



PROGRAMA DE
INFRAESTRUCTURA DEL
TRANSPORTE



Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA)

Proyecto: LM-PI-UMP-003-P

CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA DE MATERIALES DE ORIGEN CALIZO PARA SU USO EN ESTRUCTURAS DE PAVIMENTOS DE COSTA RICA

Preparado por:
Unidad de Materiales y Pavimentos

San José, Costa Rica
Marzo, 2013

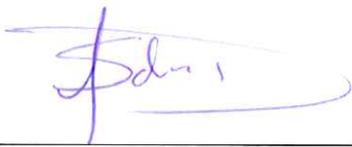
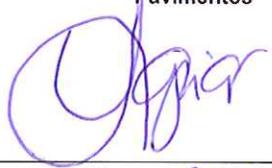
1. Informe LM-PI-UMP-003-P		2. Copia No. 1
3. Título y subtítulo: CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA DE MATERIALES DE ORIGEN CALIZO PARA SU USO EN ESTRUCTURAS DE PAVIMENTOS DE COSTA RICA		4. Fecha del Informe MARZO, 2013
7. Organización y dirección Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica Tel: (506) 2511-2500 / Fax: (506) 2511-4440		
8. Notas complementarias		
9. Resumen <i>En general, en Costa Rica existe un desconocimiento sobre los tipos de cal que se producen las industrias nacionales, y por lo tanto se ignoran las propiedades físico-químicas de la materia prima y del producto final. La ubicación geográfica, la génesis y la composición mineralogía de cada una de las formaciones geológicas donde se extraen materiales calizos para la producción de la cal pueden tener influencia en el desempeño físico-químico de los materiales calizos.</i> <i>Esta investigación tiene como objetivo analizar las propiedades físico-químicas de materiales de origen calizo con el uso de análisis termogravimétricos (TGA), difracción de rayos X (DRX), medición de pH de la cal y una caracterización química de la cal para poder evaluar la influencia del proceso de producción de cal con la finalidad de optimizarlo y así proveer una alternativa económica y rentable para la estabilización de materiales granulares y suelos.</i>		
10. Palabras clave Materiales calizos, Termogravimetría, Caracterización química de la cal	11. Nivel de seguridad: Ninguno	12. Núm. de páginas 18
13. Preparado por: Ing. Gustavo A. Badilla Vargas Investigador	Quím. Jorge Salazar Delgado Investigador 	Ing. Tania Avila Esquivel Investigadora 
Fecha: / /	Fecha: / /	Fecha: 29/01/2014
14. Revisado por: Ing. José Pablo Aguiar, PhD Coordinador Unidad de Materiales y Pavimentos 		15. Aprobado por: Ing. Guillermo Loría Salazar, PhD Coordinador General PITRA 
Fecha: 29/01/14	Fecha: / /	Fecha: 29/01/2014

TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS	4
ÍNDICE DE TABLAS	4
1. INTRODUCCIÓN.....	4
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	5
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	5
1.3 ANTECEDENTES	5
1.4 JUSTIFICACIÓN.....	7
1.5 MARCO TEÓRICO.....	7
2. METODOLOGÍA PROPUESTA	9
2.1 INVESTIGACIÓN BIBLIOGRÁFICA	9
2.2 IDENTIFICACIÓN DE ENSAYOS, EQUIPOS E INSTRUMENTOS DE ENSAYO Y/O MEDICIÓN.....	9
2.3 PROCEDIMIENTO DE ENSAYO	11
2.3.1 <i>PRODUCCIÓN DE CAL A TEMPERATURAS ESTIMADAS UTILIZADAS EN DIFERENTES CALERAS.....</i>	<i>11</i>
2.3.2 <i>PRODUCCIÓN DE CAL SEGÚN TEMPERATURA DEFINIDA POR TGA.</i>	<i>12</i>
2.3.3 <i>PRODUCCIÓN DE CAL A PARTIR DE CAL VIVA</i>	<i>13</i>
2.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS, HALLAZGOS Y OBSERVACIONES.....	13
2.5 ELABORACIÓN DE INFORMES, PUBLICACIONES, MANUALES Y PRODUCTOS	13
3. RESULTADOS / PRODUCTOS ESPERADOS	14
4. CONFORMACIÓN DEL GRUPO DE INVESTIGACIÓN.....	15
5. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES	16
6. RECURSOS NECESARIOS.....	17
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	18

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>FIGURA 1. MAPA DE UBICACIÓN DE DEPÓSITOS DE PIEDRA CALIZA</i>	8
<i>FIGURA 2. CAL HIDRATADA PRODUCIDA A PARTIR DE PIEDRA CALIZA (O CARBONATO DE CALCIO) BAJO UNA TEMPERATURA DE TRABAJO PREVIAMENTE DEFINIDA</i>	11
<i>FIGURA 3. CAL HIDRATADA PRODUCIDA A PARTIR DE PIEDRA CALIZA (O CARBONATO DE CALCIO) BAJO TEMPERATURA DE TRABAJO OBTENIDA DE ENSAYOS TERMOGRAVIMÉTRICOS</i>	12
<i>FIGURA 4. CAL HIDRATADA PRODUCIDA A PARTIR DE CAL VIVA (CAO + CO₂)</i>	13

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. RESPONSABLES DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN.....	15
TABLA 2. ADMINISTRACIÓN, TRANSPORTE DE MATERIALES Y PONENCIAS (US\$).....	17
TABLA 3. DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS DE CAMPO/LABORATORIO A REALIZAR.....	17

1. INTRODUCCIÓN

La cal es un aditivo que puede agregarse a suelos con altos límites de plasticidad y contenidos de humedad natural relativamente altos, que permite modificar las propiedades físico-químicas del suelo para transformarlo en un material duradero y resistente. Esto sin duda, convierte la cal en una alternativa que ofrece beneficios económicos y ecológicos para la conservación de las vías de lastre del país.

El grado y magnitud de la mejoría como resultado de la adición de cal en las propiedades del suelo, depende de parámetros relacionados propiamente con la cal, tales como: el proceso productivo (horneado, hidratación y molienda), la granulometría (o finura de la cal), la química de la cal (porcentajes de óxidos de calcio y óxidos de magnesio), entre otros factores. Así pues, se hace necesario estudiar el proceso productivo de la cal con la finalidad de evaluar la necesidad de la aplicación de posibles cambios en la producción de las caleras nacionales que sean rentables y maximicen la aplicación de la misma para la estabilización de materiales granulares y suelos.

1.1 Objetivo general

Analizar las propiedades físico-químicas de materiales de origen calizo (ubicación geográfica, la génesis y la composición mineralogía) y su influencia en el proceso de producción de cal para su aplicación como agente estabilizados de materiales granulares y suelos.

1.2 Objetivos específicos

- Ubicar las principales fuentes utilizadas para la extracción de materiales de origen calizo utilizados para la producción de cal que pueden ser utilizados para la estabilización de materiales granulares y suelos.
- Analizar el proceso productivo en las caleras nacionales y su influencia en las propiedades de la cal.
- Identificar las variables que afectan las propiedades físicas y químicas de la cal nacional por su origen geológico.
- Clasificar los tipos de cal a nivel nacional según su origen geológico.

1.3 Antecedentes

En el proyecto de graduación elaborado por Ávila (2010) se hace una recopilación y síntesis sobre los antecedentes existentes relacionados con la adición de la cal como agente estabilizador de materiales granulares y suelos. A continuación se resumen las observaciones realizadas en este estudio:

- Se han llevado a cabo diferentes investigaciones sobre los beneficios de adicionar cal en suelos con deficiencias, sin embargo no se ha caracterizado la influencia del proceso de producción de la cal que se utilizó o su origen geológico.
- Los estudios han consistido en tomar muestras de cal de una fuente y utilizarlas para los análisis buscados.
- En el país no existen aún especificaciones de las propiedades necesarias de la cal, de manera que se pueda asegurar un correcto desempeño cuando se establezcan materiales cohesivos o granulares para su uso en carreteras.

- El proyecto de graduación elaborado por J. L. Altamirano (1983) divide su investigación en dos partes: la primera presenta el fundamento teórico de la estabilización de suelos para base con cemento y cal, y la segunda consiste en un estudio de laboratorio de las propiedades físicas de los suelos estabilizados. Sin embargo, no se le realiza ningún estudio a la cal utilizada ni se escoge su procedencia con base en algún criterio ingenieril: simplemente se dosifica al suelo en estudio.
- Por otro lado, el estudio elaborado por Solera (1975) se orienta hacia una investigación de las propiedades de la mezcla de suelos con cal y la evaluación, por medio de ensayos de laboratorio, de los cambios físicos y mecánicos que produce la cal en el suelo original. Esto con el fin de identificar si existe algún beneficio en la aplicación de la cal, pero no seleccionar la misma con base en sus propiedades u origen. A pesar de que dicho autor hace sus investigaciones en material de subrasante, el trabajo se efectuó con la tecnología disponible en la década de los setentas.
- Barrantes (1997) tuvo como principal finalidad analizar mediante pruebas de laboratorio el comportamiento a largo plazo de materiales degradables estabilizados con cal, utilizados como bases de carretera en las zonas de Barú – Piñuela – Palmar Norte. Dicho autor selecciona muestras de bases estabilizadas únicamente en los lugares mencionados y no utiliza ninguna metodología para caracterizar la cal. Existe además un estudio elaborado por Larrad (1959) sobre bases estabilizadas con cal, pero solo se basa en un tipo de cal que fue seleccionado en forma aleatoria.
- El proyecto Hornos de Cal (1988 – 1994), desarrollado por Rosales (1994), es quizá el más completo a la fecha en lo que se refiera a recopilación de datos respecto a las caleras presentes en el país y sus procesos productivos.

1.4 Justificación

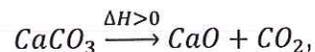
En general, en Costa Rica existe un desconocimiento sobre los tipos de cal que se producen en las industrias nacionales, y por lo tanto se ignoran las propiedades físico-químicas de la materia prima, del producto final y la aplicación de éstos como material estabilizador de materiales granulares y suelos.

La ubicación geográfica, la génesis y la composición mineralogía de cada una de estas formaciones pueden tener influencia en el desempeño físico-químico de los materiales calizos.

1.5 Marco teórico

La cal se obtiene a partir de las rocas calizas, incineradas a una temperatura entre los 900 y 1.200°C (por debajo de la temperatura de descomposición del óxido de calcio) durante varios días, dependiendo del tipo de piedra caliza, en un horno rotatorio o tradicional (Ávila, 2010).

Las reacciones químicas en la cocción de la cal se puede representar como:



donde,

$CaCO_3$ es Carbonato de Calcio proveniente de una Piedra Caliza,

$\Delta H > 0$ significa que es una reacción endotérmica (se requiere calor),

CaO es el Óxido de Calcio (también conocido como “Cal Viva”),

CO_2 es el Dióxido de Carbono.

Es muy difícil encontrar en la naturaleza cales químicamente puras. Normalmente están acompañadas de otros materiales como el carbonato de magnesio, arcilla, hierro, azufre, álcalis, etc. Esto da origen a una clasificación según el estado de pureza de la misma, y la proporción de los materiales que la conforman.

En Costa Rica se reconocen las siguientes formaciones geológicas caracterizadas con alto contenido de materiales calizos: la Formación Barra Honda (Valle del Tempisque), Formación San Miguel (Sur del Valle Central), Formación Las Ánimas (Turrialba), Formación El Viejo (Península de Santa Elena), Formación Brito (Cordillera Costeña) y Depósitos Recientes o Travertinos (En Costa Rica se conocen tres depósitos de travertino:

el de Navarro, al sureste de Cartago, el de La Palmera, al noreste de Ciudad Quesada, y el de Nagatac, cerca de San Ramón). La Figura 1 indica las ubicaciones geográficas de dichas formaciones.

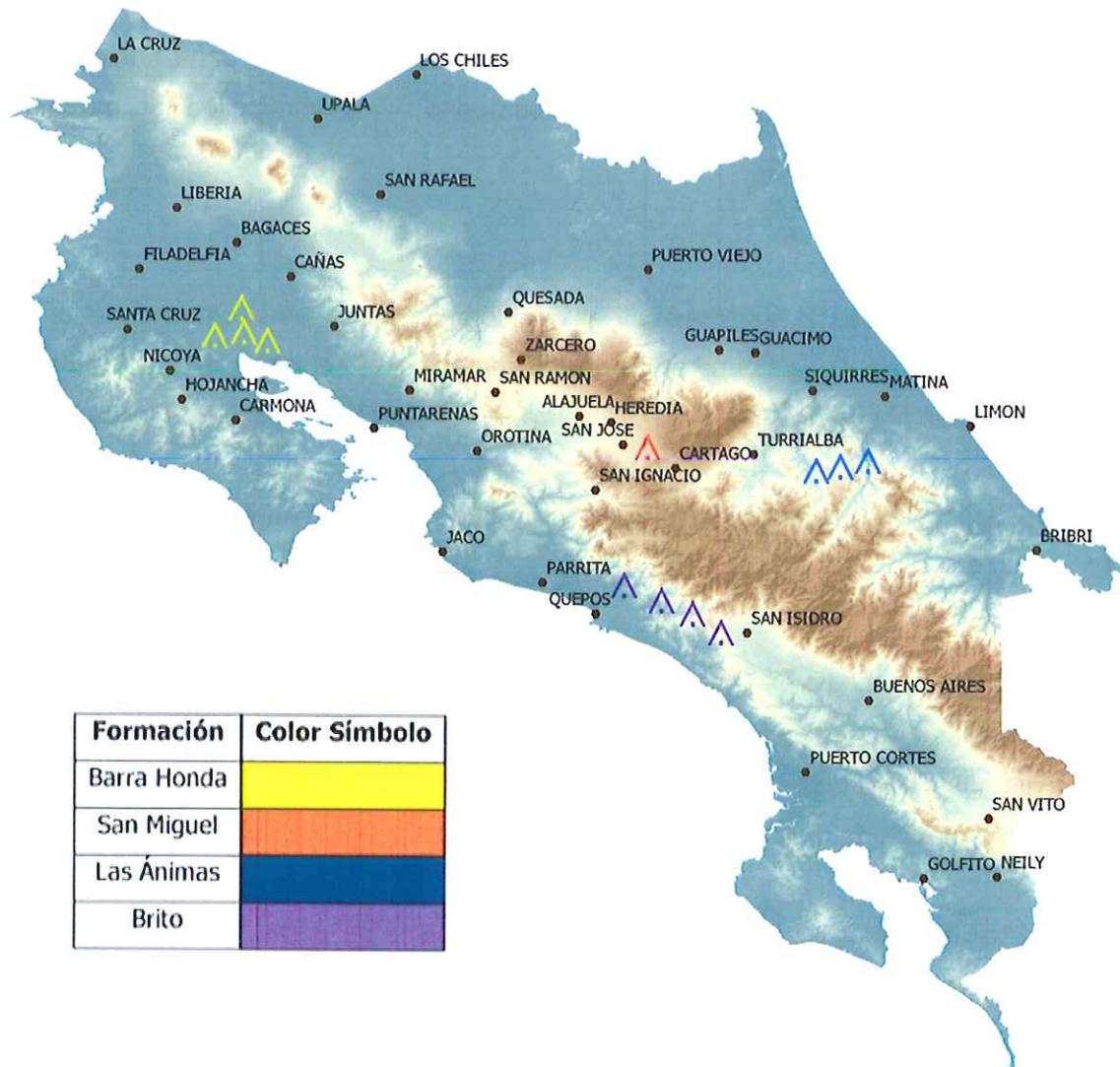


Figura 1. Mapa de ubicación de depósitos de piedra caliza, (Ávila, 2010)

2. METODOLOGÍA PROPUESTA

Esta investigación tiene como objetivo analizar las propiedades físico-químicas de materiales de origen calizo y la influencia del proceso de producción de cal. El proyecto se divide en 5 fases bien definidas, con alcances específicos para el cumplimiento del objetivo final.

2.1 Investigación bibliográfica

Esta fase comprende la revisión bibliográfica para identificar los estudios que se hayan realizado previamente sobre el tema del proyecto de investigación, con el fin de fortalecer el estado de conocimiento actual.

2.2 Identificación de ensayos, equipos e instrumentos de ensayo y/o medición

En esta etapa se ejecutarán los ensayos necesarios para caracterizar los materiales calizos. A saber, se realizarán los siguientes ensayos:

- **Análisis Termogravimétricos (TGA):** es una técnica en la cual la masa de una sustancia es monitoreada como función de la temperatura o el tiempo al cual la muestra se encuentra sometida dentro de un programa de temperatura controlada en una atmósfera controlada.
- **Difracción de rayos X (DRX):** es una metodología utilizada para determinar la composición mineralógica de una sustancia. En el caso de materiales calizos, generalmente se realiza una caracterización de las partículas con un tamaño menor a 0,075 mm
- **Ensayos de pH:** La medición del pH se realiza de acuerdo al procedimiento de ensayo ASTM D4972 para establecer, si es posible, una correlación entre el contenido de CaCO_3 del material calizo y su pH. En este caso, se toman 10 gramos de material calizo seco al aire que pase la malla No.10 (2 mm) combinado con 10 ml de agua. El valor de pH se determina una hora después del mezclado con un equipo de medición de pH (pH meter) calibrado.

- **Caracterización química de la cal:** De acuerdo a la norma ASTM C977-03, es necesario determinar los siguientes parámetros de la cal:
 - Contenido de dióxido de carbono (CO_2): Permite evaluar la presencia de otros componentes minoritarios de las cales, como son los carbonatos cálcico y magnésico. El contenido de dichos compuestos debe ser inferior al 5% en masa a la hora de la fabricación.
 - Finura del molido: Es una característica importante en la medida que interviene en las condiciones de almacenamiento, transporte y mezcla con el suelo. La finura se evalúa mediante un análisis granulométrico. En general, no debe haber más del 3% retenido en la malla No.30 (590- μm) y no más del 25% retenido en la malla No.200 (75- μm).
 - Contenido de óxidos de calcio y de magnesio: En conjunto no deben ser menores al 90%.
 - Humedad natural: No debe ser más del 2%.

2.3 Procedimiento de ensayo

En general los materiales de origen calizo utilizados para esta investigación en la producción de cal hidratada pueden encontrarse en diferentes etapas del proceso de producción. Así pues, se puede tener piedras calizas (o carbonato de calcio), se puede tener cal viva ($\text{CaO} + \text{CO}_2$) o cal hidratada. De esta manera, se presentan a continuación los diagramas de flujo del proceso de producción: (ver Figuras 2, 3 y 4)

2.3.1 Producción de cal a temperaturas utilizadas en diferentes caleras.

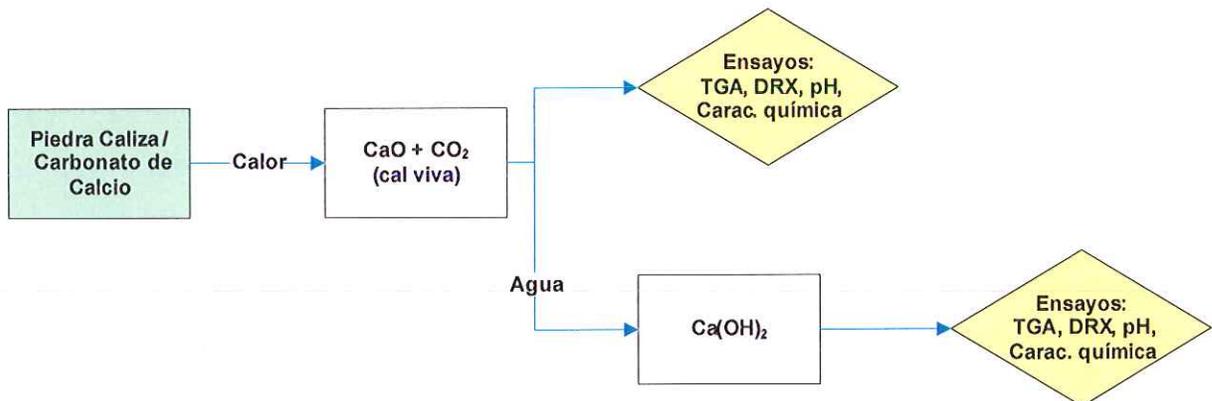


Figura 2. Cal Hidratada producida a partir de piedra caliza (o carbonato de calcio) bajo una temperatura de trabajo previamente definida

Según la Figura 2, a la muestra se le pica con un cincel y mazo para retirar parte de la caliza, y se quiebra más para obtener pedazos más pequeños. Se colocan trozos en capsulas de porcelana y se calcina a la temperatura de trabajo por alrededor de 24 horas. A una parte de la muestra se le realizan los ensayos de TGA, DRX, pH y caracterización química. El resto de la muestra es hidratada con agua para obtener los hidróxidos de calcio. Posteriormente a este proceso se le realizan los ensayos TGA, DRX, pH y caracterización química.

2.3.2 Producción de cal según temperatura definida por TGA.

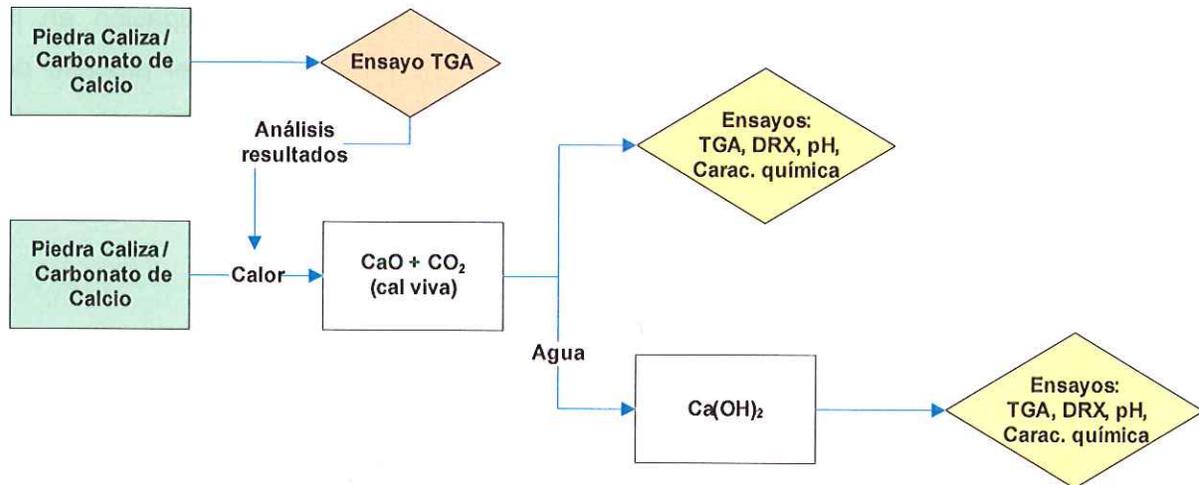


Figura 3. Cal Hidratada producida a partir de piedra caliza (o carbonato de calcio) bajo temperatura de trabajo obtenida de ensayos Termogravimétricos

Conforme a la Figura 3, la muestra se prepara y se muele igual que en el caso anterior. A la parte de mayor cantidad de finos se les realiza el ensayo de TGA para determinar el contenido total de residuos y la temperatura teórica de trabajo para calcinación. Se colocan pedazos en capsulas de porcelana y se calcina a la temperatura de trabajo obtenida del ensayo de TGA por alrededor de 24 horas. Para determinar la efectividad del proceso de calcinación se realizan mediciones de TGA cada 16 horas hasta obtener un valor mínimo y constante de CO₂. Posteriormente, se toma una parte de la muestra para realizar ensayos de TGA, DRX, pH y caracterización química. El resto de la muestra es hidratada con agua para obtener los hidróxidos de calcio. Posterior a este proceso se le realizan los ensayos TGA, DRX, pH y caracterización química.

2.3.3 Producción de cal a partir de cal viva

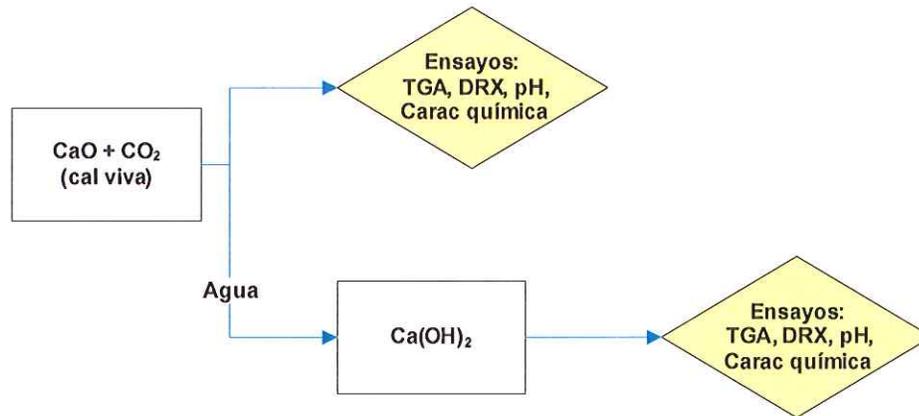


Figura 4. Cal Hidratada producida a partir de cal viva ($\text{CaO} + \text{CO}_2$)

A una parte de la muestra se le realizan los ensayos de TGA, DRX, pH y caracterización química. El resto de la muestra es hidratada con agua para obtener los hidróxidos de calcio (cal hidratada), posteriormente a este proceso se le realizan los ensayos TGA, DRX, pH y caracterización química (ver Figura 4).

2.4 Análisis de resultados, hallazgos y observaciones

Se discute en este capítulo lo que los hallazgos y observaciones en términos de las especificaciones, normativas, políticas y procedimientos utilizados que permitan entender y explicar el proceso de producción de cal hidratada para su uso en la estabilización de materiales granulares y suelos dentro de estructuras de pavimentos. Se analizará la influencia que tienen las propiedades de los materiales calizos originales y el procedimiento productivo utilizado. Además, se discutirán las limitaciones existentes para que sean tomadas en cuenta en futuros proyectos de investigación.

2.5 Elaboración de informes, publicaciones, manuales y productos

En esta fase se elaborarán los informes parciales y/o finales del desarrollo del proyecto y se publicarán los resultados, manuales y demás productos que se puedan obtener de la investigación.

3. RESULTADOS / PRODUCTOS ESPERADOS

X	Artículo científico en revista indexada		Libro
	Artículo científico en revista indexada		Capítulo de libro
X	Artículo de divulgación	X	Especificaciones técnicas
	Ponencias en congresos		Hardware
	Conferencias o seminarios		Software
	Patentes		Trabajos o proyectos de graduación
	Diseño de cursos	X	Nuevas metodologías
	Formación de la comunidad científica		

Generación de nuevo conocimiento: Científico y/o Académico

Resultado/Productoesperado	Indicador	Beneficiario
Evaluación de las propiedades de la cal dependiendo de la materia prima usada	Publicaciones	Grupo de investigación que aborda el proyecto
Implementación de la metodología en laboratorio para la caracterización de materiales calizos	Metodología	Grupo de investigación que aborda el proyecto, consultores, constructores, administradores, laboratorios e ingenieros relacionados con sector vial del país.

Impacto a nivel nacional en la comunidad científica

Resultado/Productoesperado	Indicador	Beneficiario
Interacción con productores, laboratorios y consultores	Trabajo conjunto	Grupo de investigación que aborda el proyecto
Formación de jóvenes investigadores	Participación de asistentes de investigación	Grupo de investigación que aborda el proyecto
Especificaciones técnicas	Redacción de los resultados en especificaciones	Grupo de investigación que aborda el proyecto, consultores, constructores, administradores, laboratorios e ingenieros relacionados con sector vial del país.

Beneficios sociales y/o culturales

Resultado/Productoesperado	Indicador	Beneficiario
Mejoras en los procesos de explotación y producción de materiales calizos para la aplicación en la construcción de estructuras de pavimentos.	Trabajo conjunto	Consultores, constructores, administradores, laboratorios, productores de materiales calizos, municipalidades e ingenieros relacionados con sector vial del país.

Informe LM-PI-UMP-003-P	Fecha de emisión: 08 de marzo de 2013	Página 14 de 18
-------------------------	---------------------------------------	-----------------

Fortalecimiento de vínculos de apoyo y reconocimiento de la Universidad de Costa Rica con el sector externo

Resultado/Productoesperado	Indicador	Beneficiario
Artículo científico en revista indexada	Publicaciones	Grupo de investigación que aborda el proyecto
Ponencias en congresos, seminarios y/o simposios	Ponencias	
Fortalecimiento de vínculos de apoyo y reconocimiento	Cooperación científica	

4. CONFORMACIÓN DEL GRUPO DE INVESTIGACIÓN

El equipo de investigación que será responsable de la ejecución del proyecto de investigación, así como el tiempo que le dedicará a la misma.

Tabla 1. Responsables del proyecto de investigación

Investigador / Colaborador	Grado académico	Estado en régimen	Función en el proyecto	Dedicación semanal (horas)	Meses
Gustavo Badilla Vargas	Licenciatura	Interino	Investigador principal	8	12
Tania Ávila Esquivel	Licenciatura	Interino	Investigador asociado	8	12
Jorge Salazar Delgado	Bachiller	Interino	Investigador asociado	8	12
Asistente	Estudiante de Ing. Civil	Interino	Asistente de investigación	5	12

5. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

Tipo de material	Ensayos a realizar	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 5	Semana 6	Observaciones
Piedras Calizas o Carbonato de Calcio	Ingreso de Muestra	■						Cal hidratada producida bajo una temperatura de trabajo definida
	Calcinación de la muestra	■						
	Análisis Termogravimétricos (TGA)		■					
	Difracción de rayos X (DRX)			■	■	■	■	
	Ensayos de pH. Procedimiento de ensayo ASTM D4972		■					
	Contenido de óxidos de calcio y de magnesio.			■	■	■	■	
	Hidratación de Cal Viva (CaO+CO ₂)		■					
	Análisis Termogravimétricos (TGA)			■				
	Difracción de rayos X (DRX)				■	■	■	
	Ensayos de pH. Procedimiento de ensayo ASTM D4972			■				
	Análisis granulométrico, malla No.30 y malla No.200				■	■	■	
	Contenido de óxidos de calcio y de magnesio.				■	■	■	
	Contenido de humedad natural.				■	■	■	
	Análisis Termogravimétricos (TGA)	■						
	Revisión, análisis de resultados obtenidos en TGA	■						
	Calcinación de la muestra con temperatura de TGA		■					
	Análisis Termogravimétricos (TGA)			■				
	Difracción de rayos X (DRX)				■	■	■	
Ensayos de pH. Procedimiento de ensayo ASTM D4972				■				
Contenido de óxidos de calcio y de magnesio.					■	■		
Hidratación de Cal Viva (CaO+CO ₂)				■				
Análisis Termogravimétricos (TGA)				■				
Difracción de rayos X (DRX)					■	■		
Ensayos de pH. Procedimiento de ensayo ASTM D4972					■			
Análisis granulométrico, malla No.30 y malla No.200					■	■		
Contenido de óxidos de calcio y de magnesio.					■	■		
Contenido de humedad natural.					■	■		
Cal Viva (CaO+CO ₂)	Ingreso de Muestra	■						Cal hidratada producida a partir de cal viva (CaO+CO ₂)
	Análisis Termogravimétricos (TGA)	■						
	Difracción de rayos X (DRX)		■	■	■	■	■	
	Ensayos de pH. Procedimiento de ensayo ASTM D4972		■					
	Contenido de óxidos de calcio y de magnesio.			■	■	■	■	
	Hidratación de Cal Viva (CaO+CO ₂)		■					
	Análisis Termogravimétricos (TGA)			■				
	Difracción de rayos X (DRX)				■	■	■	
	Ensayos de pH. Procedimiento de ensayo ASTM D4972				■			
	Análisis granulométrico, malla No.30 y malla No.200					■	■	
	Contenido de óxidos de calcio y de magnesio.					■	■	
	Contenido de humedad natural.					■	■	

6. RECURSOS NECESARIOS

En este apartado debe definirse los recursos necesarios para la ejecución adecuada del proyecto de investigación.

Tabla 2. Administración, transporte de materiales y ponencias (US\$)

Descripción	Justificación	Valor
Publicaciones	Recopilación de información, libros y publicaciones en revistas nacionales e internacionales requeridas para la ejecución del proyecto de investigación	100
Papelería, fotocopias, transportes y viáticos	Informes, publicaciones, documentación, transporte de muestras de ensayo, viáticos para elaboración o mediciones, etc.	400
Participación en congresos	Presentación de los resultados en eventos nacionales y/o internacionales de relevancia	2500
Total (US\$)		3000

Para cada una de las muestras de Carbonato de Calcio o Piedra de Calizas se realizarán los siguientes ensayos.

Tabla 3. Descripción de los ensayos de campo/laboratorio a realizar

Ensayo	Justificación	Cantidad
Análisis Termogravimétricos (TGA)	Análisis físico-química de la cal viva (CaO + CO ₂) y de la cal hidratada producida en cada una de las etapas de producción de cal	5
Difracción de rayos X (DRX)		4
Ensayos de pH. Procedimiento de ensayo ASTM D4972		4
Contenido de dióxido de carbono (CO ₂).	Caracterización química de la cal. Procedimiento de ensayo ASTM C977-03.	4
Análisis granulométrico, malla No.30 (590- μ m) y malla No.200 (75- μ m).		2
Contenido de óxidos de calcio y de magnesio.		4
Contenido de humedad natural.		2

Nota: En el caso de tratarse de muestras de cal viva (CaO + CO₂), las cantidades indicadas anteriormente se reducen en todos los casos a 2.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Ávila, T. "Evaluación de las propiedades de la cal como material estabilizante de suelos plásticos para carreteras y su efecto en las características del material a estabilizar". Trabajo final de graduación para obtener el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil. Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica. San Pedro de Montes de Oca. 2010.
- (2) Altamirano, JL. "Bases Estabilizadas con Cemento y Cal". Proyecto de Graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San Jose, Costa Rica. 1983.
- (3) Barrantes, F. "Estabilización con Cal, de materiales degradables, para bases de carreteras, en la Zona de Barú – Piñuela – Palmar Norte". Proyecto de Graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San Jose, Costa Rica. 1997.
- (4) Larrad, M. "Estabilización de Bases con Cal". Proyecto de Graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San Jose, Costa Rica. 1959
- (5) Rosales, E. "La Industria de la Cal en Costa Rica". Gestión Empresarial, 20,28-33. Departamento de Ingeniería en Construcción, Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR). 1988
- (6) Rosales, E. "Proyecto Hornos de Cal, Fase II, Informe Final. Costa Rica" Departamento de Ingeniería en Construcción, Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR). 1994
- (7) Solera, C. "Mejoramiento de la Subrasante con Lechadas de Cal". Proyecto de Graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San Jose, Costa Rica.
- (8) American Society for Testing and Materials (ASTM). Designation D4972 "Standard Test Method for pH of Soils". 2007
- (9) American Society for Testing and Materials (ASTM). Designation C977 "Standard Specification for Quicklime and Hydrated Lime for Soil Stabilization". 2010
- (10) American Society for Testing and Materials (ASTM). Designation C110 "Standard Test Methods for Physical Testing of Quicklime, Hydrated Lime, and Limestone". 2011
- (11) American Society for Testing and Materials (ASTM). Designation C25 "Standard Test Methods for Chemical Analysis of Limestone, Quicklime, and Hydrated Lime". 2011