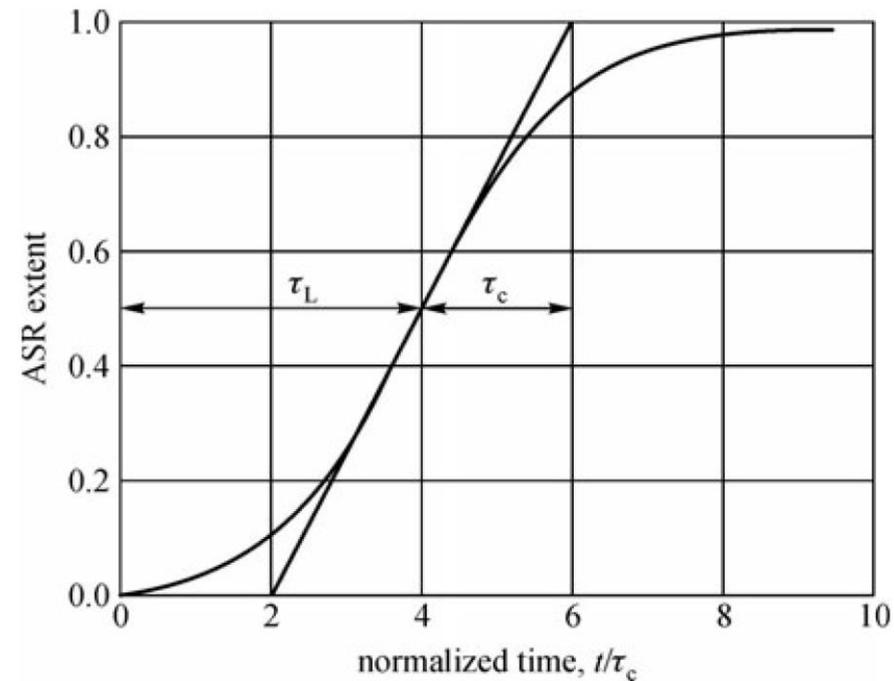
F_C , F_T , F_M , y F_R (entre cero y uno) correspondientes al estado de esfuerzo a la compresión, la temperatura, la humedad y la reactividad de los agregados

ESCALA Y MODELOS DESARROLLADOS PARA LA RAS

Escalas I, II, III – Modelos macroscópicos

Modelos de acoplamiento

- ◆ Ulm *et. al.* (2000) desarrollaron un modelo que representó la cinética de la reacción y la presión ejercida por la expansión. Concluyen que para efectos estructurales por la RAS requiere de dos escalas de tiempo: 1) Un tiempo de latencia (τ_L) –disolución de sílice reactiva de los agregados y 2) un tiempo característico (τ_C) – formación del gel.



Curva de expansión isoterma normalizada (Ulm *et. al.* , 2000)

ESCALA Y MODELOS DESARROLLADOS PARA LA RAS

Escalas I, II, III – Modelos macroscópicos

Modelos de acoplamiento

- ♦ Larive (1998) realiza una de las más extensas y rigurosas investigaciones probó más de 600 ejemplares con varias mezclas, ambiente y condiciones mecánicas y propuso la siguiente expresión para la expansión impuesta como una función del tiempo $\varepsilon_{ras}^0(t)$:

$$\varepsilon_{ras}^0(t) = \frac{1 - e^{-t/\tau_c}}{1 + e^{(\tau_L - t)/\tau_c}} \varepsilon_{ras}^\infty$$

- ♦ Multon *et. al.* (2006) utilizaron el modelo para investigar los efectos de la distribución de la humedad y el estado de esfuerzo en la expansión inducida por la reacción RAS en el concreto. Concluye que el agrietamiento y el esfuerzo compresivo tienen una gran influencia en la anisotropía de la expansión de la reacción.

Doctorado en Ingeniería

Ingeniería Civil

ESCALA Y MODELOS DESARROLLADOS PARA LA RAS

Escalas I, II, III – Modelos macroscópicos

Modelos de acoplamiento

- ◆ Poyet *et. al.* (2006) plantearon una ley de la cinética de la reacción para el modelado de expansión RAS teniendo en cuenta la influencia del agua y la temperatura. Los autores definen el agua disponible dentro del concreto afectado como la relación de saturación S_r , que representa el porcentaje de agua de los poros. Una variable adimensional A fue definida para monitorear el progreso de la reacción. Depende de la temperatura absoluta T , el tiempo t y la relación de saturación S_r . La evolución de la RAS está dada por:

$$A(S_r, T, t) = \alpha_0 \exp\left(\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{\bar{T}} - \frac{1}{T}\right)\right) \frac{(S_r - S_r^0)^+}{(1 - S_r^0)} [S_r - A(S_r, T, t)]^+$$

ESCALA Y MODELOS DESARROLLADOS PARA LA RAS

Modelos multiescala

Algunos trabajos actuales de investigación está tratando de desarrollar un modelo de "gran unificación" multiescala que llena los vacío de los modelos micro, meso y macroscopicos con el fin de entender mejor la reacción en la escala micro y sus consecuencias en la escala macro.

- ◆ Saouma (2014) presento un modelo constitutivo para la simulación numérica de reacción expansiva RAS, usando el método de elementos finitos y basado en la cinética (es decir, el tiempo de dependencia) de las reacciones químicas (debido a la difusión de iones) y la mecánica del volumen representativo (por ejemplo, efectos de agrietamiento, en el esfuerzo triaxial y la degradación de propiedades).

ESCALA Y MODELOS DESARROLLADOS PARA LA RAS

Modelos multiescala

Las principales conclusiones obtenidas del modelo desarrollado por Saouma (2014) son:

- ◆ La RAS requiere para iniciar una humedad relativa del 80%.
- ◆ El resultado de la reacción es la formación de grietas localizadas, que se llenan con el gel producto de la RAS.
- ◆ La cinética de esta reacción siguen una "S" en forma de curva, es decir, comienza muy lento, y luego aumenta rápidamente y finalmente se ralentiza gradualmente. A diferencia de la deformación máxima inducida por RAS, la velocidad de reacción es dependiente de la temperatura.

ESCALA Y MODELOS DESARROLLADOS PARA LA RAS

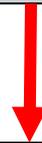
Modelos multiescala

- ◆ La manifestación de esta reacción es inhibida por esfuerzos de compresión mayores que aprox. 10 MPa, y la expansión se redirige en las direcciones ortogonales.
- ◆ Se indica que bajo un estado de esfuerzo triaxial (independientemente del esfuerzo volumétrico), la reacción continúa con una deformación constante.
- ◆ Debido al estado de esfuerzo, esta reacción resultará en una expansión anisotrópica.
- ◆ Se produce una reducción tanto en la resistencia a la tracción y el módulo elástico, reducciones asociadas con las microfisuras causadas por la RAS.

ESCALA Y MODELOS DESARROLLADOS PARA LA RAS

Resumen

Los modelos desarrollados para la reacción álcali – sílice, se centran principalmente en la modelación de la cinética de reacción química y los procesos de difusión – que determina el grado de la reacción y el potencial de expansión – y su posterior influencia sobre los aspectos mecánicos del concreto, es decir, modelación de la fractura mecánica que induce la expansión y deterioro del concreto.



Conocer el comportamiento y efectos de la reacción álcali – sílice

Doctorado en Ingeniería

Ingeniería Civil

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

Se resalta que los modelos existentes son desarrollados bajo la premisa que el concreto ya ha sido afectado por la reacción álcali agregado y no proporcionan soluciones para prevenir que la reacción ocurra o para remediar su eventual presencia

Predecir la ocurrencia de la reacción álcali – sílice

PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Es posible desarrollar un modelo que permita establecer la probabilidad de ocurrencia del fenómeno de la reacción álcali – sílice en estructuras de concreto?

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- ◆ Desarrollar un modelo probabilista que permita establecer la ocurrencia del fenómeno de la reacción álcali – sílice en estructuras de concreto.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ◆ Definir las variables más importantes que influyen en la ocurrencia la reacción álcali – sílice e identificar la función de probabilidad que se asocia a cada uno de ellas.
- ◆ Establecer un modelo predictivo que permita establecer la probabilidad de ocurrencia del fenómeno de álcali – sílice.
- ◆ Aplicar y contrastar el modelo propuesto a un caso de estudio dentro del territorio colombiano.

EJERCICIO EXPLORATORIO

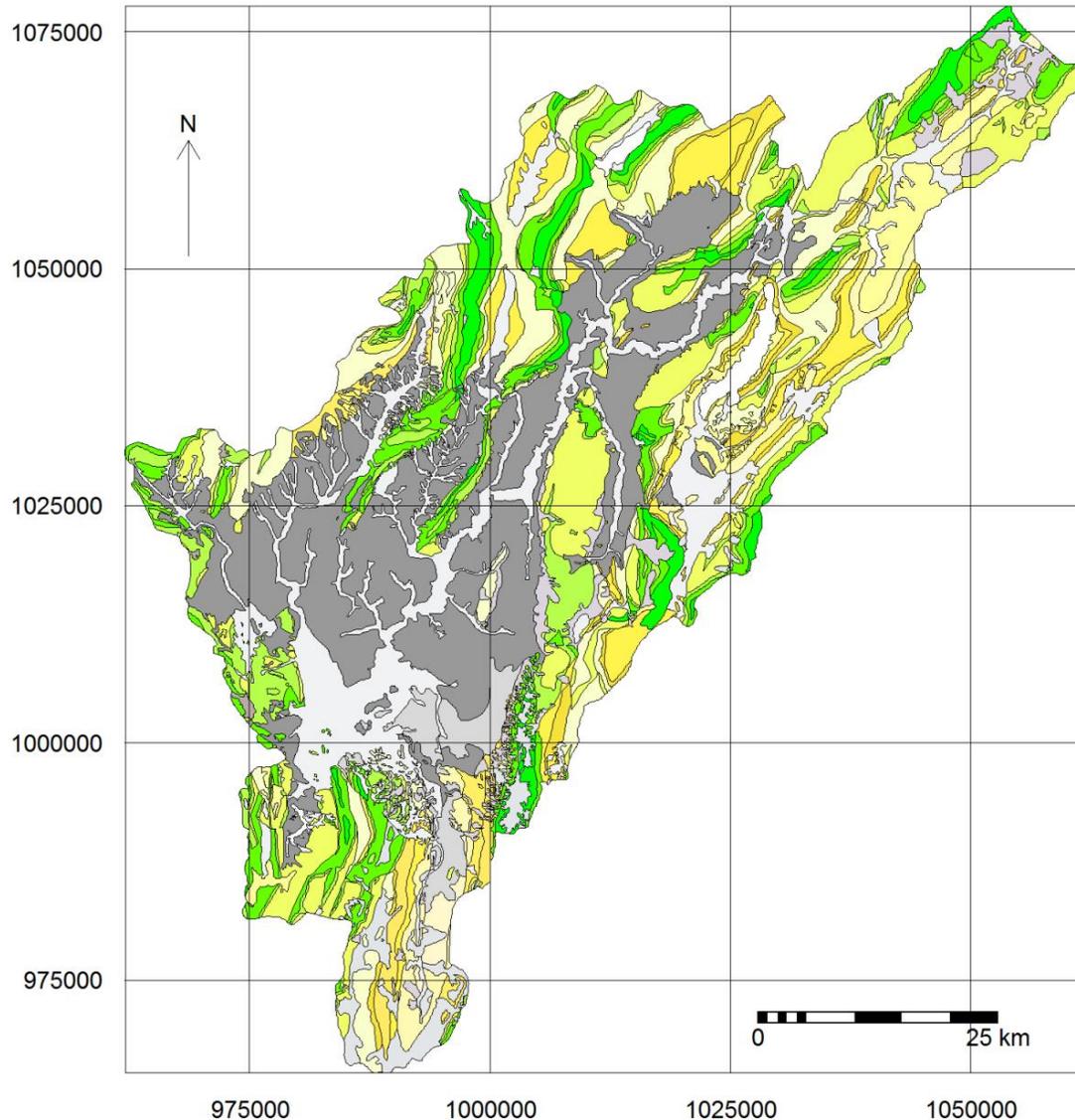
Uso de la interpolación espacial de los sistemas de información geográfica (SIG) para la elaboración de mapas de susceptibilidad de ocurrencia de la reacción álcali – sílice, zona piloto Sabana de Bogotá

EJERCICIO EXPLORATORIO

Mapas de susceptibilidad

- ◆ La susceptibilidad es la posibilidad de que una zona sea afectada por un fenómeno, expresada en diversos grados cualitativos y relativos. Depende de los factores que controlan o condicionan la ocurrencia del fenómeno, que pueden ser intrínsecos a los propios materiales o externos.
- ◆ La metodología se basa en la preparación de mapas temáticos de los factores condicionantes y en la superposición de los mismos, estableciéndose el grado de susceptibilidad en función del peso asignado a cada una de las clases en que se ha clasificado cada uno de los factores. Estos mapas se suelen preparar con técnicas SIG (sistemas de información geográfica), que además permiten el análisis automático de los datos y el establecimiento de bases de datos asociadas.

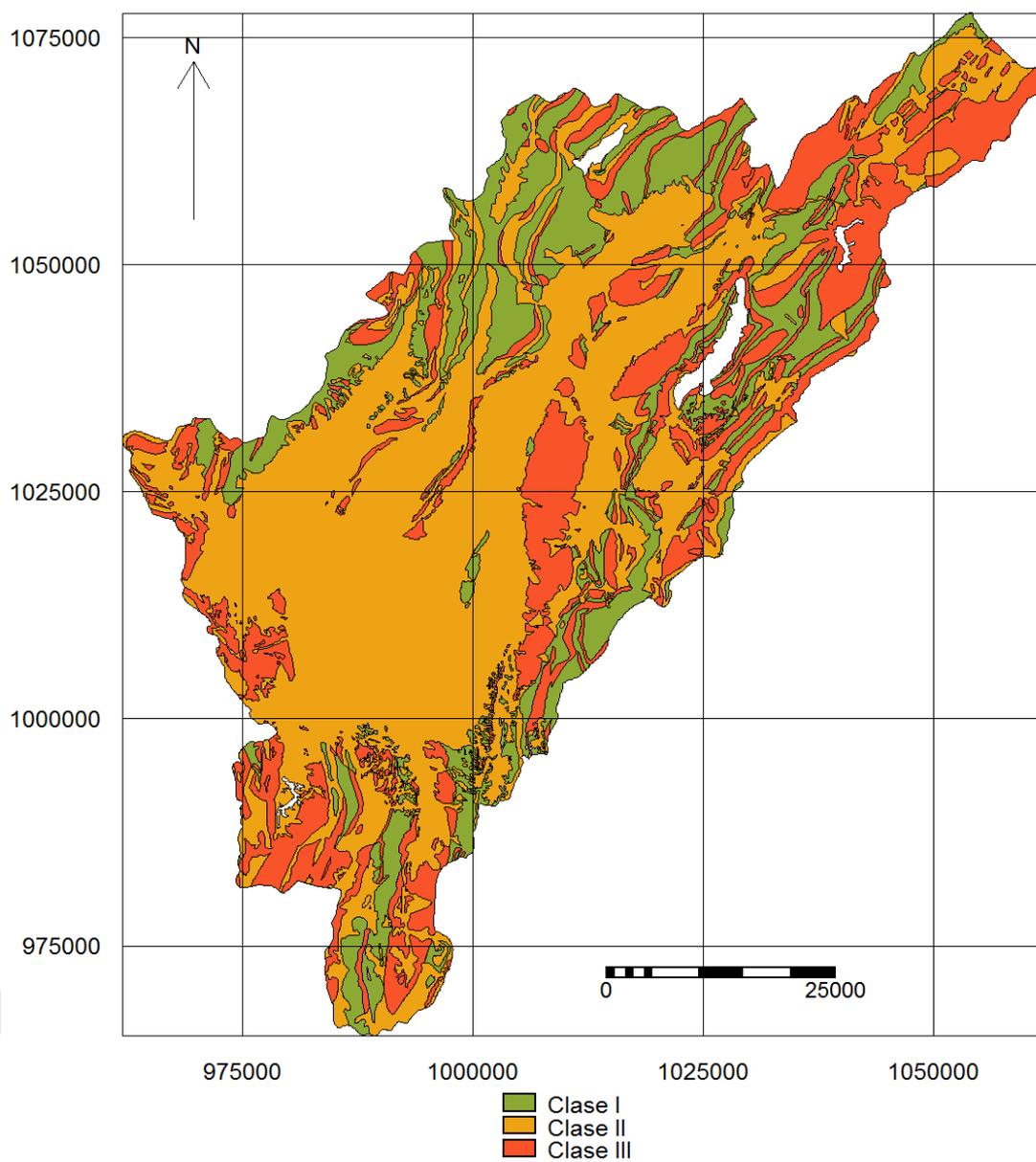
EJERCICIO EXPLORATORIO



- | | |
|-----------------------------------|---------------------------|
| Depositos Aluviales | Formacion Bogotá superior |
| Depositos Coluviales | Formacion Bogotá inferior |
| Depositos de Abanicos Aluviales | Formacion Bogotá |
| Depositos de Terraza Alta | Formacion Cacho |
| Depositos Fluvio glaciares | Formacion Guaduas |
| Depositos sin diferenciar | Formacion Labor y Tierna |
| Formacion Tilata | Formacion Plaeners |
| Formacion Usme | Formacion Arenisca dura |
| Formacion Arenisca de La Regadera | Formacion Chipaque |

Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá

EJERCICIO EXPLORATORIO



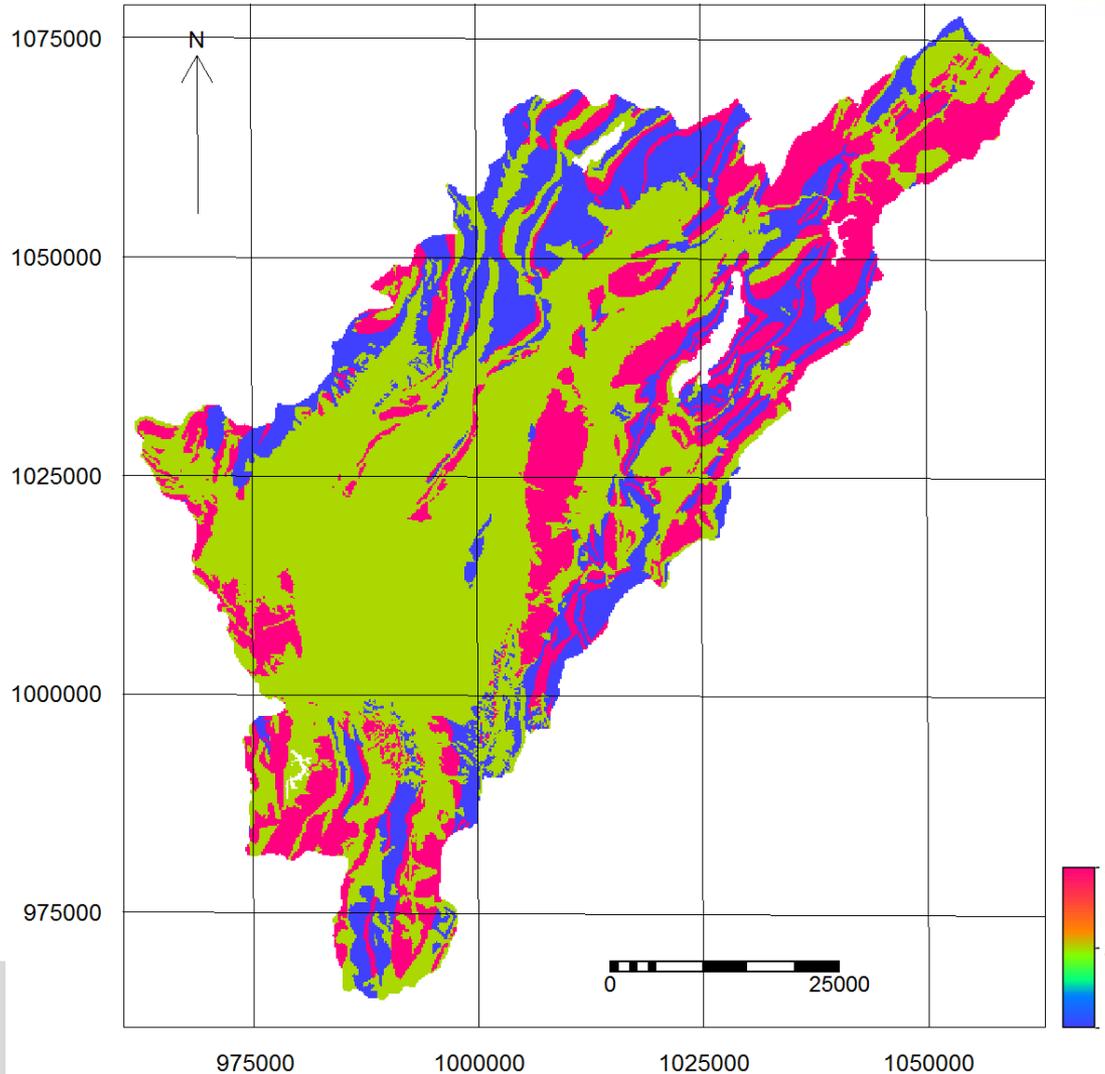
CLASE I (Poco probable la reactividad con los álcalis: no contienen una cantidad detectable de componentes reactivos descritos en la norma)

CLASE II (No pueden ser clasificados de forma definitiva como clase I o clase III)

CLASE III (Muestras de agregados que contienen componentes clasificados como reactivos en cantidad suficiente para producir daño en el concreto)

RILEM (2003): RILEM Recommended Test Method AAR-1: Detection of potential alkali-reactivity of aggregates-Petrographic method

EJERCICIO EXPLORATORIO

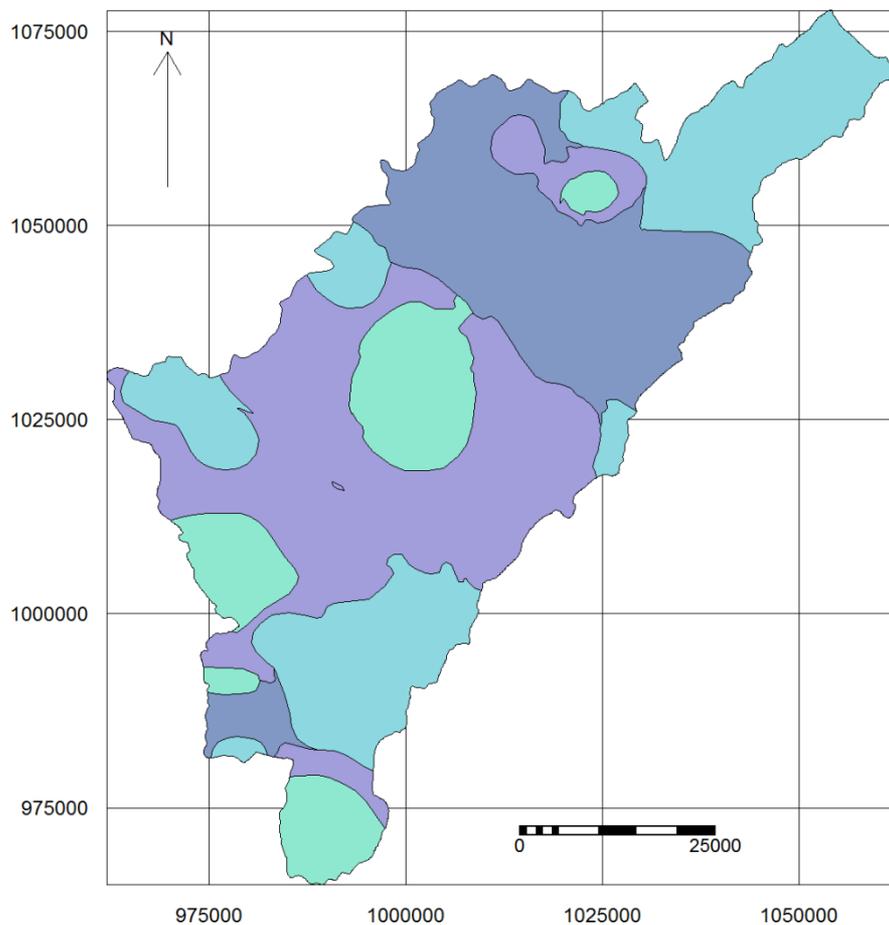


Valores de ponderación

Clasificación	Weight
Clase I	1
Clase II	2
Clase III	3

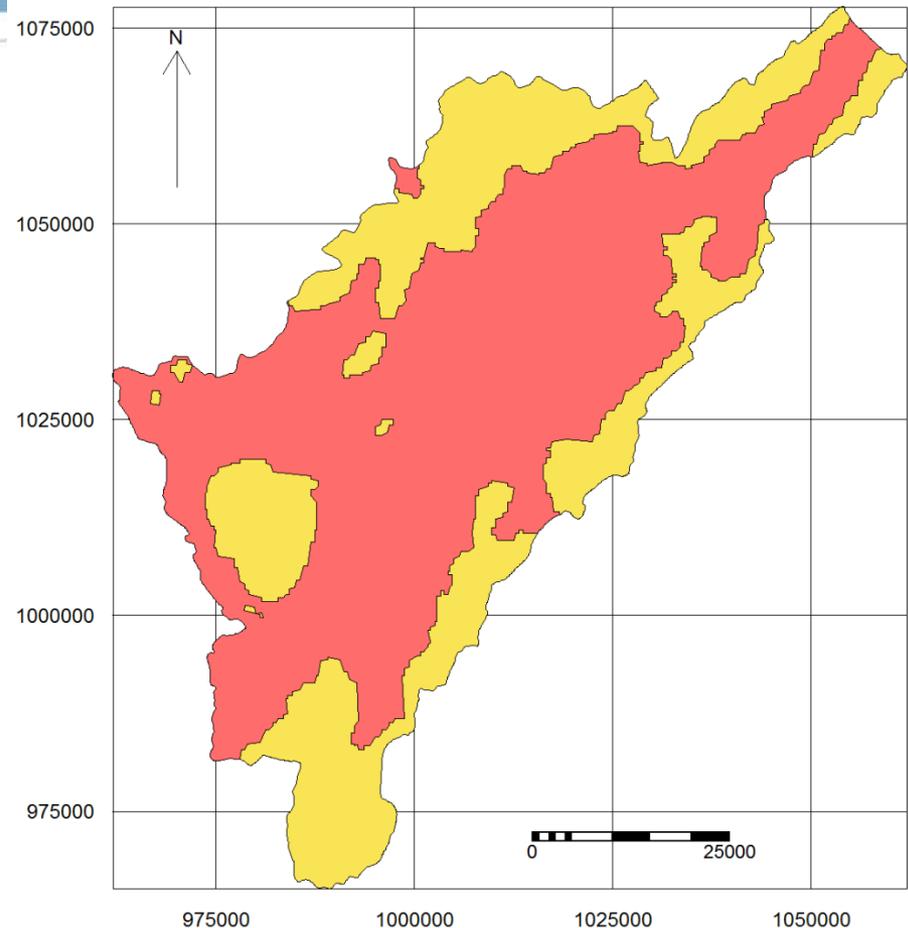
De mapa de clases en
mapa de valores, con
valores de
ponderación

EJERCICIO EXPLORATORIO



- Humedo
- Ligeramente_humedo
- Moderadamente_humedo
- Semihumedo

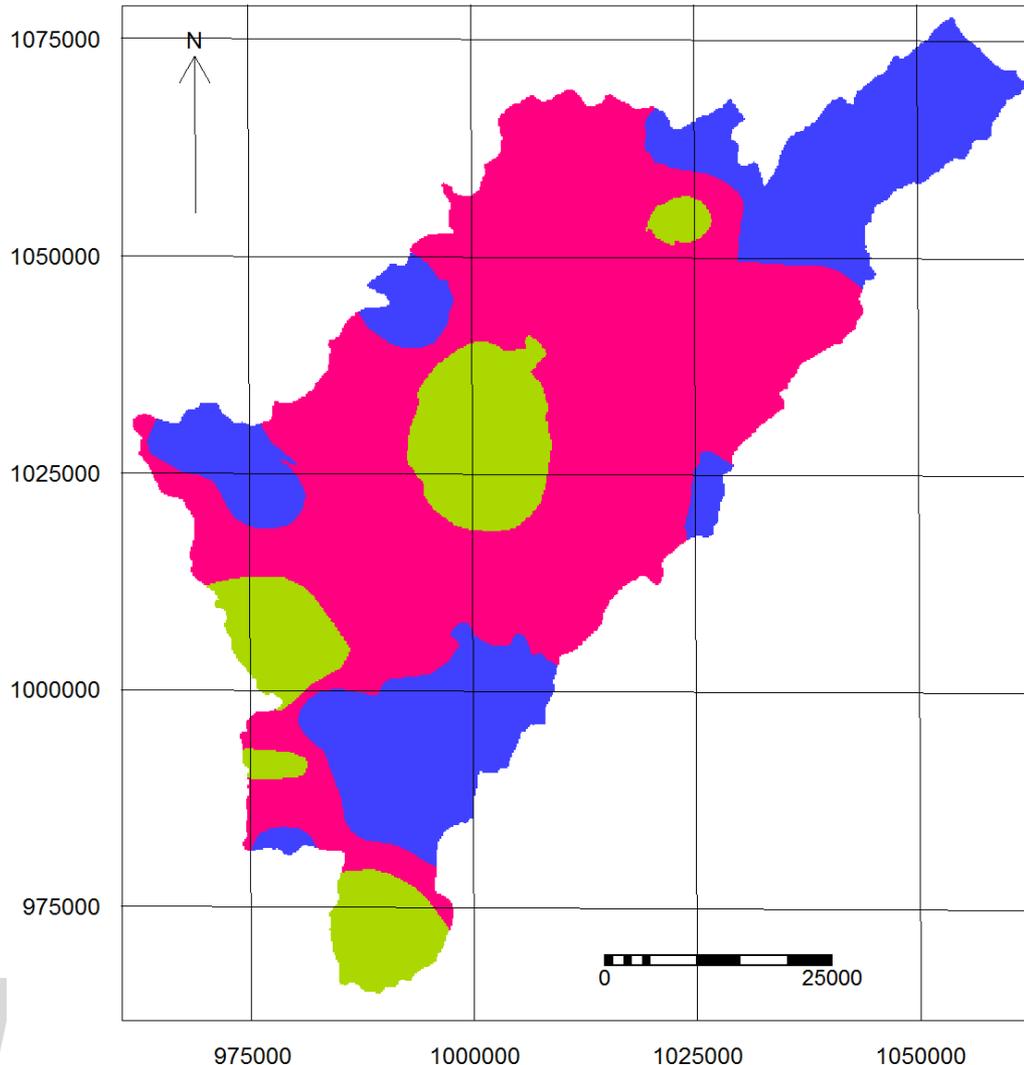
Mapa de Humedad de la Sabana de Bogotá



- Alta
- Baja

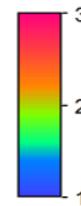
Mapa de Temperatura de la Sabana de Bogotá

EJERCICIO EXPLORATORIO

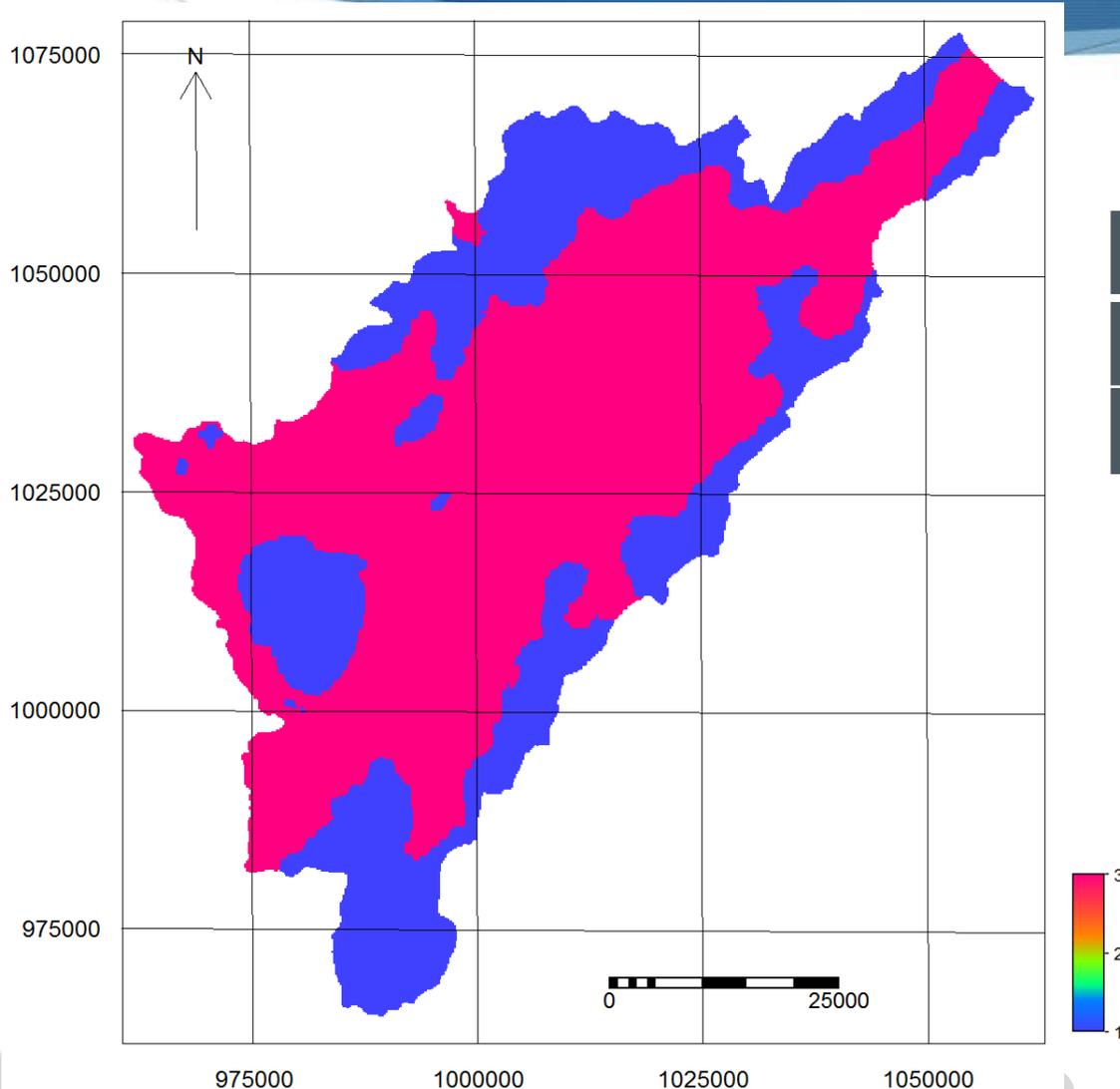


Valores de ponderación

Clasificación	Weight
Húmedo	3
Ligeramente húmedo	1
Moderadamente húmedo	3
Semi húmedo	2



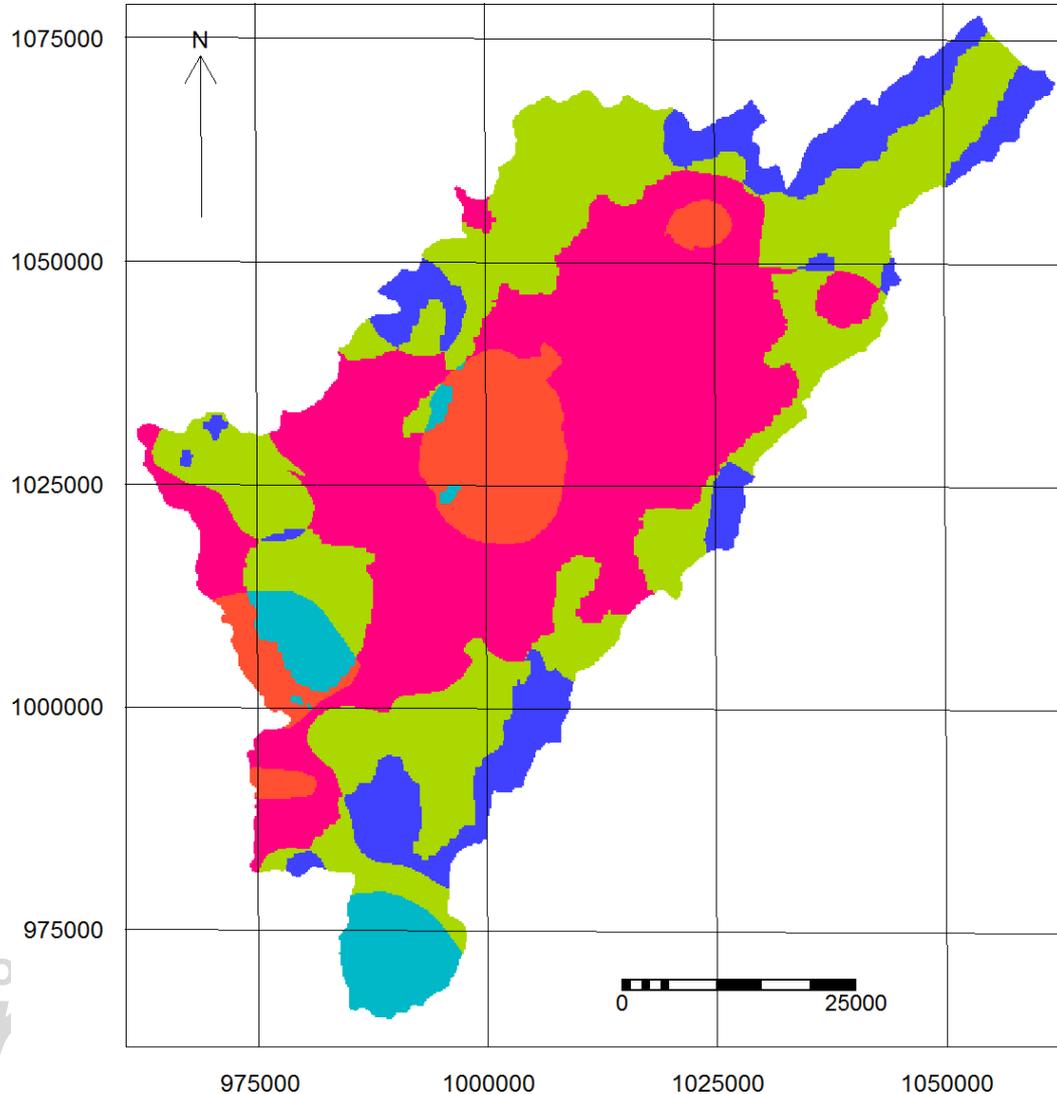
EJERCICIO EXPLORATORIO



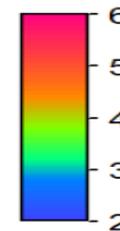
Valores de ponderación

Clasificación	Weight
Alta	3
Baja	1

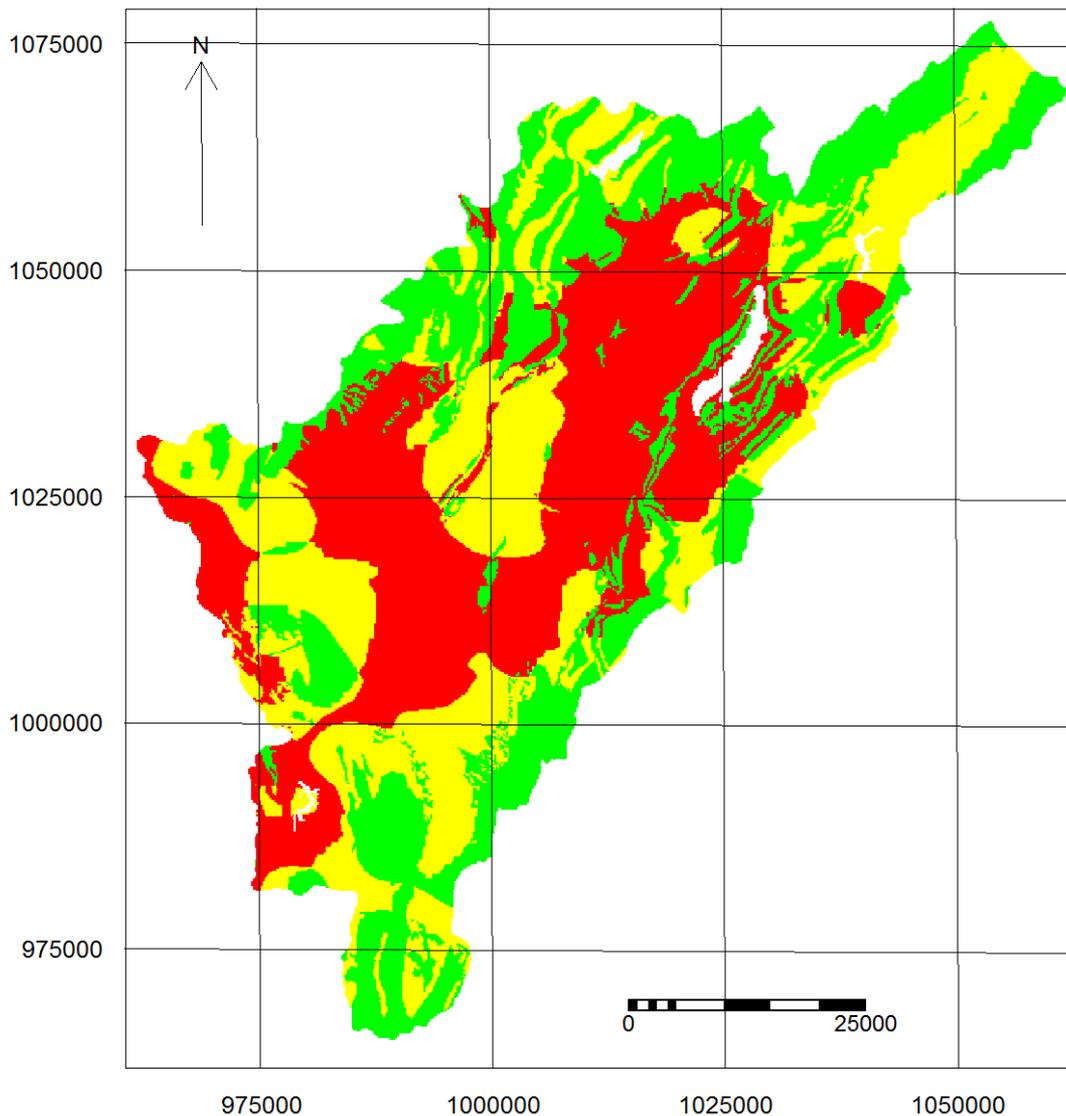
EJERCICIO EXPLORATORIO



Los mapas de ponderación serán combinados en este ejercicio por la simple suma



EJERCICIO EXPLORATORIO



Mapa de
Susceptibilidad de
ocurrencia del
fenómeno expansivo
reacción álcali- sílice
(RAS) en las estructuras
de concreto en la
Sabana de Bogotá

■ alto
■ bajo
■ moderado

LOGROS ALCANZADOS

- Participación en el curso doctoral UANL-RILEM sobre Durabilidad del Concreto, ciudad de Monterrey (Mexico), Agosto 23 al 28 de 2014.



Doctorado en

Ingeniería

civil

Gracias....

Doctorado en Ingeniería
Ingeniería Civil



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE BOGOTÁ
FACULTAD DE INGENIERÍA
ÁREA CURRICULAR DE INGENIERÍA CIVIL Y AGRÍCOLA

Oficina 205
Laboratorio de Ensayos Hidráulicos
Edificio 408

www.icya.unal.edu.co
diracica_fibog@unal.edu.co

Doctorado en Ingeniería
Ingeniería Civil