

ANÁLISIS DE LA UTILIZACIÓN DE LAS LATERITAS COMO MATERIALES EN
ESTRUCTURAS DE PAVIMENTOS PARA SU APROVECHAMIENTO EN
COLOMBIA.

ANGIE TATIANA TIBASOSA MORENO

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C
2018

ANÁLISIS DE LA UTILIZACIÓN DE LAS LATERITAS COMO MATERIALES EN
ESTRUCTURAS DE PAVIMENTOS PARA SU APROVECHAMIENTO EN
COLOMBIA.

ANGIE TATIANA TIBASOSA MORENO

Informe final de Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniera Civil.

Director:

JUAN MIGUEL SÁNCHEZ DURÁN

Ingeniero Civil y docente de facultad

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C
2018

CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN.....	9
Abstrac.....	10
INTRODUCCIÓN	11
OBJETIVO GENERAL.....	14
OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	14
1. MARCO TEÓRICO.....	15
1.1. SUELOS RESIDUALES.....	15
1.2. CARACTERÍSTICAS DE LOS SUELOS RESIDUALES.....	18
1.2.1 Estructura de los suelos residuales.....	18
1.2.3 Influencia de la topografía.....	20
1.3. SISTEMAS DE CLASIFICACIÓN PARA SUELOS RESIDUALES.....	21
1.3.1 Métodos basados en la clasificación pedológica.....	21
1.3.2 Métodos destinados al uso local en tipos de suelo específicos.....	22
1.3.3 Sistema de agrupación basado en la mineralogía y la estructura.....	22
1.4. SUELOS LATERÍTICOS.....	25
1.4.1 Proceso pedogenético de clima tropical y laterización.....	25
1.4.2 Laterita.....	27
1.4.3 Condiciones climáticas.....	29
1.4.4 Minerales de arcilla en suelos de laterita.....	31
1.4.5 Localización de suelos de laterita.....	35
1.4.6 Topografía y variaciones de color en suelos lateríticos.....	38
1.4.7 Variaciones en perfiles de suelos lateríticos.....	38
1.4.8 Características morfológicas de los suelos lateríticos.....	41
1.4.8.1 Características genético-texturales.....	43
1.4.8.2 Color.....	44
1.4.8.3 Macroestructura y microestructura.....	45
1.4.8.4 Relación con los materiales originales.....	47
1.5. ENSAYOS DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS.....	48
1.5.1 Preparación de los especímenes alterados.....	48

1.5.2 Distribución de partículas.....	49
1.5.3 Densidad aparente de partículas.....	49
1.5.4 Contenido de humedad.	49
1.5.5 Ensayos de plasticidad.	49
1.5.6 Ensayos de contracción.....	50
1.5.7 Gravedad específica.	51
1.5.8 Clasificación textural de los suelos de laterita.....	51
2. USO DEL SUELO LATERÍTICO EN LA ACTUALIDAD.....	53
2.1. SUELOS LATERÍTICOS EN BRASIL.....	53
2.2. METODOLOGÍA PARA LA CLASIFICACIÓN MCT PARA SUELOS TROPICALES.....	54
2.2.1 Ensayos mecánicos e hidráulicos.....	54
2.3. ENSAYOS PARA CARACTERIZACIÓN Y CLASIFICACIÓN MCT.....	56
2.3.1 Ensayo de compactación mini-CBR.....	57
2.3.2 Ensayo de expansión.	59
2.3.3 Ensayo de contracción.....	60
2.3.4 Ensayo de infiltrabilidad.....	61
2.3.5 Ensayo de permeabilidad.....	62
2.3.6 Ensayo de compactación mini-MCV.....	63
2.3.7 Penetración de la imprimación.....	64
2.3.8 Ensayo de determinación de pérdida de masa por inmersión.	65
2.4. CLASIFICACIÓN MCT (Miniatura Compactado Tropical).....	67
2.4.1 Grupos de la Clasificación MCT.....	70
2.4.1.1 Arenas lateríticas (LA):.....	70
2.4.1.2 Suelos arenosos lateríticos (LA'):.....	71
2.4.1.3 Suelos arcillosos lateríticos (LG'):.....	72
2.4.1.4 Arenas no lateríticas (NA):.....	72
2.4.1.5 Suelos arenosos no lateríticos (NA'):.....	72
2.4.1.6 Suelos sedimentarios no lateríticos (NS'):.....	72
2.4.1.7 Suelos arcillosos no lateríticos (NG'):.....	73
2.4.2 Carta para la Clasificación MCT	73
2.5. ANÁLISIS QUÍMICOS.....	79
2.5.1 Espectroscopia de fluorescencia de rayos X.....	80
2.5.2 contenido de materia orgánica.	80

2.5.3 pH.....	81
2.5.4 Pérdida por ignición.....	81
2.5.5 Contenido de carbonatos.....	81
2.5.6 Capacidad de intercambio catiónico.....	82
2.6. MINERALOGÍA DEL SUELO Y MICROESTRUCTURA.....	84
2.6.1 Microscopía óptica.....	84
2.6.2 Microscopía electrónica de barrido.....	85
2.6.3 Difracción de rayos X.....	86
2.6.4 Análisis térmico de arcillas.....	86
2.6.5 Espectroscopia infrarroja.....	87
2.7. APLICACIONES DE LA METODOLOGÍA MCT EN LAS CAPAS DE LA ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO.....	88
2.7.1 Suelo arenoso fino laterítico (SALF).....	88
2.7.2 Suelo arcilloso laterítico y arena (ALA).....	92
2.7.3 Suelo-grava, suelo-agregado o suelo estabilizado granulométricamente (SLAD).....	93
2.7.3.1 Bases de suelo laterítico- Grava discontinua, con uso de suelo arenoso fino laterítico (SLBD-A).....	94
2.7.3.2 Bases de suelo -grava discontinua con uso de arcilla laterítica (SLBD-G).....	95
2.7.4 Suelo laterítico concrecionado (SLC).....	95
2.7.5 Materiales estabilizados con cementos.....	97
2.7.6 Suelo-cal (SCA).....	97
2.8. PROPUESTA DE UNA CLASIFICACIÓN PARA SUELOS TROPICALES DE GRANULACIÓN GRUESA, G-MCT.....	99
2.8.1 Determinación del tipo granulométrico específico de suelo granular.....	100
2.8.2. Clases y grupos de la clasificación G-MCT.....	101
2.8.3. Cantidad de fracción que pasa el tamiz de 0,075 mm.....	103
2.8.4. Cantidad de fracción que pasa el tamiz de 2,0 mm.....	103
2.9. SUELOS LATERÍTICOS EN INDIA.....	104
2.10. SUELOS LATERITICOS EN ÁFRICA.....	111
2.11. SUELOS LATERITICOS EN AUSTRALIA.....	124
4. CONCLUSIONES.....	153
BIBLIOGRAFÍA.....	154

LISTA DE TABLAS

Pág.

Tabla 1. Pedología de suelos residuales de interés en la ingeniería geotécnica.	22
Tabla 2. Agrupamiento de suelos residuales con propiedades ingenieriles similares.	24
Tabla 3. Relación entre la lluvia y la relación Sílice-Alúmina de las fracciones de arcilla de algunos suelos tropicales (Prescott y Pendenton, 1952)	30
Tabla 4. Relación entre la precipitación y la relación de sesquióxido de sílice ($SiO_2 / Al_2O_3 + Fe_2O_3$) de la fracción de arcilla de algunos suelos de laterita Nigeriana (Vine, 1949)	31
Tabla 5. Mineralogía de los suelos tropicales típicos en relación con la roca madre y las condiciones climáticas. (Morin y Parry, 1969).....	33
Tabla 6. Tipos de minerales arcillosos e intensidad de lixiviación.	34
Tabla 7. Resumen de las características de suelos ferruginosos y aluminosos. (Maignien, 1966)	42
Tabla 8. Composición química de suelos típicos de laterita.....	42
Tabla 9. Características morfológicas generalizadas de los materiales de los perfiles de laterita.....	43
Tabla 10. Características de plasticidad de arcillas de lateritas y no lateritas.	50
Tabla 11. Valores de gravedad específica de algunos suelos lateríticos.	51
Tabla 12. Características del ensayo de compactación.	57
Tabla 13. Resistencias típicas de algunos suelos tropicales compactados.....	59
Tabla 14. Correlación del coeficiente c' con comportamiento granulométrico de clase L. .	69
Tabla 15. Clasificación de suelos MCT a partir del coeficiente c' y la penetración del ensayo mini-MCV.	69
Tabla 16. Grupos de clasificación de suelos MCT.	70
Tabla 17. Empleos comunes de suelos tropicales en carreteras Brasileñas.....	74
Tabla 18. Peculiaridades de suelos finos tropicales de clasificación MCT.	74
Tabla 19. Propiedades físicas determinadas por los ensayos de la metodología MCT.....	75
Tabla 20. Principales características mecánicas e hídricas de los suelos lateríticos y no lateríticos.....	76
Tabla 21. Propiedades mecánicas e hídricas admisibles.....	77
Tabla 22. Propiedades más consideradas en la clasificación MCT.	78
Tabla 23. Valores Numéricos de las propiedades de los grupos MCT.....	78
Tabla 24. Análisis químico de rutina aplicable a suelos residuales.	79
Tabla 25. Capacidades de intercambio catiónico típicos de los minerales de arcilla.	83
Tabla 26. Información que puede obtenerse de la operación de un microscopio electrónico de barrido.....	85
Tabla 27. Temperaturas características de picos endotérmicos y exotérmicos de minerales.....	87

Tabla 28. Clasificación G-MCT.....	102
Tabla 29. Propiedades y jerarquización de los grupos de la clasificación G-MCT.....	102
Tabla 30. Resumen de las propiedades básicas del suelo.....	107
Tabla 31. Resumen de las propiedades básicas del suelo.....	108
Tabla 32. Resumen de las propiedades básicas del suelo.....	109
Tabla 33. Parámetros de suelos lateríticos obtenidos por diferentes autores.....	110
Tabla 34. Resultados de la composición mineralógica de la muestra de grava laterítica.	119
Tabla 35. Comparación de las propiedades de los materiales sudafricanos con la especificación brasileña.....	121
Tabla 36. Comparación de las propiedades de los materiales de Botswana con la especificación brasileña.....	122
Tabla 37. Comparación de las propiedades de los materiales de Mozambique con la especificación brasileña.....	122
Tabla 38. Comparación de las propiedades de los materiales de Etiopia con la especificación brasileña.....	123
Tabla 39. Comparación de las propiedades de los materiales de Malawi con la especificación brasileña.....	123
Tabla 40. Contenido de minerales de las muestras.....	132
Tabla 41. Resultados de ensayos de contenido de agua y plasticidad.....	133
Tabla 42. Composición mineralógica de las muestras.....	135
Tabla 43. Evaluación de la aptitud del material para terraplén.....	136
Tabla 44. Resultados obtenidos del ensayo de compactación normal.....	137
Tabla 45. Resultados del análisis químico de microscopia electrónica de barrido.....	137
Tabla 46. Número de ensayos realizados en la investigación.....	140
Tabla 47. Valores de CBR para Suelo laterítico.....	143
Tabla 48. Comparación de los valores de CBR (%) obtenidos en los ensayos, con los valores requeridos por INVIAS.....	143
Tabla 49. Valores de CBR en seco e inmersión, para mezclas de ripio y distintas concentraciones.....	146
Tabla 50. Valores de CBR en seco e inmersión, para mezclas de ripio y distintas concentraciones.....	149
Tabla 51. Resultados de los ensayos físicos realizados.....	151
Tabla 52. Clasificación para el índice de colapso.....	152

LISTA DE FIGURAS

Pág.

Figura 1. Distribución global de los principales tipos de suelos residuales.	16
Figura 2. Formación de suelos sedimentarios y suelos residuales.....	17
Figura 3. Factores y procesos que determinan las características de la estructura.	19
Figura 4. Influencia de la topografía en la formación de suelos residuales.	21
Figura 5. Perfil esquemático de la presencia de suelos lateríticos y no lateríticos.	26
Figura 6. Formación de lateritas por corrientes de agua ocasionales.	28
Figura 7. Secuencia de meteorización de lavas basálticas en las islas Hawaianas en relación con los entornos de intemperismo. Sherman (1952)	31
Figura 8. Formación de arcilla bajo diversas condiciones de intemperie. (Frederickson, 1952)	32
Figura 9. Mapa mundial generalizado que muestra la distribución general de los suelos de laterita.	36
Figura 10. Influencia del clima global en la profundidad de meteorización y los productos de la misma.	37
Figura 11. Condiciones de lluvia y temperatura para la formación de suelos lateríticos. ...	37
Figura 12. Características genético-texturales de los suelos de laterita.	44
Figura 13. Tonos de óxido de hierro hidratado.....	45
Figura 14. Cuadro de texturas propuesto para la clasificación de gravas de laterita y suelos de grava.	52
Figura 15. Distribución de suelos lateríticos en Brasil.	53
Figura 16. Flujograma de los grupos de ensayos de la Metodología MCT.	55
Figura 17. Aspecto de los moldes para suelos tropicales.....	55
Figura 18. Esquema comparativo de los aparatos de compactación relacionados a la metodología MCT.	56
Figura 19. Detalle del ensayo de compactación.....	58
Figura 20. Detalle del ensayo de contracción.....	61
Figura 21. Detalle del ensayo de infiltrabilidad.....	62
Figura 22. Detalle del ensayo de permeabilidad.	62
Figura 23. Detalle ensayo Mini-MCV	64
Figura 24. Detalle del ensayo de penetración de la imprimación.	65
Figura 25. Detalle del ensayo por pérdida de inmersión.....	66
Figura 26. Coeficientes necesarios para la clasificación MCT.	67
Figura 27. Macroestructura típica de los suelos lateríticos.	70
Figura 28. Ocurrencia de suelo LA.	71
Figura 29. Ocurrencia de suelos LA'.....	71
Figura 30. Ocurrencia de suelos LG'.....	72
Figura 31. Ábaco para la clasificación MCT.	73
Figura 32. Relación entre la precipitación y la acumulación de carbonatos.....	82

Figura 33. Suelo superficial laterítico con cuarzo arenoso.....	88
Figura 34. Jerarquización de los SALF de acuerdo a la clasificación MCT.....	89
Figura 35. Agrietamiento debido al secado de la base.	89
Figura 36. Áreas satisfactorias y recomendadas para las mezclas de suelo-agregados...	91
Figura 37. Sección típica de un pavimento vial con base SALF.	92
Figura 38. Yacimiento de suelo de granulación gruesa de concreción laterítica.....	99
Figura 39. Programa de ensayos para la clasificación G-MCT.....	100
Figura 40. Grafica de los tipos granulométricos específicos de suelos de granulación gruesa.....	101
Figura 41. Localización de suelo laterítico en la India.	105
Figura 42. Ubicación de las muestras de suelo laterítico granular recogidas para el estudio.	106
Figura 43. Clasificación de la plasticidad de los suelos de laterita en relación a las condiciones climáticas.	111
Figura 44. Clasificación de la plasticidad de los suelos de África central en relación con la distribución de las precipitaciones.	112
Figura 45. Usos de suelos lateríticos en África.	113
Figura 46. Mapa geológico de Nigeria mostrando el área de estudio.	113
Figura 47. Mapa que muestra las áreas de estudio Obosi, Umunya, Awkuzu, Igbariam.	115
Figura 48. Estructura del pavimento en algunas vías de Lagos, Nigeria.	117
Figura 49. Localización del lugar de proveniencia de la grava laterítica.	118
Figura 50. Ejemplo del estado de las vías en Sudáfrica.	120
Figura 51. Vía en Botswana con base de laterita.	121
Figura 52. Ubicación del área de estudio.	124
Figura 53. Vías de la región oriental del territorio colombiano.	128
Figura 54. Distribución de suelos en Colombia.....	129
Figura 55. Ejemplo del estado de una vía del departamento del Vichada.	130
Figura 56. Extracción de muestras en bloque.	131
Figura 57. Suelo laterítico granular, ripio. Puerto Carreño, Vichada.....	140
Figura 58. Curva de compactación.....	142
Figura 59. Estado de la muestra antes y después del ensayo de durabilidad.	144
Figura 60. Interacción del polímero con las partículas de suelo.	148
Figura 61. Localización de la zona de estudio.....	150

RESUMEN

Los suelos lateríticos son suelos característicos de las regiones tropicales, donde las variaciones de precipitación y temperatura son abruptas, se caracterizan por la ausencia de bases y sílice, además de poseer alto contenido de hierro y óxidos e hidróxidos de aluminio, como resultado del alto grado de meteorización al que están expuestos. En países donde la presencia de materiales granulares con características óptimas para la construcción de estructuras de bases y subbases de pavimentos son escasos, se han visto en la necesidad de utilizar materiales provenientes de suelos tropicales y ajustar su aplicación para que cumplan con los parámetros de resistencia y durabilidad establecidos por los diseños, servicio de las vías y normatividad instituida en cada región; se realizó una recopilación acerca del uso de suelos lateríticos de algunos de los países ubicados en la zona del trópico como Brasil, India y África, con el fin de conocer las características de éstos, y los diferentes usos y técnicas que se emplean para su aprovechamiento en la construcción de vías. Principalmente se puede ver que Brasil es uno de los países que mayor aprovechamiento le da a este tipo de suelo debido a que la mayoría de su territorio se encuentra cubierto por éste, por lo que se vieron en la necesidad de adoptar ensayos y metodologías para su clasificación, surgiendo así la metodología MCT para suelos arcillosos finos lateríticos y G-MCT para suelos tropicales con granulometría gruesa y caracterización mineral mediante análisis químicos; en el caso de regiones como África e India, se muestran diferentes investigaciones y conclusiones de éstas sobre el uso de suelos tropicales lateríticos en pavimentación en los cuales se realizaron algunos ensayos convencionales para determinar parámetros y características mecánicas.

En el territorio Colombiano especialmente encontramos suelos lateríticos en la región de la Orinoquia y Amazonia, estos han sido brevemente estudiados para su implementación como materiales en obras de infraestructura vial; las regiones mencionadas se caracterizan por tener estructuras viales deficientes debido a la falta de conocimiento en técnicas que permitan aprovechar adecuadamente los suelos tropicales en la construcción de las estructuras del pavimento, actualmente se han realizado algunos estudios a muestras tomadas del departamento del Vichada a las cuales se les han realizado ensayos de corte, succión, rigidez, microestructura y algunas caracterizaciones básicas que han permitido tener algo de conocimiento sobre el comportamiento mecánico de los suelos lateríticos en el territorio.

Palabras clave: Suelo laterítico, clasificación MCT y G-MCT, análisis químicos.

Abstrac

The lateritic soils are characteristic soils of the tropical regions, where the variations of temperature and precipitation are abrupt, are characterized by the absence of bases and silica, besides having a high content of oxides and hydroxides of iron and aluminum, as a result of the High degree of weathering to which they are exposed. In countries where the presence of granular materials with optimum characteristics for the construction of base structures and sub-bases of pavements is scarce, it has been necessary to use tropical soil materials and adjust their application to comply with the parameters of resistance and durability established For the Designs, service of the roads and regulations established in each region. A compilation was made on the use of lateritic soils from some of the countries located in the tropics, such as Brazil, India and Africa, to know the characteristics of these and the different uses and techniques used for their use in road construction. Mainly, it can be seen that Brazil is one of the countries that most uses this type of soil because most of its territory is covered by it, so they found that it was necessary to adopt trials and methodologies for their classification, thus resulting in MCT methodology for lateritic fine clay and G-MCT for tropical soils with granulometry thick and mineral characterization by chemical analysis; in the case of regions like Africa, Australia and India, various investigations and conclusions of these on the use the paving tropical lateritic soils which where they are shown some conventional assays that were performed to determine parameters and mechanical characteristics.

In the Colombian territory, lateritic soils are found in the region of the Orinoquia and Amazonia, these have been briefly studied for their implementation as materials in road infrastructure works; the mentioned regions are characterized by having poor road structures due to the lack of knowledge in techniques that allow to take advantage of the tropical soils in the construction of the pavement structures, at present some studies have been made to samples taken from the department of Vichada to which they have been realized essays out cutting, suction, rigidity, microstructure and some basic characterizations that have allowed to have some knowledge about the mechanical behavior of lateritic soils in the territory.

Key words: Lateritic soil, MCT and G-MCT classification, chemical analysis.

INTRODUCCIÓN

La zona tropical se encuentra entre la zona ecuatorial y los trópicos de cáncer y de capricornio, incluye la mayor parte de América Latina, África, la India, y aproximadamente la mitad de Australia, se encuentra caracterizada climáticamente por un régimen estacional que concentra lluvias de gran intensidad en ciertos períodos del año acompañadas con períodos de déficit hídricos; con temperaturas que suelen encontrarse por encima de los 20°C; en esta zona se forman los suelos tropicales, que se caracterizan por ser más profundos e intemperizados que los suelos templados, son más pobres en sílice, con bajo intercambio catiónico, alto intercambio aniónico, más ácidos y ricos en óxidos de hierro y aluminio. Los suelos mencionados anteriormente, corresponden a los suelos residuales que se forman a partir de procesos de meteorización que descomponen las rocas en superficie, estos materiales se encuentran en la mayoría de los casos en condición de saturación parcial y presentan mineralogía y una microestructura que influyen bastante en su comportamiento mecánico

El territorio Colombiano cuenta con variedad de materiales provenientes de la formación geológica de las diferentes zonas montañosas donde es posible su extracción ya sea de canteras y/o ríos, entre estos se encuentran materiales granulares, arenas y arcillas que tienen un papel muy importante en la industria de la construcción debido a que son materia prima para la producción de morteros, concretos, bases, subbases y rellenos de vías.

Para la construcción de vías se utilizan materiales seleccionados los cuales deben contar con una capacidad de soporte suficiente para transmitir al suelo de fundación las cargas impuestas por el tráfico de servicio y que sean capaces de confrontar bien los ataques climáticos, las especificaciones de estos materiales se desarrollan bajo la reglamentación del gobierno nacional a través del Instituto Nacional de Vías (INVIAS) y de las Normas Técnicas Colombianas (NTC) que permiten mantener la calidad y durabilidad de las carreteras. No obstante, existen regiones del país donde no se es posible contar con materiales que cumplan las especificaciones exigidas por las normativas, como es el caso de la región oriental, la amazonia y algunos sectores planos de la región Caribe, caracterizadas por su topografía que consta principalmente de llanuras y de una

depresión rellena por sedimentos aluviales con un modelo deltaico en donde es frecuente el mal drenaje, y su clima desfavorable y semihúmedo que presenta un período de sequía y otro de lluvia con temperaturas elevadas, la precipitación tiende a aumentar hacia el sur del territorio como consecuencia de las variaciones climáticas, por lo cual existen suelos que se resecan por períodos largos y suelos que habitualmente permanecen húmedos durante todo el año cuya estación seca es muy corta, estos suelos constituyen depósitos de suelos limo arcillosos de comportamiento laterítico que no cumplen con las especificaciones del INVIAS pero que se utilizan como materiales para la construcción de vías terciarias en la región, los cuales hacen que el tránsito por éstas sólo sea posible en verano (febrero- abril), al versen afectadas por las épocas de lluvia.

La región oriental hace parte de las zonas en donde el transporte de materiales incrementa el costo de construcción de vías, debido a esto se hace necesario el estudio de los suelos propios de la región, con el fin de exponer conceptos técnicos que garanticen su aprovechamiento, lo que implicaría a su vez una reducción en los costos de construcción sin comprometer el desempeño de las obras.

Por la situación anterior, se vio la necesidad de realizar una investigación bibliográfica con el fin de recopilar información acerca del uso de suelos residuales lateríticos en otros países del trópico, que permita tener un conocimiento más profundo sobre las técnicas y metodologías óptimas para su utilización como materia prima en estructuras de bases, subbases y mejoramiento de subrasantes, así como de las características adecuadas para su buen desempeño. Para la ejecución de la investigación planteada, se ha organizado el presente trabajo en 4 capítulos, los cuales se distribuyen como sigue a continuación.

El capítulo 1 presenta un marco teórico que abarca desde la formación, características y sistemas de clasificación de los suelos residuales y un enfoque detallado de los suelos lateríticos desde su formación hasta su clasificación, se describe el procedimiento de preparación de muestras y algunos de los valores establecidos por diversos estudios de parámetros como gravedad específica y plasticidad.

En el capítulo 2 se presentan las aplicaciones o estudios realizados por algunos de los países del trópico a los suelos lateríticos, especialmente de Brasil, donde se describe la metodología de clasificación desarrollada, los diversos ensayos que se deben realizar para la caracterización y clasificación de suelos lateríticos y las aplicaciones de la metodología planteada en las estructuras del pavimento.

En el capítulo 3 se describen algunos de los estudios que se han realizado en Colombia a los suelos lateríticos y finalmente en el capítulo 4 se presentan las conclusiones y recomendaciones para la utilización de suelos lateríticos en nuestro país.

OBJETIVO GENERAL

Realizar un estado del arte que permita establecer la viabilidad de la utilización de suelos lateríticos como materiales en estructuras de pavimento en Colombia.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

1. Recopilar información relacionada con la caracterización y utilización de suelos lateríticos en bases de datos especializadas, libros, normas, artículos y demás bibliografía que proporcione información sobre el tema a tratar.
2. Identificar las características, comportamiento, técnicas y/o métodos empleados en los países tropicales, donde se encuentran suelos de comportamiento laterítico y se utilizan como material de subrasante, refuerzo de subrasante, base y subbase.
3. Plantear la utilización de los suelos lateríticos en Colombia para la construcción de estructuras de pavimentos, teniendo en cuenta las normativas vigentes en el país.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. SUELOS RESIDUALES

En el sentido general de la ingeniería, Das¹ define el suelo como una acumulación de agregado no cementado de granos minerales y materia orgánica descompuesta junto con el líquido y aire que ocupan los espacios vacíos entre las partículas sólidas, que presenta espesores altamente variables.

Las partículas minerales sólidas en los suelos varían ampliamente en tamaño, forma, composición mineralógica y características químicas de la superficie, esta porción sólida de la masa de suelo a menudo se denomina esqueleto del suelo y el patrón de disposición de las partículas individuales o agregaciones y las combinaciones de partículas dentro del esqueleto se denomina estructura del suelo, esta estructura tiene un profundo efecto en las propiedades físicas, fisicoquímicas y de ingeniería del suelo. Los suelos naturales se clasifican en suelos transportados y suelos residuales.

Según Berry y Reid², los suelos transportados han sido desplazados desde su posición original y depositados en otro sitio mediante la acción de agentes de transporte como el agua, el viento, el hielo y la gravedad, los cuales determinan la forma y el tamaño de las partículas en un depósito de suelo. Mientras que los suelos residuales son producto del ataque de los agentes del intemperismo que han permitido su formación completamente in situ y han permanecido en su posición original, esto ocurre mayormente en las regiones tropicales, un ejemplo de este tipo de suelo son las lateritas que se encuentran primordialmente en América del sur, África, India y Australia. En la Figura 2 se muestra los procesos de formación de suelos residuales y transportados.

La Figura 1 muestra la distribución global simplificada de los principales tipos de suelos residuales tropicales, estas clases amplias de suelos se extienden más allá de los trópicos en condiciones favorables que incluyen las costas orientales

¹ DAS, B. Fundamentos de ingeniería geotécnica. California: Sacramento. p.1.

² BERRY, P y REID, D. Origen y tipos de depósitos de suelos. En: Mecánica de suelos. p.7

continentales, subtropicales con alta precipitación (suelos ferralíticos), y las costas oeste/mediterránea y los interiores continentales en las latitudes medias (suelos fersialíticos). Las áreas en los trópicos que aparecen en gris incluyen aquellas donde los suelos residuales tropicales están cubiertos por depósitos recientes eólicos o aluviales.³

Figura 1. Distribución global de los principales tipos de suelos residuales.



Tomado de: Suelos residuales tropicales.

De acuerdo con las características del suelo residual, Suarez⁴ establece:

“Las características de los suelos residuales son muy diferentes a las de los suelos transportados. Por ejemplo, el concepto convencional de grano de suelo o tamaño de partícula es inaplicable a muchos suelos residuales, debido a que las partículas de suelo residual, con frecuencia, consisten en agregados “clusters” o cristales de mineral meteorizado que se rompen y se vuelven progresivamente finos, si el suelo es manipulado”.

³ Geological Society Professional Handbooks. Suelos residuales tropicales. London: The Geological Society. 1997. p. 21.

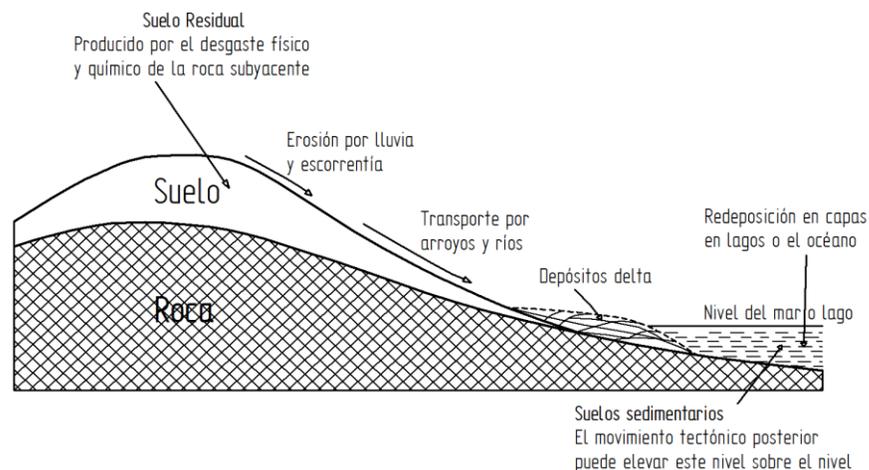
⁴ SUÁREZ, J. Capítulo 10: Suelos residuales. Deslizamientos. Tomo I: Análisis Geotécnico. Bucaramanga: Ingeniería de Suelos Ltda, 1998. p.390.

Según las interpretaciones dadas por la literatura, las dos diferencias importantes entre los suelos residuales y los sedimentarios son las siguientes⁵:

1. Los suelos sedimentarios se someten a un proceso de clasificación sistemático durante la erosión, transporte y deposición, las partículas más finas se separan de las partículas gruesas y se depositan en diferentes lugares o capas, por lo tanto, tienden a ser homogéneos. Por otro lado, los suelos residuales no se someten a estos procesos por lo que suelen ser mucho más heterogéneos.

2. En el suelo residual los conceptos de consolidación normal y sobreconsolidación no tienen ninguna importancia. El "estado virginal" de un suelo residual es la roca madre del que está formado.

Figura 2. Formación de suelos sedimentarios y suelos residuales.



Tomado de: Geotechnical Engineering in residual soils. (traducción propia)

⁵ WESLEY, L. Geotechnical Engineering in residual soils. Canada: John Wiley & Sons. Inc, 2010. p 3.

1.2. CARACTERÍSTICAS DE LOS SUELOS RESIDUALES

1.2.1 Estructura de los suelos residuales. El término de estructura de un suelo se utiliza específicamente para nombrar la forma en que las partículas están dispuestas para constituir el esqueleto del suelo. ⁶

Un suelo altamente estructurado es aquel en el que las partículas son dispuestas o incluso unidas entre sí de tal manera que el esqueleto tiene características muy diferentes a los de una simple colección de partículas individuales, a este tipo de estructura se le conoce como microestructura.

Muchos suelos residuales, son altamente microestructurados, pero algunos no son estrictamente particulados, a simple vista pueden parecer compuestos de partículas individuales, pero al remoldearse, estas partículas se desintegran para formar una colección de partículas mucho más pequeñas.

Según Vaughan y Kwan⁷ la estructura de los suelos residuales sufre cambios debido a:

1. Debilitación por la alteración producida y renovación del material, acompañado con la pérdida de masa, disminución de la resistencia al corte y rigidez con un aumento de la porosidad.
2. Unión por las precipitaciones de sales solubles y aumentando la masa, tensión y rigidez y reducción de la porosidad.
3. Incremento en el volumen a tensión efectiva constante.
4. Efectos no químicos generados por cambios en las tensiones efectivas derivadas de la desecación e hinchamiento que pueden ser cíclicos.

De acuerdo con Torres⁸ en los suelos residuales la estructura o microestructura dependen de las condiciones de su formación, bien sean los procesos de meteorización química que dan lugar a la formación de agentes cementantes, o aquellos de carácter físico como la erosión y el transporte que actúan como

⁶ WESLEY, L. Geotechnical Engineering in residual soils. Op.cit., p. 5.

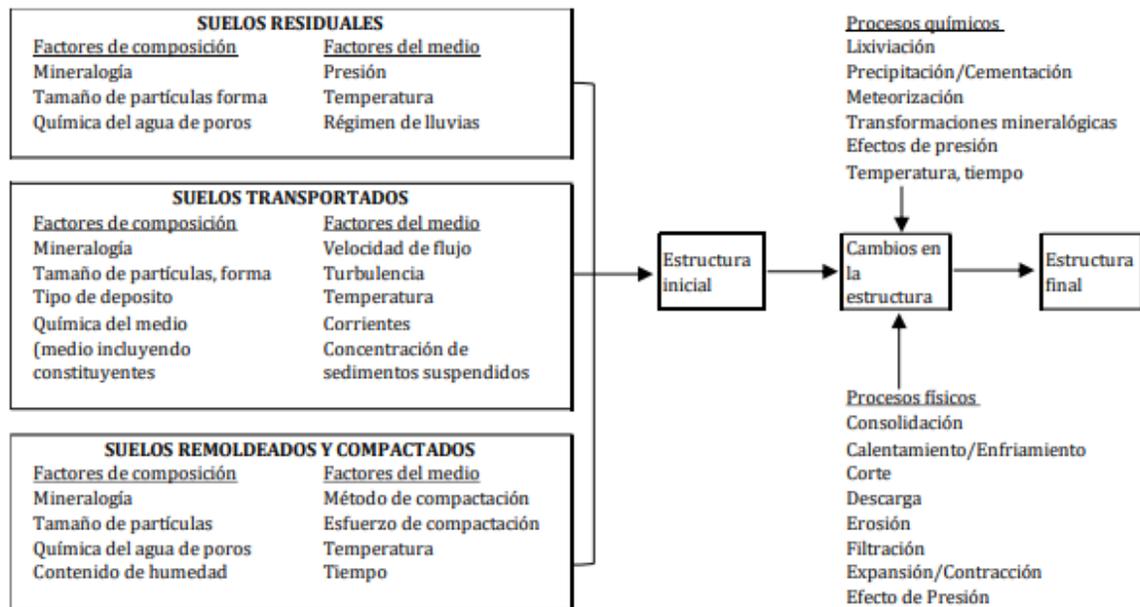
⁷ VAUGHAN y KWAN. Weathering, structure and in-situ stress in residual soil., citado por BOGADO, G y FRANCO, F. Propiedades geotécnicas de suelos residuales relevantes para su clasificación: estado actual de conocimiento., 2014. p.4.

⁸ TORRES, C. Influencia de la microestructura en la rigidez máxima de un perfil de suelo residual, en condiciones edométricas. Bogotá. 2017. p. 45.

procesos de carga y descarga sobre los materiales modificando las características de la misma.

Mitchell y Soga⁹ esquematizan en la Figura 3 los procesos antecedentes que determinan la estructura inicial de los suelos y todos aquellos que actúan posteriormente generando cambios en esta.

Figura 3. Factores y procesos que determinan las características de la estructura.



Tomado de: Influencia de la microestructura en la rigidez máxima de un perfil de suelo residual, en condiciones edométricas.

1.2.2 Minerales especiales de los suelos residuales. Los suelos residuales poseen un grupo de minerales muy inusuales de la arcilla, estos son alófono e imogolita, que se encuentran normalmente juntos, y un tercero llamado halloysita, que presenta alta plasticidad, sensibilidad en el secado y una mayor compresibilidad que los que poseen el mineral caolinita.¹⁰

⁹ MITCHELL Y SOGA. Fundamentals of soil Behavior, citado por TORRES, Carlos. Influencia de la microestructura en la rigidez máxima de un perfil de suelo residual, en condiciones edométricas. Bogotá. 2017. p. 46.

¹⁰ WESLEY, L. Geotechnical Engineering in residual soils. Op.cit., p. 7.

Las propiedades extremadamente inusuales de los suelos que contienen estos minerales, especialmente el alófono, son una fuente de considerable complejidad para los ingenieros.

Comúnmente los suelos jóvenes, contienen gran parte de los minerales de la roca madre, por el contrario, los suelos maduros, no poseen los minerales primarios sino secundarios producidos por el grado de intemperismo. Lumb¹¹ indicó que la relación de minerales primarios residuales y minerales secundarios puede ser una característica importante para la clasificación de los suelos residuales y se puede llegar a indicar el proceso de descomposición que tiene la roca.

1.2.3 Influencia de la topografía. La topografía tiene una influencia fuerte y bastante consistente en el proceso de meteorización y esto sobre el tipo de minerales arcillosos formados, especialmente en los trópicos húmedos.¹²

En áreas anchas y planas, el drenaje es muy limitado, el agua se pierde durante los períodos secos de la evaporación y el suelo toma humedad otra vez durante los períodos de precipitación. Este ambiente tiende a producir montmorillonita y minerales arcillosos de alta actividad, los suelos que contienen estos minerales normalmente tienen propiedades geotécnicas pobres o altamente indeseables.

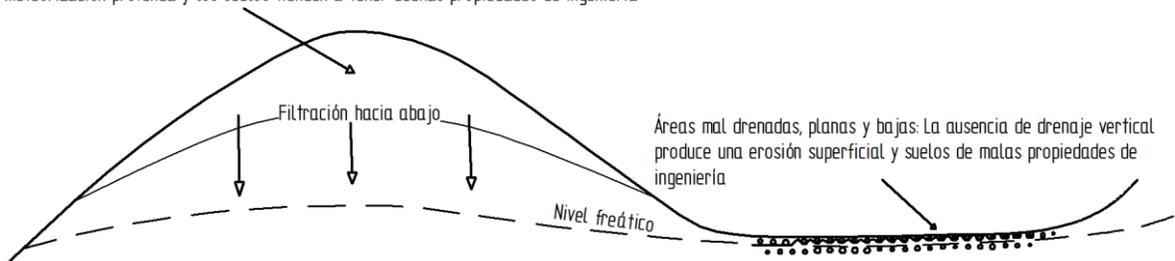
En áreas montañosas, el suelo está bien drenado y el flujo de filtración tiene un fuerte componente descendente, lo que conduce a la formación de minerales arcillosos de baja actividad, especialmente caolinita, mientras que, en las zonas volcánicas, los minerales alófono y halloysita se pueden formar antes de terminar como caolinita. Los suelos que contienen estos minerales generalmente tienen buenas propiedades de ingeniería.

¹¹ LUMB. Engineering properties of fresh and decomposed igneous rocks from Hong Kong. Engenery Geology., citado por BOGADO, G y FRANCO, F. Propiedades geotécnicas de suelos residuales relevantes para su clasificación: estado actual de conocimiento., 2014. p.5.

¹² WESLEY, L. Geotechnical Engineering in residual soils. Op.cit.,. p. 8.

Figura 4. Influencia de la topografía en la formación de suelos residuales.

Áreas montañosas y montañas bien drenadas: Las filtraciones hacia abajo producen una meteorización profunda y los suelos tienden a tener buenas propiedades de ingeniería



Tomado de: Geotechnical Engineering in residual soils. (traducción propia).

En ambientes tropicales dominados por temperaturas altas y variables y por lluvias abundantes, la meteorización de los materiales es muy fuerte, y se caracteriza por la descomposición rápida de feldespatos y minerales ferromagnesianos, la concentración de óxidos de hierro y aluminio y la remoción de sílice y de las bases Na_2O , K_2O , CaO y MgO .

Los feldespatos se meteorizan inicialmente a caolinita, óxidos de hierro y óxidos de aluminio y los compuestos más resistentes como las partículas de mica y cuarzo permanecen. La presencia de hierro en el suelo generalmente está relacionada con los niveles freáticos o las zonas de humedad, la laterización se define como la etapa final del proceso de meteorización con la formación de sesquióxidos de hierro y de aluminio.

1.3. SISTEMAS DE CLASIFICACIÓN PARA SUELOS RESIDUALES

Los métodos actualmente utilizados para agrupar o clasificar los suelos residuales se dividen en tres tipos¹³:

1.3.1 Métodos basados en la clasificación pedológica. Se ha hecho uso de varios términos para designar los diferentes grupos de suelos por diferentes

¹³ INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE. Identificación, comportamiento y utilización de suelos residuales. Primera fase. 1996. 10-20 p.

países. A continuación, se presenta la Tabla 1, que muestra la variedad de nombres utilizados por tres sistemas pedológicos: el francés, la FAO y el de los Estados Unidos, también muestra los minerales de arcilla predominantes asociados a cada grupo, y sugiere que la composición mineralógica es una fuerte influencia en las propiedades de cada grupo.

Tabla 1. Pedología de suelos residuales de interés en la ingeniería geotécnica.

Nombres comúnmente usados	Nombres rigurosamente pedológicos			Minerales dominantes de arcilla	Característica importante
	FAO	US taxonomía	Francés		
Suelo laterítico latosol y arcilla roja	Ferrasol	Oxisol	Suelos ferralíticos	Halloysita Caolinita Gibbsita Geotita	Grupos grandes con variación en características
Cenizas volcánicas Andosol	Andosol	Andepts	Suelo café Eutrópico de regiones tropicales sobre cenizas volcánicas	Alófano menor Halloysita	Caracterizado por alto contenido de agua e irreversibles cambios después de secado
Suelo Black Cotton Arcilla negra Tierra negra Grumu suelos	Vertisol	Vertisol	Vertisol	Esmectita Montmorillonita	Suelos problemáticos de alta contracción y expansión. Baja resistencia

Tomado de: Identificación, comportamiento y utilización de suelos residuales, primera fase.

1.3.2 Métodos destinados al uso local en tipos de suelo específicos.

Debido a la complejidad de los suelos residuales, y la falta casi total de características comunes entre algunos grupos de estos, se han desarrollado métodos descriptivos o de clasificación para uso local en formaciones particulares. De los cuales se han derivado diferentes sistemas de clasificación que permiten evaluar cada tipo de suelo de acuerdo con sus méritos.

1.3.3 Sistema de agrupación basado en la mineralogía y la estructura.

La composición incluye el tamaño de partícula, la forma, y especialmente la composición mineralógica, mientras que la estructura incluye la macroestructura y la microestructura. Un primer paso útil en la agrupación de los suelos residuales es dividirlos en grupos sobre la base de la composición solamente, sin referencia a su estado no perturbado. Se sugieren los siguientes grupos:

1. Grupo A: suelos sin una fuerte influencia mineralógica

Se puede identificar un grupo de suelos en los cuales no influye fuertemente la presencia de determinados minerales de arcilla, de los cuales se puede esperar que tengan similares propiedades. En raras ocasiones, la capa superior (la capa del suelo) puede ser suficientemente avanzada en la intemperie para convertirse en una verdadera arcilla con propiedades fuertemente influenciadas por los minerales distintivos de esta. Estructuralmente el grupo A puede subdividirse en:

Subgrupo (a): suelos en los que la macroestructura desempeña un papel importante en el comportamiento de la ingeniería del suelo.

Subgrupo (b): suelos sin macroestructura, pero con una fuerte influencia de la microestructura, en donde es importante la unión entre partículas o cementación.

Subgrupo (c): los suelos que no están muy influenciados por los efectos macro o microestructurales.

2. Grupo B: suelos residuales fuertemente influenciados por los minerales convencionales de arcilla.

El miembro más significativo de este grupo es el grupo de suelo de arcilla negra o vertisoles, cuyas características son alto potencial del encogimiento y de inflamación, alta compresibilidad y poca resistencia, que se pueden dar debido a la presencia de montmorillonita.

3. Grupo C: suelos residuales fuertemente influenciados por minerales arcillosos especiales no encontrados en suelos sedimentarios.

Como se había mencionado anteriormente, los dos minerales más importantes son los minerales de arcilla de silicato halloysita y alófano, y los minerales asociados conocidos como sesquióxidos.

Es conveniente subdividir este grupo en tres subgrupos:

a. Suelos halloysita: presentan propiedades de ingeniería buenas, a pesar de una fracción de arcilla alta, tamaño de partícula muy pequeño y valores altos de

contenido de agua natural y límites de Atterberg, propiedades que se relacionan directamente de su composición mineralógica, o en algunos casos de la cementación derivada de la presencia de sesquióxidos.

b. Suelos alófono: la influencia del alófono resulta en suelos que tienen contenidos de agua que oscilan entre 80 y 250 por ciento, pero que todavía funcionan muy satisfactoriamente como materiales de ingeniería.

c. Suelos influidos por la presencia de sesquióxidos: los sesquióxidos trabajan como agentes cementantes que unen a los otros componentes minerales en conglomerados o agregados. Con la suficiente concentración de sesquióxidos se forman los materiales concrecionados duros comúnmente conocidos como lateritas. La relación sílice/alúmina SiO_2/Al_2O_3 y la relación sílice/sesquióxido se han utilizado como indicadores de grado de meteorización.

Este subgrupo tal vez podría ser llamado el grupo laterítico, pero el término laterita se utiliza generalmente muy libremente, a veces para incluir las arcillas halloysita y alófono cuyo comportamiento no está influenciado significativamente por los sesquióxidos.

Tabla 2. Agrupamiento de suelos residuales con propiedades ingenieriles similares.

DIVISIÓN MAYOR	SUB-GRUPOS	COMENTARIOS
GRUPO A Suelos sin influencia mineralógica importante	a) Fuerte influencia de la macro-estructura	La naturaleza de la macro-estructura necesita definición Estratigrafía, fracturas, fisuras, vacíos, etc
	b) Fuerte influencia de la micro-estructura	El remoldeo tiene influencia fuerte sobre su comportamiento La sensibilidad podría ser un indicador directo
	c) Pequeña o nula influencia	Probablemente es un subgrupo menor
GRUPO B Suelos influenciados fuertemente por minerales de arcilla convencionales	a) Esmectita grupo de las montmorillonitas	Suelos problemáticos, caracterizados por su baja deformación, alta compresibilidad, alta contracción, expansión
	b) Otros minerales	??
GRUPO C Suelos fuertemente influidos por minerales de arcilla encontrados sólo en suelo residual	a) Halloysita	Suelos de baja actividad y buenas propiedades ingenieriles
	b) Alófono	Baja actividad, buenas propiedades ingenieriles, altos contenidos de agua e irreversibles cambios sobre el secado
	c) Sesquióxido (Laterítico)	Grupo extremadamente variable, en los rangos de limo, arcilla y grava

?? No se conoce información por parte del autor en el libro.

Tomado de: Identificación, comportamiento y utilización de suelos residuales, primera fase.

1.4. SUELOS LATERÍTICOS

Los suelos lateríticos presentan como características genéticas principales una constitución mineralógica o microestructura de apariencia homogénea e isotrópica, elevada resistencia a la erosión, alta contracción, buena adhesividad a los materiales bituminosos, pero también presentan mucha porosidad, alta permeabilidad, poca expansión y baja plasticidad.

1.4.1 Proceso pedogenético de clima tropical y laterización. Los procesos de intemperización y laterización tropical comprenden básicamente la alteración y/o transformación química y fisicoquímica de los minerales formadores de rocas primarias en materiales ricos principalmente en minerales de arcilla reticulada y los constituyentes de las lateritas (*Fe, Al, Ti y Mn*)¹⁴. Este proceso se puede dividir en tres etapas:

(a) Primera etapa - Descomposición: según Loughnan¹⁵, se caracteriza por la descomposición fisicoquímica de minerales primarios y la liberación de elementos constituyentes (*SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO, MgO, K₂O, Na₂O*, etc.) que aparecen en formas iónicas simples.

(b) La segunda etapa - Laterización: según Pickering y Loughnan¹⁶, incluye la lixiviación bajo condiciones apropiadas de drenaje de sílice y bases combinadas y la acumulación relativa o enriquecimiento de fuentes externas de óxidos e hidróxidos de sesquióxidos (principalmente *Al₂O₃, Fe₂O₃ y TiO₂*). Las condiciones del suelo bajo las cuales los diversos elementos se vuelven solubles y se eliminan mediante lixiviación o combinación con otras sustancias parecen depender principalmente del pH del agua subterránea y las condiciones de drenaje. En la Figura 5 se puede observar la formación de suelos lateríticos que corresponden a suelos superficiales típicos de las partes bien drenadas, así como también de la formación de suelos no lateríticos o saprolíticos resultado de la etapa de descomposición.

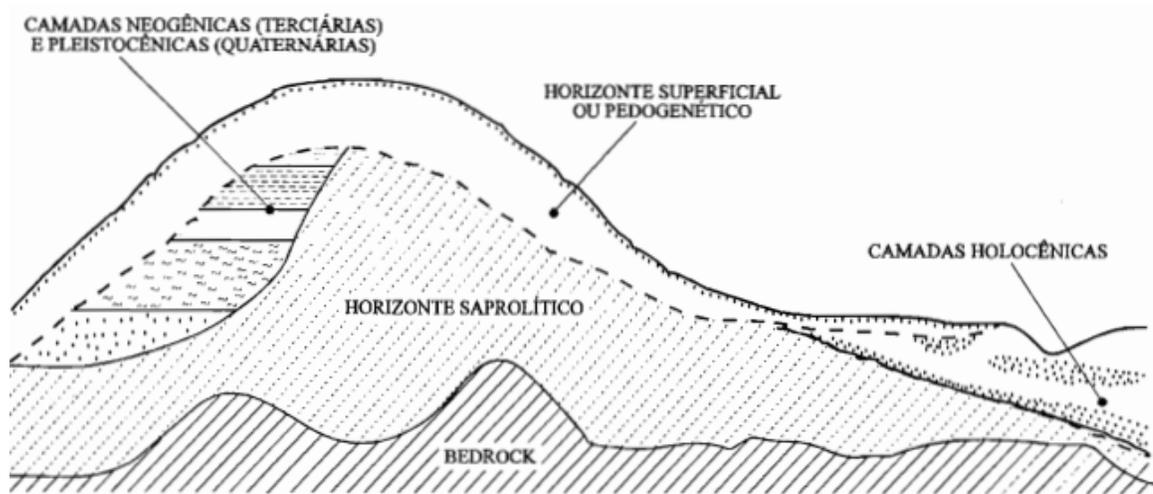
¹⁴ GIDIGASU, M. Laterite soil engineering, Pedogenesis and engineering principles. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company, 1976. p.35.

¹⁵ LOUGHNAN, K. Chemical weathering of the silicate minerals, citado por GIDIGASU, M. Laterite soil engineering, Pedogenesis and engineering principles. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company, 1976. p.35.

¹⁶ PICKERING, R.L. Some leaching experiments on three quartz-free silicate rocks and their contribution to an understanding of laterization, citado por GIDIGASU, M. Laterite soil engineering, Pedogenesis and engineering principles. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company, 1976. p.35.

A propósito Mohr y Van Baren¹⁷ dicen que el desarrollo de la segunda etapa depende de la naturaleza y la extensión de la meteorización química de los minerales primarios, donde el clima tiene un doble efecto en el suelo, por una parte tiene una influencia directa en la descomposición, lixiviación y el desarrollo del suelo, y por otra tiene efectos indirectos en los suelos a través de su influencia en la naturaleza de la vegetación.

Figura 5. Perfil esquemático de la presencia de suelos lateríticos y no lateríticos.



Tomado de: Considerações sobre solos tropicais e conceito de pavimentos de Baixo custo

La ocurrencia de los suelos residuales se caracteriza por lo siguiente:

1. Gran espesor del horizonte superficial (laterítico).
2. Gran espesor del horizonte saprolítico.
3. Presencia frecuente de suelos transportados Cenozoicos más antiguos que el Holoceno, de origen fluvial o fluviolacustre.

¹⁷ MORH E.C.J and VAN BAREN, F.A. Tropical soils, citado por GIDIGASU, M. Laterite soil engineering, Pedogenesis and engineering principles. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company, 1976. p.35.

(c) La tercera etapa - deshidratación o desecación: para Hamilton¹⁸, implica la deshidratación parcial o completa (a veces con endurecimiento) de los materiales ricos en sesquióxido y minerales secundarios. La deshidratación de los óxidos de hierro coloidal hidratados implica la pérdida de agua y la concentración y cristalización de los coloides amorfos de hierro en minerales de hierro cristalinos densos en la secuencia: limonita, goetita y goetita con hematita a hematita.

1.4.2 Laterita. La laterita es un material que se forma bajo sistemas de intemperización productivos del proceso de laterización; la composición química y las características morfológicas de este material están influenciados por el grado de meteorización al que se ha sometido el material original, son suelos cuyas características más importantes son la descomposición de los minerales de silicato de hierro-aluminio y la deposición permanente de sesquióxidos dentro del perfil, contiene óxidos secundarios de hierro y/o aluminio en abundancia y un contenido mínimo de bases y silicatos primarios, Alexander y Cady¹⁹ definen como otra característica la dureza y la capacidad de adquirirla cuando es sometida a ciclos de humedecimiento y secado como los que se producen en el trópico.

Los suelos lateríticos constituyen un horizonte superficial de origen esencialmente pedogenético recubriendo normalmente áreas bien drenadas y formando estratos con límites graduales poco perceptibles. De acuerdo con lo anterior, un suelo es considerado laterítico si pertenece a los horizontes A y B de un perfil bien drenado desarrollado en un clima húmedo y si su fracción arcillosa está constituida esencialmente por minerales del grupo de las caolinitas y de óxidos hidratados de hierro o aluminio.

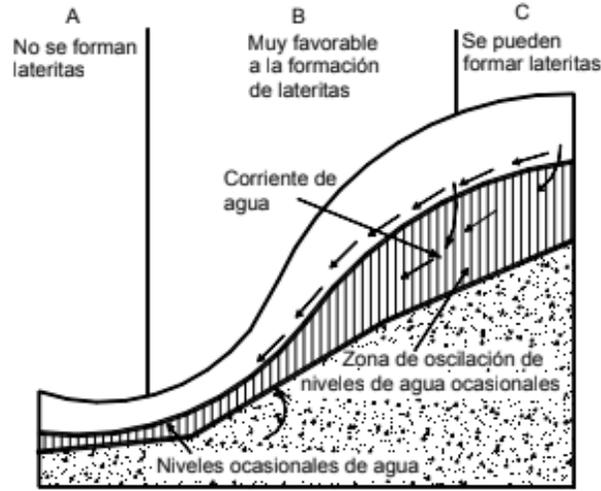
Según menciona Suárez²⁰, el movimiento cíclico de los niveles de agua conduce a la acumulación de óxidos de hierro formando una capa de suelos cementados, generalmente semipermeables, como se muestra en la figura 6. Estos materiales se van endureciendo en presencia del aire, formando suelos lateríticos, los cuales poseen una gradación que puede ir desde las gravas a las arcillas y una plasticidad de baja a intermedia.

¹⁸ HAMILTON, R. Microscopic studies of laterite formation, citado por GIDIGASU, M. Laterite soil engineering, Pedogenesis and engineering principles. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company, 1976. p.35.

¹⁹ LYLE, A and CADY, J. Genesis and hardening of laterite in soils. Washington: United states department of agriculture. 1962. p.8.

²⁰ SUÁREZ, J. Capítulo 10: Suelos residuales. Deslizamientos. Tomo I: Análisis Geotécnico. Op.cit.,. p.425.

Figura 6. Formación de lateritas por corrientes de agua ocasionales.



Tomado de: Deslizamientos. Tomo I: Análisis Geotécnico.

Los suelos lateríticos se caracterizan por tener un alto contenido de Aluminio, Hierro, Manganeso y Titanio en relación con otros constituyentes; en cuanto al contenido de sesquióxidos se han planteado distintas teorías que pretenden explicar la acumulación de estos, entre ellas, la teoría propuesta por Van Ganse²¹ que sugiere la "acumulación relativa" de sesquióxidos como resultado de la pérdida progresiva de bases y sílice soluble en agua alcalina, dejando caolinita insoluble, cuarzo y óxidos de hierro y aluminio. El agua alcalina que se filtra deja un esqueleto que consiste principalmente de óxidos de hierro y aluminio, así como cuarzo, caolinita y tal vez titanio y manganeso.

La acumulación relativa de sesquióxidos es, por lo tanto, acompañada por la reducción del volumen del suelo; otro ejemplo es la teoría propuesta por Hamilton²² de "acumulación absoluta", donde atribuye la formación de estos suelos a la precipitación sobre el suelo del hidróxido de hierro a través de la acción del agua ácida en la que son solubles.

Los suelos de laterita pueden ser de variados materiales de roca madre, como granitos, granulitas, gneises, esquistos, filitas y cenizas volcánicas. También se han observado suelos lateríticos en lutitas, areniscas, caliza y otras rocas

²¹ VAN GANSE, R. Propriétés et applications des latérites au Congo Belge, citado por GIDIGASU, M. Laterite soil engineering, Pedogenesis and engineering principles. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company, 1976. p.57.

²² HAMILTON, R. Microscopic studies of laterite formation, Op.cit., p.58.

sedimentarias. Independientemente del material de la fuente en la que se desarrollen los suelos de laterita es esencial un suministro adecuado de sesquióxidos.

1.4.3 Condiciones climáticas. El clima es fundamental para los procesos fisicoquímicos y químicos que conllevan a la formación de lateritas, la alta temperatura y la lluvia se encargan de causar en las rocas erosión química y lixiviación, además que influyen en la vegetación y la actividad bacteriana en el suelo.²³ El aumento de las temperaturas crea una mayor evaporación, lo que tiende a retardar la meteorización química.

La formación de lateritas en este medio se puede evidenciar en estudios realizados, como por ejemplo Crowther²⁴, quien ha demostrado que la relación SiO_2/Al_2O_3 aumenta a medida que la temperatura aumenta cuando la humedad es constante; para Maignien²⁵ los suelos de laterita más actuales se desarrollan a temperaturas medias anuales de unos 25 °C, sin embargo, se pudo observar también que a temperaturas entre 18 y -20 °C en el altiplano de Madagascar los perfiles de laterita son extremadamente profundos y Denisoff²⁶ ha observado materiales de laterita a temperaturas de 16 °C a una altitud de casi 2.000 m en Ruanda, Burundi.

De acuerdo con Gigidasu²⁷, la mayoría de los estudios sobre el efecto de la precipitación en la formación de laterita se basaron en la relación entre la precipitación y la relación SiO_2 / Al_2O_3 , de estos estudios resultaron tres conclusiones contradictorias; la primera define una correlación negativa entre la precipitación y la relación SiO_2 / Al_2O_3 como se evidencia en la Tabla 3, donde se concluye que no es tanto la lluvia total que rige la tasa de meteorización y la naturaleza de los minerales acumulados en los suelos de laterita sino la proporción de la lluvia total que realmente se infiltra en la zona de intemperización,

²³ GIDIGASU, M. Laterite soil engineering, Pedogenesis and engineering principles. Op.cit. p. 76.

²⁴ CROWTHER. The relationship of climatic and geological factors to the composition of soil clay and the distribution of soil types, citado por GIDIGASU, M. Laterite soil engineering, Pedogenesis and engineering principles. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company, 1976. p.76.

²⁵ MAIGNIEN. Review of research on laterites, citado por GIDIGASU, M. Laterite soil engineering, Pedogenesis and engineering principles. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company, 1976. p.76.

²⁶ DENISOFF. Le concept de la zonalité vertical appliqué a quelques sols caractéristique du Ruanda-Urundi, citado por GIDIGASU, M. Laterite soil engineering, Pedogenesis and engineering principles. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company, 1976. p.76.

²⁷ GIDIGASU, M. Laterite soil engineering, Pedogenesis and engineering principles. Op.cit. p. 78.

un ejemplo de esto es el estudio realizado por Sherman²⁸ donde encontró que en el desarrollo de suelos de laterita sobre basaltos en las Islas Hawaianas el factor controlador no es tanto la precipitación total sino su distribución, como se muestra en la Figura 7 y cuando existe un período seco definido, los productos finales de laterización se enriquecen considerablemente en óxido férrico y titanio, mientras que en ausencia de un período seco, la alúmina es el constituyente dominante del horizonte superficial; la segunda indica ninguna correlación entre la precipitación y SiO_2 / Al_2O_3 como se evidencia en la Tabla 4 y la tercera una correlación positiva entre la precipitación y la relación SiO_2 / Al_2O_3 , mostrado en la Tabla 4.

Según con estudios realizados por varios autores, la vegetación también juega un papel importante en la formación de suelos de laterita, según los resultados de sus investigaciones, se concluye que los suelos de laterita se forman en áreas cubiertas de vegetación que van del bosque lluvioso a la sabana boscosa y a la sabana de pastizales secos.

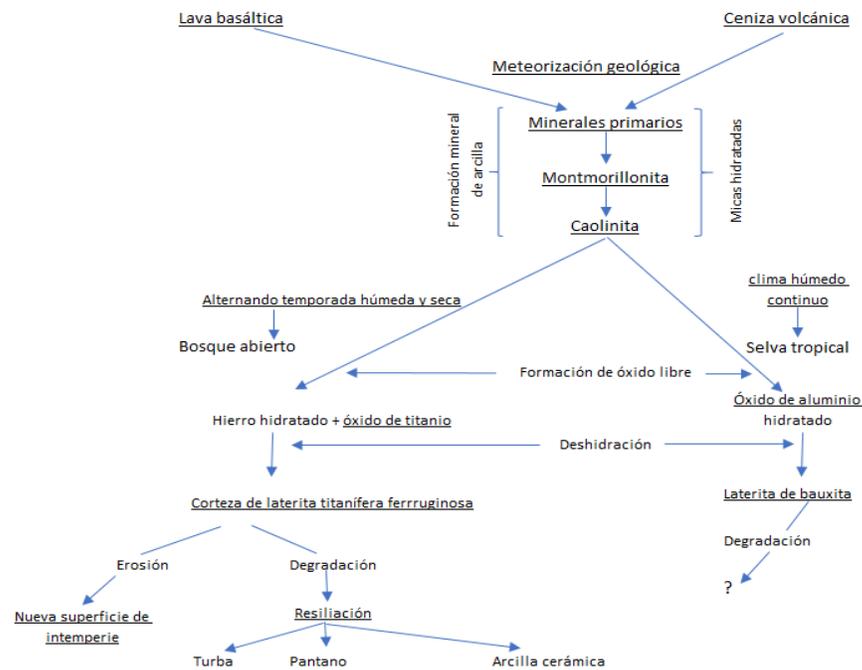
Tabla 3. Relación entre la lluvia y la relación Sílice-Alúmina de las fracciones de arcilla de algunos suelos tropicales (Prescott y Pendenton, 1952)

ZONA	Lluvia anual (en pulgadas)	Sílice/alúmina Proporción de arcilla (promedio)
Africa:		
Sudán	<25	3.65
Costa Dorada		
Gambia	25-50	2.39
Nigeria		
Costa Dorada		
Congo Belga	50-80	2.07
Nigeria		
Sierra Leona		
Guayana Francesa	>80	1.55
Camerún		
Australia oriental- suelos basálticos		
Gunnedah	23	3.63
Bathurst	24	2.56
Crookwell	33	3.04
Toowoomba	37	2.24
Childers	42	1.98
Bundaberg	43	1.99
Wollongbar	64	1.17
Coolangatta	73	1.80

Tomado de: Laterite Soil Engineering, Pedogenesis and Engineering Principles.

²⁸ SHERMAN. Factors influencing the development of lateritic and laterite soils in the Hawaiian Islands y The genesis and morphology of the alumina-rich laterite clays, citado por GIDIGASU, M. Laterite soil engineering, Pedogenesis and engineering principles. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company, 1976. p.79.

Figura 7. Secuencia de meteorización de lavas basálticas en las islas Hawaianas en relación con los entornos de intemperismo. Sherman (1952)



Tomado de: Laterite Soil Engineering, Pedogenesis and Engineering Principles.

Tabla 4. Relación entre la precipitación y la relación de sesquióxido de sílice ($SiO_2 / Al_2O_3 + Fe_2O_3$) de la fracción de arcilla de algunos suelos de laterita Nigeriana (Vine, 1949)

Localidad	Color	Precipitación anual (mm)	$SiO_2:Al_2O_3$	$SiO_2:R_2O_3$
Estación de investigación Oil Palm (Cerca de Benin)	Rojo	1750	1.94	1.62
Ahiara (cerca de Owerri)	Rojo brillante	2125	1.96	1.65
Aba	Naranja-amarillo	2375	1.98	1.72
Calabar	Amarillo	3250	1.97	1.71

$R_2O_3: Al_2O_3 + Fe_2O_3$

Tomado de: Laterite Soil Engineering, Pedogenesis and Engineering Principles. 1976.

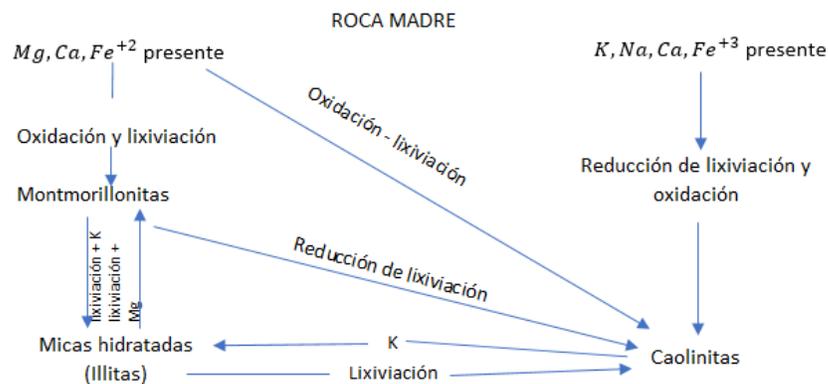
1.4.4 Minerales de arcilla en suelos de laterita. Según estudios (Frederickson, 1952; Sherman, 1952; Mohr y Van Baren, 1954; Loughnan, 1969) sugieren que además de la temperatura, la presión y el entorno de composición, otros factores como ácidos orgánicos y otros ácidos, pH, la presencia de bacterias

y otros organismos, disponibilidad o ausencia de oxígeno, agua y diversos cationes son determinantes en el crecimiento de muchos minerales de coloides bajo las mismas condiciones de presión y temperatura.²⁹

Los minerales de arcilla presentes en suelos de lateritas se desarrollan en condiciones que favorecen la formación de los tres principales grupos de minerales arcillosos, y corresponden a la caolinita que se desarrolla característicamente en un ambiente ácido a menudo producido por ácidos orgánicos o la oxidación de minerales sulfurosos y en cualquier condición que elimine efectivamente las bases del sistema de intemperismo.

Los minerales de montmorillonita se desarrollan bajo una amplia gama de condiciones en presencia de magnesio y, en menor medida, en presencia de otros álcalis y tierras alcalinas; el hierro en estos minerales generalmente se encuentra en estado férrico y los illitas que se cree que constituyen el 20% del contenido de mica de los sedimentos de la tierra. En la Figura 8 se muestra un resumen de la formación de estos tres grupos.

Figura 8. Formación de arcilla bajo diversas condiciones de intemperie. (Frederickson, 1952)



Tomado de: Laterite Soil Engineering, Pedogenesis and Engineering Principles.

En cuanto a los óxidos e hidróxidos, de un estudio realizado por Loughnan³⁰ se concluye que solo cuatro cationes de silicato " Si^{4+} ", " Al^{3+} ", " Fe^{3+} " y " Fe^{2+} " parecen formar óxidos o hidróxidos estables o ambos en el ambiente de

²⁹ GIDIGASU, M. Laterite soil engineering, Pedogenesis and engineering principles. Op.cit. p. 89.

³⁰ LOUGHNAN, K. Chemical weathering of the silicate minerals. Op.cit., p.90.

intemperismo, los tres grupos importantes de estas formas de minerales secundarios en los suelos de laterita son los hidróxidos de aluminio, óxidos e hidróxidos de hierro y óxidos de titanio.

Los minerales secundarios de los suelos de laterita como la caolinita, halloysita, illita y montmorillonita se desarrollan en zonas donde el clima, la topografía y la vegetación tienen mayor influencia en la zona de alteración, el estado de los suelos de laterita es función de las condiciones de meteorización³¹, en la Tabla 5 se puede evidenciar la mineralogía de los suelos tropicales típicos en relación con la roca madre y las condiciones climáticas.

Tabla 5. Mineralogía de los suelos tropicales típicos en relación con la roca madre y las condiciones climáticas. (Morin y Parry, 1969)

Localización	Roca parental	Minerales de arcilla	Minerales accesorios de la arcilla	Precipitación media anual	Época de lluvias	Drenaje	Rango en temperatura media
<i>Ghana</i>							
Kumasi	Granito	Caolinita	-	55	2	bueno	
Bompata	Anfibolita	Caolinita	-	65	2	Regular-bueno	66.6 - 100 en Kumasi
Nkawkaw	Metamórficas Volcánicas	Caolinita	-	70	2	Regular-bueno	en Kumasi
Kumasi	Filita	Caolinita	Montmorillonita	55	2	Regular-bueno	66.6 - 10 0
<i>Ethiopia</i>							
Injabara	Basalto	-	-	-	2	Regular-bueno	-36
Bhar Dar	Basalto	Halloysita	-	60 (1966)	2	Regular-bueno	36 - 87 (1966)
Soddu	Traquita	Caolinita	Montmorillonita		2	bueno	51 - 81
Lekempti	Basalto	Caolinita	Montmorillonita	90 (1966)	2	bueno	48
Addis Ababa	Basalto	Caolinita	Montmorillonita	49 (1966)	2	Regular-bueno	40 - 81
<i>Kenya</i>							
Sasumua	Tobas soldadas	Halloysita	Goethita, Gibbsita, Caolinita	53	2	bueno	58 - 80

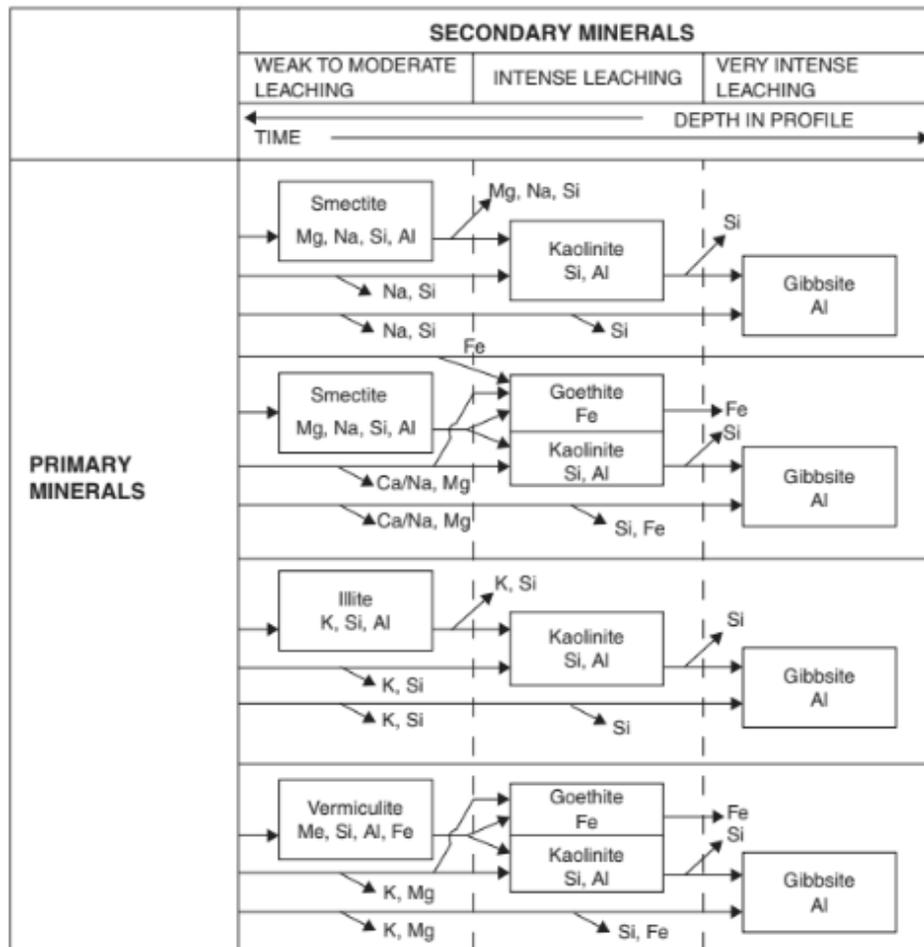
Tomado de: Laterite Soil Engineering, Pedogenesis and Engineering Principles. 1976.

La Tabla 6 muestra la secuencia de alteración con respecto a la lluvia y la posterior lixiviación que muestra el desarrollo progresivo de diferentes arcillas y óxidos. El ambiente cálido y húmedo acelera la disolución química de los minerales de silicato formadores de roca, la formación de nuevas especies minerales residuales y la descomposición de la materia orgánica. Los iones

³¹ GIDIGASU, M. Laterite soil engineering, Pedogenesis and engineering principles. Op.cit. p. 131.

solubles se desplazan por lixiviación, en general, las bases (K, Na, Ca, Mg) y el sílice se lixivian en solución para redepositarse más abajo en el perfil del suelo, mientras que el Fe y Al permanecen insolubles ya que la descomposición tiene lugar en condiciones casi neutrales, esto da como resultado productos de degradación como minerales arcillosos (caolinita, esmectita, illita, montmorillonita), otros filosilicatos (mica, clorita y moscovita) y la acumulación de materiales residuales como óxidos, hidróxidos y sílice libre.³²

Tabla 6. Tipos de minerales arcillosos e intensidad de lixiviación.



Tomado de: Tropical residual soils in engineering.

³² BUJANG, B, TOLL, D y PRASAD, A. Handbook of Tropical Residual Soils Engineering. 2013. p. 65.

De acuerdo a las características de los minerales secundarios dadas por Gidigasú³³:

Los minerales de arcilla del grupo de las caolinitas están formados por la combinación de una lámina de sílice tetraédrica y una lámina de alúmina octaédrica, que se apilan unas sobre otras, uniéndose mediante enlaces de hidrógeno, estos apilamientos pueden distinguirse como ordenadas, parcialmente ordenadas o desordenadas dependiendo del grado de perfección, nitidez y características de su patrón de rayos X. Las caolinitas forman arcillas muy estables debido a que su estructura resiste la introducción de agua a sus redes generando un efecto desestabilizador, además cuando están húmedas son moderadamente plásticas lo que le permite tener un coeficiente de fricción interna mayor.

La halloysita hace parte del grupo de los minerales de caolinita y existe en dos estados de hidratación, estas son la halloysita hidratada (forma totalmente hidratada) que tiene una estructura similar a la caolinita desordenada que incluye una lámina de moléculas de agua, la deshidratación de esta forma se denomina metahalloysita.

El grupo de la illita incluye las micas de las rocas ígneas y metamórficas, este grupo es común en suelos donde la lixiviación no ha sido excesiva, está compuesta de una lámina de arena octaédrica entre dos láminas tetraédricas las cuales están separadas por iones de potasio.

Los minerales del grupo de las montmorillonitas están compuestos de láminas octaédricas de alúmina que se encuentran entre dos láminas tetraédricas de sílice que se unen de forma débil produciendo que el mineral sea inestable, especialmente en presencia de agua, el agua que entra se acomoda entre las láminas generando hinchazón o expansión del mineral.

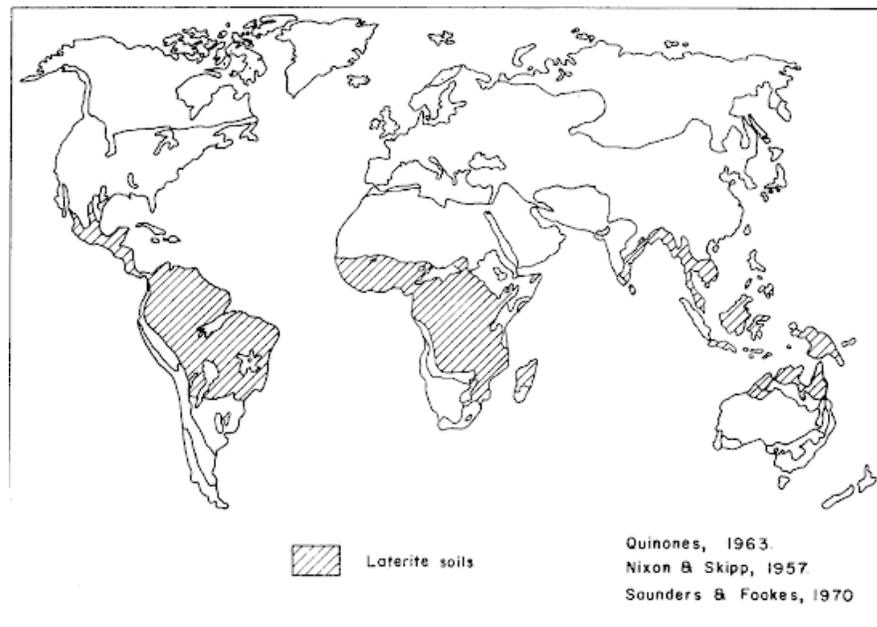
1.4.5 Localización de suelos de laterita. Los materiales de laterita se distribuyen y localizan en zonas donde las condiciones de temperatura y precipitación son altas, de acuerdo con Persons³⁴ estas se caracterizan en la

³³ GIDIGASU, M. Laterite soil engineering, Pedogenesis and engineering principles. Op.cit. p. 132-136.

³⁴ PERSONS, Laterite: genesis, location, use, citado por GIDIGASU, M. Laterite soil engineering, Pedogenesis and engineering principles. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company, 1976. p.97.

superficie terrestre entre las latitudes 35° N y 35° S, conocida como zona intertropical, que es una franja del planeta localizada entre el trópico de Cáncer, de acuerdo a Pérez³⁵ el clima en esta zona del planeta se debe a que la incidencia de los rayos solares es casi perpendicular a esta región durante todo el año, por lo que la temperatura y humedad relativa son elevadas; la Figura 9 muestra áreas conocidas de laterita y áreas donde se puede esperar que suceda un proceso de laterización.

Figura 9. Mapa mundial generalizado que muestra la distribución general de los suelos de laterita.



Tomado de: Laterite Soil Engineering, Pedogenesis and Engineering Principles.

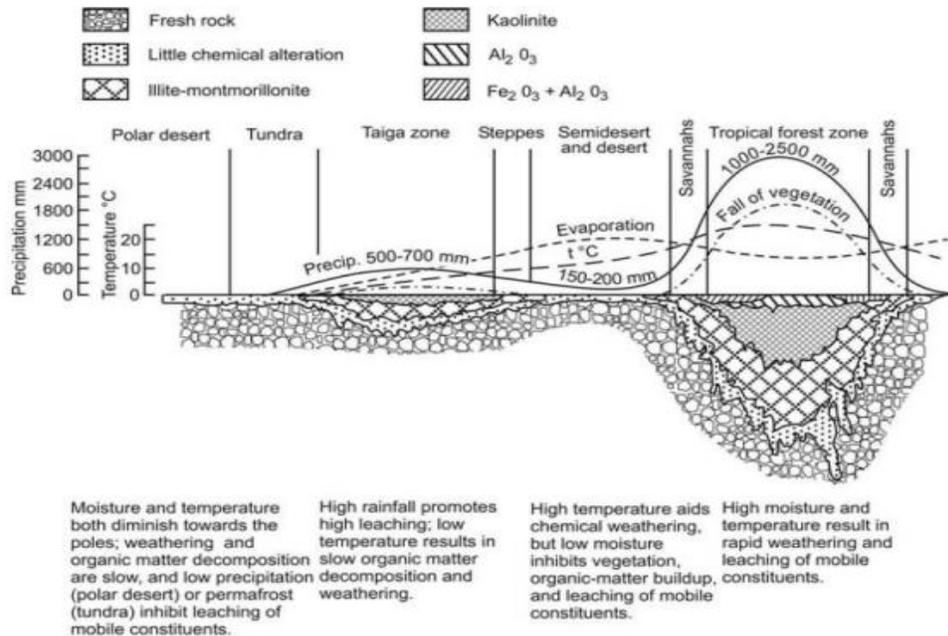
Según las condiciones climáticas del sitio y la profundidad del subsuelo, en la zona tropical se presentan diferentes tipos de suelo. En el clima tropical la descomposición de la roca es intensa y el espesor de suelo se desarrolla hasta gran profundidad, dada la abundante lluvia, la acción de la vegetación, la alta temperatura y la humedad relativa, por lo que abundan las arcillas del grupo de la Caolinita y la Montmorillonita, los óxidos e hidróxidos de hierro y aluminio Fookes³⁶, tal como se ilustra en la Figura 10, donde se puede observar que en las zonas tropicales se registran mayores espesores de suelo residual y mayor

³⁵ PEREZ, Influencia de la succión en la deformación cortante de suelos lateríticos. Bogotá. 2017. p. 25.

³⁶ FOOKES. Suelos residuales tropicales, citado por PÉREZ, Influencia de la succión en la deformación cortante de suelos lateríticos. Bogotá. 2017. p. 25.

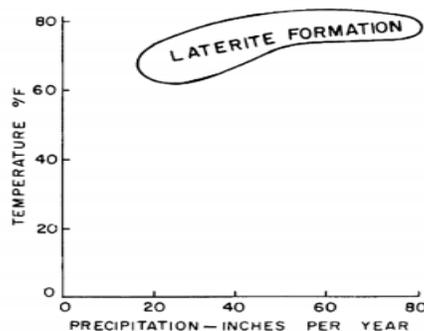
cantidad de productos de la meteorización. De igual forma en la Figura 11 se puede ver que para el caso de los suelos lateríticos, las condiciones de humedad y temperatura favorecen su formación.

Figura 10. Influencia del clima global en la profundidad de meteorización y los productos de la misma.



Tomado de: Influencia de la microestructura en la rigidez máxima de un perfil de suelo residual, en condiciones edométricas.

Figura 11. Condiciones de lluvia y temperatura para la formación de suelos lateríticos.

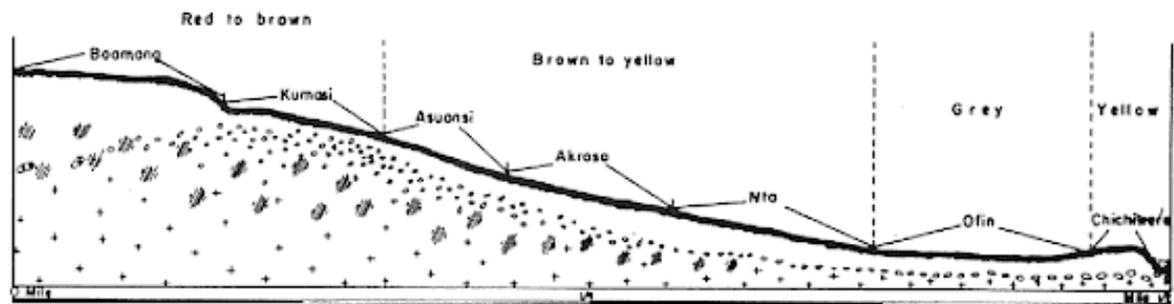


Tomado de: Laterite Soil Engineering, Pedogenesis and Engineering Principles.

1.4.6 Topografía y variaciones de color en suelos lateríticos. La topografía tiene gran influencia en la formación y distinción de suelos lateríticos y las condiciones de drenaje en las variaciones de color.³⁷

En las tierras altas, los suelos bien drenados son con frecuencia de color rojizo a rojo parduzco o en ocasiones de un color rojo muy brillante o rojo violáceo, estos colores rojos denotan la presencia de un óxido de hierro no hidratado en el suelo; en los suelos con pendiente media y baja, el drenaje es un poco más pobre, son suelos que permanecen húmedos por más tiempo y se secan con menos frecuencia por lo que tiene una alta hidratación de hierro que produce un color marrón o amarillo; el coluvión de menor pendiente es típicamente de color amarillo parduzco al igual que los suelos mejor drenados desarrollados en aluvión donde el drenaje es muy pobre como el fondo del valle donde el nivel freático oscila y todo o parte del perfil del suelo está inundado, en suelos donde predomina la reducción de hierro y otros compuestos en contraste con su hidratación los colores típicos en los suelos son los grises azulados, los grises verdosos y los grises neutros, estos colores sugieren un encharcamiento prolongado, cuando la inundación es intermitente o estacional, como en la parte del perfil donde fluye la capa freática, entonces en lugar de color gris uniforme, es probable que se produzcan moteados (parches de color amarillo, naranja o rojo en un perfil gris de suelo).

Figura 12. Esquema de variación de color de los suelos lateríticos de acuerdo a la topografía.



Tomado de: Laterite Soil Engineering, Pedogenesis and Engineering Principles.

1.4.7 Variaciones en perfiles de suelos lateríticos. La topografía local influye en las características morfológicas como en la variación del nivel freático y

³⁷ BRAMMER, H. Agriculture and Land Use in Ghana. Oxford University Press, and AHN, RM. West African Soils, 3rd ed, citado por GIDIGASU, M. Laterite soil engineering, Pedogenesis and engineering principles. Op.cit. p. 108-109.

el sistema de drenaje, un ejemplo de ello es la secuencia catenal realizada a un depósito de suelo de laterita de África Occidental, donde se pudo observar que en los montículos, depresiones y pendientes hay diferentes condiciones de humedad y varios tipos de suelo cada uno con características diferentes.

El depósito de laterita se compone de varios estratos de material dejados por la intemperie o desintegración del lecho rocoso inferior, o consiste en materiales transportados derivados principalmente de roca, y en muchos casos es una combinación de estos. Para Pendelton y Sharasuvana³⁸ los perfiles de laterita se definen como perfiles en los que se encuentran horizontes lateríticos o capaces de desarrollarse si existen condiciones favorables para la lateralización durante un periodo apropiado de tiempo, lo que quiere decir que el perfil de laterita se puede aplicar a cualquier perfil de suelo en el que al menos uno de sus horizontes sea de color rojizo, o alguno de sus horizontes tiene un alto contenido de sesquióxidos de hierro y/o aluminio.

Los horizontes de los perfiles de suelo de laterita pueden ser reportados de dos formas, la primera es la descrita por Remillon³⁹ de acuerdo a los procesos pedogenético de eliminación o disposición existentes en la formación del perfil, aquí se definen 4 horizontes: A- zona de lixiviación, B- zona de acumulación, C- zona de intemperie y eliminación de constituyentes solubles y D- roca madre.

Otros como Bawa⁴⁰ y Maignien⁴¹, basaron sus descripciones en las características morfológicas donde definieron los siguientes horizontes: A- suelo superior (generalmente teñido de humus oscuro), B2- horizonte de laterita de corteza de hierro o costras de alúmina, B1- zona de moteado con evidencia de enriquecimiento de sesquióxidos, C- zona pálida o lixiviada (roca que sufre cambios químicos, pero conserva la apariencia física) y D- roca madre.

De acuerdo a la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura – FAO, el perfil de laterita se divide en los siguientes horizontes:

³⁸ PENDELTON and SHARASUVANA. Analyses Of some Siamese Laterites, citado por GIDIGASU, M. Laterite soil engineering, Pedogenesis and engineering principles. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company, 1976. p.113.

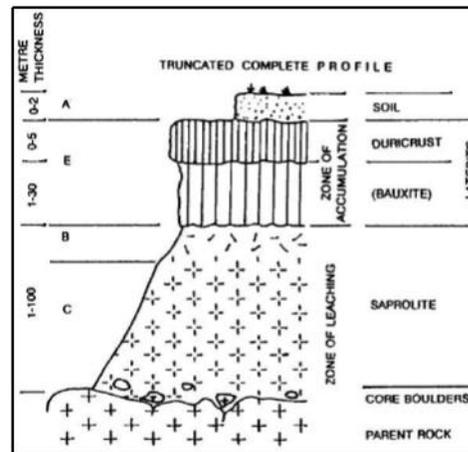
³⁹ REMILLON. Les recherches routières entreprise en Afrique d'expression française, citado por GIDIGASU, M. Laterite soil engineering, Pedogenesis and engineering principles. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company, 1976. p.113.

⁴⁰ BAWA. Laterite soils and their engineering characteristics, citado por GIDIGASU, M. Laterite soil engineering, Pedogenesis and engineering principles. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company, 1976. p.113.

⁴¹ MAIGNIEN. Review of research on laterites. Op. cit., p.113.

horizonte A: es la superficie del suelo, rico en materia orgánica; horizonte E: capa intermedia caracterizada por la pérdida silicatos de arcilla, hierro y aluminio a través de la lixiviación; horizonte B: capa sub-superficial caracterizada por una absoluta o relativa acumulación de los productos de lixiviación y horizonte C: material parcialmente alterado del que se supone que se ha formado el material más superficial, el cual se pudo formar por uno o más ciclos de meteorización.

Figura 13. Perfil de suelo laterítico definido por la FAO.



Tomado de: Influencia de la succión en la deformación cortante de suelos lateríticos

Adicional a lo mencionado anteriormente, en términos de características morfológicas, se pueden identificar tres horizontes principales en los perfiles de suelo laterítico: 1. Capa de suelo sobre el horizonte de laterita, aquí el horizonte de laterita parece encontrarse generalmente a profundidades poco profundas, puede estar cubierto de una variedad de suelos compuestos de material muy degradado rico en sesquióxidos con o sin caolín; 2. Horizonte de laterita, puede ser de arcillas rojas, nódulos detríticos o fragmentos del paisaje superior que contiene reliquias de lateritas o cortezas de laterita en desintegración; 3. capas de suelo debajo del horizonte de laterita, que pueden ser capas terrosas altamente erosionadas y comúnmente gruesas, también se pueden encontrar en áreas secas o en lugares con buena aireación donde el material subyacente sea de color brillante.

En cuanto a parámetros mecánicos, Baldovin⁴² estudió varias muestras de suelo a diferentes profundidades de un mismo perfil laterítico, en los horizontes C y B, encontró que en el horizonte B no se presentaba variación en las características de esfuerzo – deformación a pesar del cambio en la profundidad, mientras que las muestras extraídas a diferentes profundidades del horizonte C presentaban un significativo cambio tanto en el ángulo de resistencia como en la cohesión, lo que lo llevó a concluir que entre mayor es el grado de laterización los parámetros de esfuerzo cortante son más favorables.

La relación de vacíos, densidad y contenido de agua ejercen una considerable influencia sobre los parámetros de resistencia al corte de muestras de laterita inalteradas y compactadas, tal como lo demuestran trabajos como el de Lumb,⁴³ quien encontró que, para muestras con alto contenido de finos tanto remoldeadas como compactadas, un cambio de 0.16 en la relación de vacíos genera una variación aproximada de hasta 10° en el ángulo de resistencia. Por otra parte, Baldovin⁴⁴ encontró que para una laterita arcillo arenosa el disminuir el contenido de agua de 22 a 18% genera un aumento en la resistencia al corte cercana al 700%.

1.4.8 Características morfológicas de los suelos lateríticos. Se han identificado dos grupos principales de suelos de laterita que contienen mayor proporción de sesquióxidos de hierro Fe_2O_3 y de aluminio Al_2O_3 en relación con otros componentes químicos, estos son los suelos ferruginosos y suelos aluminosos (bauxita), las características genéticas de cada grupo se muestran en la Tabla 7; la mayoría de las diferencias entre estos dos grupos de suelos lateríticos son cualitativas, las cuales se basan en las características físicas y geotécnicas determinadas en laboratorio,⁴⁵ se tomaron muestras de materiales de un depósito de laterita de África Occidental, de las cuales se determinaron las características típicas como color, estructura y textura mostradas en la Tabla 8.

⁴² BALDOVIN. The shear strength of lateritic soils. In Specialty Session of Engineering Properties of Lateritic Soils. citado por PEREZ, Influencia de la succión en la deformación cortante de suelos lateríticos. Bogotá. 2017. p. 29.

⁴³ LUMB. Report on the Settlement of Buildings in the Mong Kok District of Kowloon, Hong Kong. Hong Kong. citado por PEREZ, Influencia de la succión en la deformación cortante de suelos lateríticos. Bogotá. 2017. p. 29.

⁴⁴ BALDOVIN. The shear strength of lateritic soils. In Specialty Session of Engineering Properties of Lateritic Soils. Op. cit., p.29.

⁴⁵ GIDIGASU, M. Laterite soil engineering, Pedogenesis and engineering principles. Op.cit. p. 117.

Tabla 7. Resumen de las características de suelos ferruginosos y aluminosos. (Maignien, 1966)

CARACTERÍSTICAS	SUELOS LATERÍTICOS ALUMINOSOS	SUELOS LATERÍTICOS FERRUGINOSOS
Sitio	Formas antiguas	Formas principalmente profundas
Inducción	Ligero a moderado	Moderado a pesado e incluso muy pesado
Color	Blanquecino- rosa a rojo	Óxido a marrón oscuro
Densidad	Baja	Alta
Estructura	Básicamente escoriáceo	Extremadamente variado: pisolítico, alveolar, laminar, etc
Composición química	Fuertemente hidratado (>20%), poco material insoluble	Ligeramente hidratado (10%), abundancia de materia soluble
	Principalmente gibbsita, bohemita, goetita, pequeña caolinita	Caolinita y goethita; cantidad principal variable de hematita; cantidad de gibbsita, a menudo ausente.
Composición mineralógica	Cuarzo ausente, o si está presente elástico y no abundante	El cuarzo a menudo es un componente importante, residual o elástico; cantidades variables de minerales de filita

Tomado de: Laterite Soil Engineering, Pedogenesis and Engineering Principles.

Tabla 8. Composición química de suelos típicos de laterita.

Tipo	Laterita bauxita ferruginosa	Laterita detritica	Laterita	Laterita	Laterita	Hierro concrecionado	Laterita en Gneis	Laterita de sitio TrachyAnde	Laterita ferruginosa	Laterita aluminosa	Laterita bauxita
Localidad	Satara India	Madras	Nigeria	Coolgardie Australia	Ora Banda Australia	British Guiana	Sudan	Jawa	Lawra Ghana	Goaso Ghana	Yenahin (kumasi) Ghana
total											
SiO ₂	0.9	34.8	26.5	2.6	3.5	5.7	34.92	37.00	23.96	21.91	0.71
Al ₂ O ₃	26.3	6.7	19.9	4.3	16.4	7.1	30.73	28.84	16.69	15.75	59.71
Fe ₂ O ₃	56.0	47.4	36.7	80.0	60.6	76.3	12.52	8.95	43.58	45.13	8.46
FeO	-	-	-	-	-	-	-	ND	0.32	-	-
MgO	-	-	-	-	-	-	1.25	0.73	0.21	0.28	-
CaO	-	-	-	-	-	-	0.76	0.40	0.24	0.31	-
Na ₂ O	-	-	-	-	-	-	0.90	2.98	-	-	-
K ₂ O	-	-	-	-	-	-	0.60	-	-	-	-
TiO ₂	1.6	tr	1.1	6.1	1.3	0.3	1.02	1.02	1.1	2.17	3.25
H ₂ O	14.4	10.7	-	-	10	8.02	1	13.39	13.60	13.60	27.95

Tomado de: Laterite Soil Engineering, Pedogenesis and Engineering Principles. 1976.

Para Martín y Doyne (1927) los suelos de laterita se clasifican de acuerdo a la relación molecular Sílice-alúmina o la actividad coloidal, donde relaciones inferiores a 1,33 se consideran lateritas verdaderas, entre 1,33 y 2 se consideran suelos de laterita y una relación mayor a 2 se considera suelo no laterítico y con desgaste tropical, esta clasificación como la propuesta por Joachin y Kandiah (1941) de utilizar la relación sílice- sesquióxido, fueron criticadas y muy poco útiles ya que no definen de manera concluyente la naturaleza completa de los suelos de laterita y el grado de lateralización.

Tabla 9. Características morfológicas generalizadas de los materiales de los perfiles de laterita.

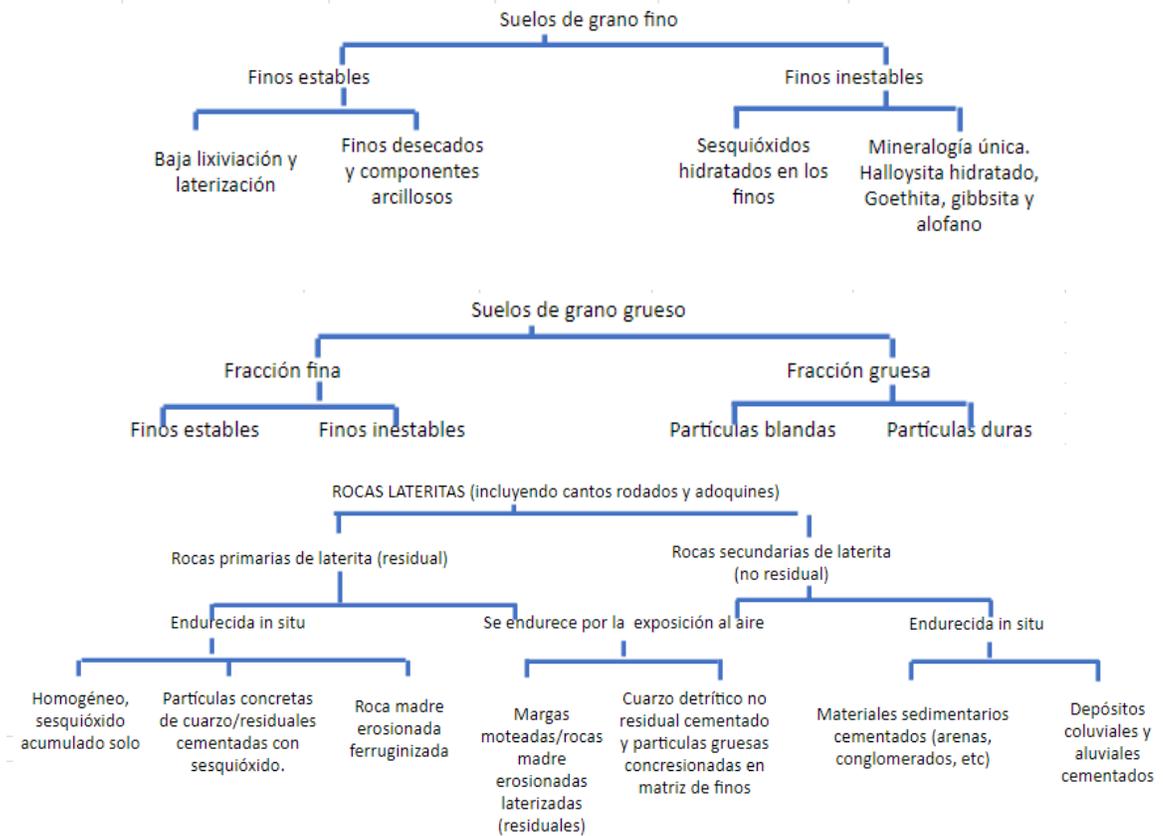
Grado de materiales de laterita	Grupos de texturas genéticas	Origen y estado en la excavación	Color y estructura	Naturaleza de las partículas del curso	Relación con los materiales originales	Parámetros genéticos significativos para la identificación y evaluación
I	Rocas descompuestas	Existen materiales residuales a partir del material que se rompe bajo presión con los dedos a la roca sólida fresca	Roca madre descolorida; generalmente gris a rojo amarillento, la estructura o roca madre se conserva	Angular, subangular a cúbico; varían en tamaño desde arena gruesa a cantos rodados en relación con el grado de descomposición	En la estructura del estado no perturbado de la roca madre se conserva	1) Tipo de roca madre 2) Condición de desgaste 3) Grado de descomposición y lixiviación 4) Contenido de minerales secundarios
II a	Laterita fina (suelos granulados)	Puede ser residual o no residual, no consolidado o compacto en relación con el origen genético y las condiciones ambientales, incluida la historia geológica y el grado de deshidratación y desecación.	Pizarras rojas variables de rojo amarillento, a través de café rojizo a marrón rosado. La estructura depende del tipo de roca principal, el grado de meteorización y el estado de compactación	Cuarzo aislado y partículas concrecionarias en la matriz del suelo de grano fino (arena-arcilla-limo-arcilla)	La distribución del tamaño de partícula es función del tipo de roca principal y del grado de meteorización	1) Tipo de material principal 2) Condiciones de intemperie 3) Origen genético (tupe del suelo) 4) Origen geológico (residual o transportado)
II b	suelos de grava de laterita	Puede ser residual o no residual. No consolidado en relación con el origen genético y las condiciones ambientales, incluida la historia geológica y el grado de deshidratación y desecación	De color rojo amarillento a rosa. La estructura depende del grado de meteorización y lateralización. Partículas de cuarzo y concrecionarias generalmente libres en matriz terrosa, compactadas en varios grados.	Partículas irregulares, angulosas, cúbicas a redondeadas de cuarzo y partículas nodulares crepusculares de piel dura de color marrón oscuro a rosa de diferentes tamaños y formas. Puede ser piezas de roca de laterita detritica.	Las rocas parentales ricas en cuarzo, variables, dan lugar a un alto porcentaje de partículas de cuarzo en relación con las partículas concretas. La relación con la roca madre puede no reflejarse en la distribución del tamaño de partícula.	(5) Grado de enriquecimiento de sesquióxido y deshidratación (desecación) (6) Estado en la excavación y después de la exposición al aire 7) Mineralogía de arcilla
III	Laterite rocks (including cobbles and boulders)	Puede ser residual o no residual. Rango de material blando que se puede romper bajo presión con los dedos hasta masas concrecionarias rojas muy duras como rocas.	Marrón rojizo, marrón oscuro, marrón rosáceo a rosa. En el material residual, los elementos endurecidos forman un esqueleto continuo y coherente. En materiales no residuales, los elementos duraderos cementan materiales preexistentes.	Partículas irregulares de cuarzo y concreciones de diferentes tamaños distinguibles en masa de diferentes tamaños.	En las rocas ferruginizadas, la textura y la estructura pueden ser preservadas; de otro modo, no se puede discernir ninguna relación con los tipos de roca padre, especialmente en los tipos no residuales.	1) Naturaleza de los sesquióxidos cementantes 2) Origen genético (tipo de material) 3) Origen geológico (residual o transportado) 4) Grado de deshidratación y / o dureza in situ o al exponerse al aire

Tomado de: Laterite Soil Engineering, Pedogenesis and Engineering Principles. 1976.

1.4.8.1 Características genético-texturales. Los suelos texturizados de laterita cubren materiales terrosos a materiales rocosos, genéticamente forman una cadena de materiales que comienzan con roca fresca y terminan con roca concreta rica en sesquióxidos,⁴⁶ en la Figura 12 se muestran las características genéticas-texturales de los suelos de laterita.

⁴⁶ GIDIGASU, M. Laterite soil engineering, Pedogenesis and engineering principles. Op.cit. p. 120.

Figura 14. Características genético-texturales de los suelos de laterita.



Tomado de: Laterite Soil Engineering, Pedogenesis and Engineering Principles.

1.4.8.2 Color. Como se había mencionado anteriormente los suelos de laterita tienen tonos rojizos característicos que se deben a los diversos grados de hidratación de hierro, titanio y manganeso, también reflejan el grado de madurez, según Maignien⁴⁷ con la edad los suelos ferruginosos parecen cambiar de rojo a marrón a negro, mientras que los suelos aluminosos adquieren un color más brillante.

El color de los suelos puede deberse a dos fuentes:

1. De materia orgánica - negro, marrón y gris.
2. De composición mineral - hierro: rojo, naranja, amarillo, marrón, azul y verde; calcio, magnesio, aluminio, sodio y potasio: blanco; manganeso: negro y

⁴⁷ MAIGNIEN. Review of research on laterites. Op. cit., p.125.

marrón; los óxidos de hierro hidratados tienen tonos como los mencionados en la Figura 13.

Figura 15. Tonos de óxido de hierro hidratado.

Nombre	Composición química	Color
Turgita	$Fe_2O_3 \cdot 1/2H_2O$	Rojo a rojo marrón
goethita	$Fe_2O_3 \cdot H_2O$	Negro parduzco
lepidocrocita	$Fe_2O_3 \cdot 4/3H_2O$	Amarillo y marrón
hydrogoethita	$Fe_2O_3 \cdot 3/2H_2O$	Amarillo y marrón
xanthosideriet	$Fe_2O_3 \cdot 2H_2O$	Dorado-amarillo
limnita	$Fe_2O_3 \cdot 3H_2O$	Marrón

Tomado de: Laterite Soil Engineering, Pedogenesis and Engineering Principles.

1.4.8.3 Macroestructura y microestructura. La estructura de los suelos de laterita de grano fino es muy variable y parece ser función de la naturaleza de la roca madre, la génesis y el grado de enriquecimiento del sesquióxido (Alexander y Cady, 1952; Maignien, 1966), mientras que la estructura de las gravas y los suelos con grava se ha reducido a fracciones gruesas de concreciones y/o partículas de cuarzo en una matriz terrosa; los suelos lateríticos presentan dos tipos de macroestructura, de acuerdo con Maignien⁴⁸: 1. Los elementos indurados forman un esqueleto continuo y 2. Los elementos endurecidos cementan materiales residuales o transportados preexistentes.

Según observaciones de Kubierna⁴⁹ le permitieron concluir que la formación de una estructura de suelo de laterita se debe a tres condiciones, la primera se basa en que el hidróxido de hierro debe estar presente en una forma fácilmente móvil, la segunda, se requiere de la presencia de una matriz densa, fácil, e igualmente conducible para los movimientos de sustancias por difusión y la tercera, se requiere de humectación constante e igual del tejido que se requiere para el crecimiento lento y no perturbado de los núcleos de concreción; además los suelos de laterita se caracterizan por poseer un relieve estructural terroso que se distingue de otros suelos tropicales, los elementos finos se organizan en una formación estructural porosa de textura esponjosa y generalmente de un color rojo brillante.

⁴⁸ MAIGNIEN. Review of research on laterites. Op. cit., p.125.

⁴⁹ KUBIENA. Micromorphology of laterite formation in Rio Muni, Spanish Guinea, citado por GIDIGASU, M. Laterite soil engineering, Pedogenesis and engineering principles. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company, 1976. p.269.

Osorio⁵⁰ menciona que la microestructura es un elemento de gran influencia sobre el comportamiento mecánico de una masa de suelo, ya que es indirectamente la que determina el fracturamiento y la capacidad del suelo de evacuar y conducir el agua.

Por otra parte, Alexander y Cady⁵¹ han descrito algunos de los tipos de estructuras internas (microestructura) y pusieron mayor atención en mecanismos que implican la migración y segregación de los principales constituyentes, desarrollo u organización del material en una variedad de patrones estructurales de la siguiente manera:

1. La forma de los minerales originales y las líneas de corte se conservan mediante un esqueleto de sesquióxido finalmente cristalizado. Ha ocurrido una transformación in-situ a través de pseudomorfos de feldspatos, anfíboles, piroxenos, etc. en gibbsita, goetita y caolinita.
2. Los enriquecimientos secundarios también son causados por contribuciones externas y migraciones más largas, estos mecanismos explican las películas orientadas de caolinita que se encuentran impregnadas con hierro en varias proporciones, estas películas bordean y alinean los poros y las cavidades, en ciertos casos el hierro se inmoviliza al ser adsorbido en la arcilla y puede ser removilizado y recristalizado si la caolinita es destruida.
3. Cuando la roca es particularmente rica en goethita, se pueden observar agregados diminutos, que consisten en minerales arcillosos impregnados de hierro que se reúnen en grupos dependiendo de la cantidad de sesquióxidos presentes.
4. Muchos suelos de laterita muestran minerales bien separados y minerales segregados mineralógicamente.
5. Se observan materiales agregados de diferentes tamaños y composición que llenan las grietas y los poros, que pueden estar compuestos de goethita pura, hematita o gibbsita cristalizada, otros amorfos y otros que aún no han sido identificados pero que son del tamaño de la partícula de las arcillas impregnados de sesquióxidos de hierro.

⁵⁰ OSORIO, C. Caracterización física y análisis del comportamiento mecánico de lateritas colombianas a nivel de partículas. Bogotá. 2016. p. 1.

⁵¹ LYLE, A and CADY, J. Genesis and hardening of laterite in soils. Op. cit., p.269.

Adicional a lo anterior, en cuanto a la macroestructura de los suelos de laterita, se ha descrito como masas vesiculares, concrecionarias, celulares, vermiculares, tipo escoria, pisolíticas o similares al hormigón, lo que indica que pueden desde materiales no consolidados hasta masas rocosas duras con diversas formas intermedias. En las rocas de laterita, la estructura puede fusionarse de forma homogénea con masas impregnadas de sesquióxido, aglomeración de pisolitos y nódulos de diversos tamaños o una mezcla de estos con cuarzo detrítico, feldespato o fragmentos de roca. Maignien⁵² ha distinguido las siguientes formas:

1. Estructuras homogéneas o continuas- rocas cuyos componentes originales han sido reemplazados por los sesquióxidos de hierro o aluminio y a veces manganeso.
2. Estructuras heterogéneas o discontinuas.
3. Rocas sueltas generalmente con grava.
4. Rocas coherentes (conglomeradas, de tipo conglomerado, vesiculares, escoriáceas o esponjosas).
5. Estructuras regulares.

1.4.8.4 Relación con los materiales originales. Según menciona Gidigasú⁵³, numerosos estudios acerca de suelos tropicales meteorizados (p. ej. Sherman, 1952; Mohr and Van Baren, 1954; Nye, 1954; Clare, 1957; Dowling and Williams, 1964; Gidigasú, 1971, 1972) han puesto de manifiesto que las características geológicas de las rocas ejercen una influencia considerable en la distribución y naturaleza de los suelos residuales lateríticos; por ejemplo Clare⁵⁴, encontró que como regla general en los materiales que han sido formados por procesos de meteorización se producen dos grupos principales de suelos:

(1) suelos en los cuales los productos de la meteorización han sido removidos por solución; y

(2) suelos en los cuales los productos de meteorización se han acumulado por precipitación.

⁵² MAIGNIEN. Review of research on laterites. Op. cit., p.127.

⁵³ GIDIGASU, M. Laterite soil engineering, Pedogenesis and engineering principles, citado por TORRES, Carlos. Influencia de la microestructura en la rigidez máxima de un perfil de suelo residual, en condiciones edométricas. Bogotá. 2017. p. 21.

⁵⁴ CLARE, K. E. Airfield construction on overseas soils, 1. The formation, classification and characteristics of tropical soils, citado por TORRES, Carlos. Influencia de la microestructura en la rigidez máxima de un perfil de suelo residual, en condiciones edométricas. Bogotá. 2017. p. 21.

Los suelos lateríticos se ubican en el segundo grupo mencionado anteriormente, dependiendo del grado de meteorización o deshidratación de los suelos de laterita, estos pueden variar desde materiales no consolidados, friables o granulares hasta masas con características similares a rocas de considerable dureza, además pueden mostrar si los suelos lateríticos están relacionados o no con el tipo de roca madre, es así como se puede evidenciar por ejemplo cómo se relaciona morfológicamente con el tipo de roca madre las rocas descompuestas y de grano fino pobremente lixiviados, mientras que los suelos altamente lateralizados y deshidratados pueden no mostrar en absoluto rasgos de la roca madre, aunque hay casos en que puede haber o no algo de parecido con la roca madre, por ejemplo las rocas de laterita formadas por ferruginización, la textura y la estructura de los materiales pueden parecerse a la roca original, mientras que las rocas lateríticas formadas por cementación de materiales preexistentes generalmente no están relacionadas con la roca madre.

1.5. ENSAYOS DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS

1.5.1 Preparación de los especímenes alterados.

Secado. La estructura y el comportamiento físico de los suelos residuales tropicales puede cambiar por secado, algunos de los cambios son químicos y definitivos que se reflejan en cambios en las propiedades índice derivadas de los ensayos de granulometría, plasticidad y contracción, o en la densidad de las partículas. Los cambios en las propiedades pueden ser causados por la alteración de los minerales de arcilla por deshidratación parcial o por la agregación de partículas finas para formar partículas mayores que permanecen unidas al rehumedecerse.

Debe suponerse que todos los suelos residuales tropicales son afectados en alguna manera por el secado. En consecuencia, los ensayos de clasificación deben aplicarse a los suelos con su humedad natural, al menos que pueda establecerse, a partir de ensayos comparativos, que el secado no tiene efectos significativos sobre los resultados de los ensayos, y debe registrarse siempre el método de preparación.

Desagregación. La desagregación de los suelos residuales tropicales debe hacerse con cuidado, tomando en consideración el significado de partículas individuales. Se deben separar las partículas individuales sin triturarlas o partirlas,

en los suelos cuyas partículas están unidas por cemento la desagregación debe limitarse a la que se consiga con la presión de los dedos.

Cuarteo. Después de la desagregación es esencial asegurarse que los especímenes se subdividen por procedimientos de cuarteo aceptados de tal manera que se obtengan especímenes representativos para el ensayo.

1.5.2 Distribución de partículas. Para que el análisis represente el material de origen, la preparación de la muestra y los procedimientos de prueba no deben fracturar las partículas gruesas. Es igualmente importante que los finos que se adhieren a las partículas gruesas se separen. Por lo tanto, se recomienda que las partículas se remojen hasta que el material de recubrimiento esté completamente ablandado; que solo se utilice el tamizado mojado; y que se mantenga un "sistema cerrado" de lavado para que no se pierda material en el proceso.

1.5.3 Densidad aparente de partículas. Los valores de 28 lateritas a nivel mundial (fracción de tamaño no establecida) oscilan entre 2,67 y 3,46, con una media de 3,06.

1.5.4 Contenido de humedad. En algunos suelos tropicales, existe cierta cantidad de agua de cristalización dentro de la estructura de los minerales, adicionalmente al agua libre, que puede ser removida a temperatura entre 105 y 110° C, para identificar este tipo de suelo, se deben realizar ensayos comparativos sobre especímenes duplicados registrando el contenido de humedad por secado hasta una masa constante entre 105 y 110°C y a temperatura que no supere los 50°C. Una diferencia significativa indica la presencia de agua estructural que no hace parte del agua libre.

Al relacionar el contenido de humedad con los límites líquido y plástico, el contenido de humedad medido debe ser corregido para considerar la fracción de suelo que pasa por la malla de 425 µm (tamiz # 40). Esta fracción puede ser determinada por lavado, sobre el tamiz de 425 µm, a partir del espécimen seco que queda del ensayo del contenido de humedad, secando y pesando la fracción retenida en la malla de 425 µm, y calculando, por diferencias, el porcentaje que pasa esta malla.

1.5.5 Ensayos de plasticidad. Las lateritas generalmente deben probarse con su contenido de humedad natural o después del secado al aire. Si todas

partículas pasan la malla de 425 μm , el agua puede agregarse directamente al suelo con su humedad natural, y luego se mezcla y se amasa para los ensayos de límite líquido y límite plástico. La sensibilidad del suelo a la mezcla y al amasado debe ser verificado utilizando un amplio intervalo de tiempos de mezclado, que pueden ser 5, 10, 15, 30 y 45 minutos, antes del ensayo. Puede estimarse un tiempo más corto de mezclado para asegurar la homogeneidad y completo amasado.

Según estudios realizados por diferentes autores, la plasticidad en un perfil de suelo de laterita puede estar relacionada con el grado de intemperización y lateralización, por lo cual cuanto mayor es el grado de lixiviación y lateralización, menor es la influencia de la cantidad del contenido de arcilla en el índice de plasticidad, en la Tabla 10 se muestran las características de plasticidad de las arcillas de las lateritas y no lateritas típicas de clima tropical en relación con la composición mineralógica.

Tabla 10. Características de plasticidad de arcillas de lateritas y no lateritas.

Grupo mineralógico	color	contenido de arcilla %	límite líquido %	índice de plasticidad %	límite de contracción %	actividad	Clasificación de Casagrande
Illita	-	20-36	38-52	15-25	14-22	0,7	CL, CH
Caolinita	rojo	59	57	36	18	0,6	CH
Metahalloysita	rojo	81-88	76-88	37-46	23-26	0,5-0,6	OH, MH, CH
Halloysita hidratada	marrón rojizo a marrón oscuro	78-79	104-106	34-36	27-30	0,4-0,5	OH, MH
Mortmorillonita	negro	63-75	81-101	47-57	11-15	0,7-0,8	CH, MH, OH

Tomado de: Laterite Soil Engineering, Pedogenesis and Engineering Principles.

En cuanto al equivalente de arena de acuerdo a la especificación DNER -ES-P 10-71 o DNIT 141/2010 – ES, se establece que, para base estabilizada granulométricamente, si el límite de liquidez es mayor de 25% y si el límite plástico es mayor que 6% es posible aceptar el material si el equivalente de arena es superior al a 30. Puede tener resultados insatisfactorios debido a las peculiaridades mineralógicas y físico-químicas de la fracción de arcilla en los suelos lateríticos.

1.5.6 Ensayos de contracción. Algunos suelos tropicales residuales se contraen considerablemente al secarse, o se expanden al humedecerse. El ensayo del límite de contracción determina el contenido de humedad por debajo del cual no se presenta una contracción adicional y proporciona algunos datos cuantitativos para estimar la cantidad de contracción. Si el límite de contracción se

va a relacionar con los ensayos de plasticidad debe utilizarse la proporción de suelo que pasa por la malla de 425 µm.

1.5.7 Gravedad específica. De acuerdo a Nanda y Krishnamachari, en los suelos de laterita, las partículas generalmente tienen una gravedad específica entre aproximadamente 2,55 y 4.6, algunos autores han demostrado que estos valores altos se asocian generalmente con las fracciones de grava en los que se concentran los óxidos de hierro, de lo cual, se ha encontrado que la gravedad específica de las fracciones finas y gruesas de los suelos de laterita es muy diferente. En la Tabla 11 se muestran valores de gravedad específica de algunos suelos lateríticos. La fracción gruesa generalmente tiene una gravedad específica entre 3.0 y 3.5 (pero a veces mucho más alta), mientras que la gravedad específica del material fino es de aproximadamente 2.7.

Adicionalmente, según estudios realizados a diferentes perfiles de suelo de laterita en el África Occidental, se pudo observar que los valores más altos reportados de gravedad específica están asociados a los suelos altamente laterizados; el valor de gravedad específica es útil para la identificación y evaluación de rocas y agregados de laterita para su uso en la construcción de pavimentos, ya que da conocimiento sobre la resistencia mecánica como el valor de impacto agregado y la abrasión en la máquina de los ángeles.

Tabla 11. Valores de gravedad específica de algunos suelos lateríticos.

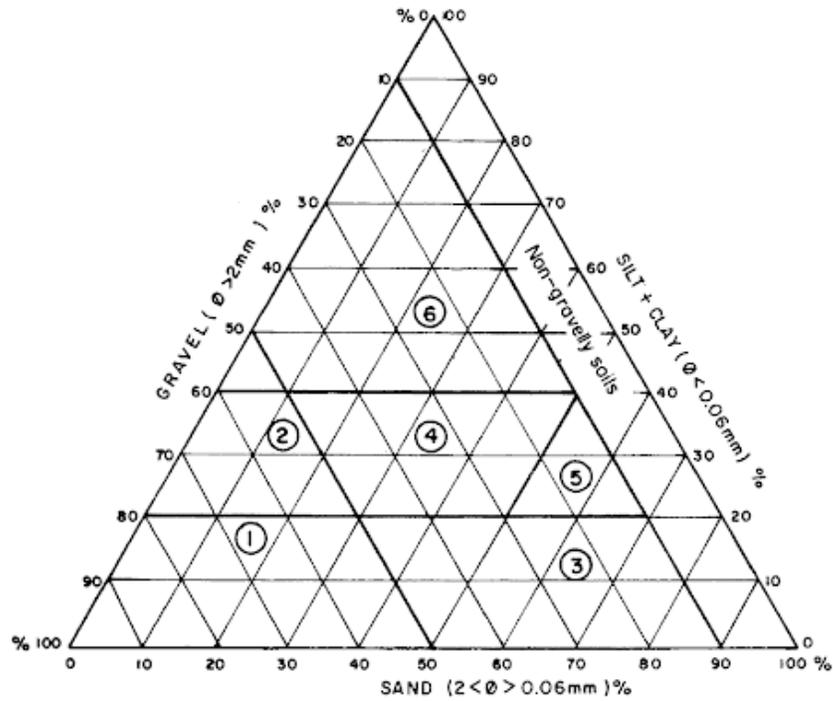
LOCALIZACIÓN	VALORES DE G _s		REFERENCIAS
	Porción que pasa tamiz n°7	suelo entero	
Uganda (6 suelos)	2,69 - 2,91	2,93 - 3,04	Evans
Gambia (3 suelos)	2,68 - 2,74	2,98 - 3,06	O' Reilly
India (6 suelos)	2,78 - 2,92	3,26 - 3,54	Central roads institute India
India (38 suelos)	2,2 - 4,6	-	Nanda y Krishnamachari
Ghana (2 suelos)	2,77 - 2,78	3,25 - 3,33	De Graft-Johnson y Irwin

Tomado de: Laterite Soil Engineering, Pedogenesis and Engineering Principles.

1.5.8 Clasificación textural de los suelos de laterita. Las gravas de laterita concrecionada y los suelos de grava se caracterizan por su alto porcentaje de finos, es posible agrupar estos dos tipos en seis clases de texturas que parecen tener características geotécnicas similares mediante la carta triangular mostrada en la Figura 14.

Figura 16. Cuadro de texturas propuesto para la clasificación de gravas de laterita y suelos de grava.

CLASIFICACIÓN PROPUESTA				
Nombre	% de grava	% de arena	% limo y arcilla	observaciones
Grava	50-100	0-50	0-20	
Grava limosa	>50	0-30	20-40	limo<arcilla<30%
Arena de grava	10-50	30-90	0-20	arcilla limo arenosa<arcilla<30%
marga de grava	10-50	10-50	20-40	
marga arenosa de grava	10-30	50-70	20-40	limo<arcilla<30%
arcilla de grava	10-50	0-50	40-90	arcilla=20-40%



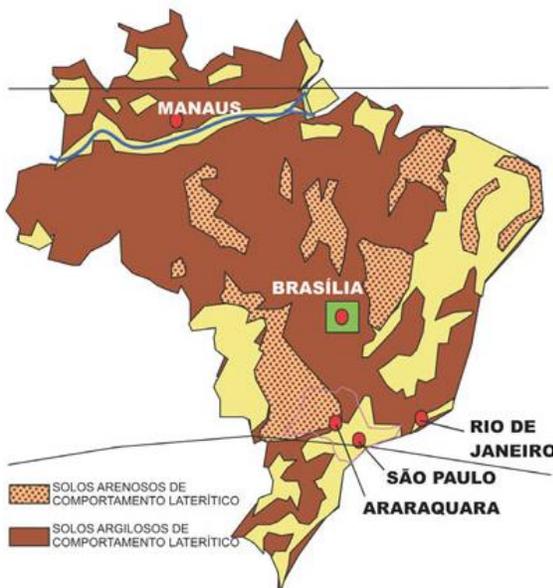
Tomado de: Laterite Soil Engineering, Pedogenesis and Engineering Principles.

2. USO DEL SUELO LATERÍTICO EN LA ACTUALIDAD

2.1. SUELOS LATERÍTICOS EN BRASIL.

En Brasil desde la mitad del siglo XX han sido empleados los suelos tropicales como capas de base y subbase en pavimentos, como se ha visto, los suelos lateríticos por su identificación en cuanto a propiedades granulométricas e índices físicos, no serían útiles desde el punto de vista de la clasificación tradicional de suelos HRB-AASHO (Highway research board) para su uso en carreteras; debido a esto, el DNER (Dirección Nacional de Carreteras) ahora llamado DNIT (Departamento Nacional de Infraestructura de Transporte) desarrolló una metodología denominada MCT (Miniatura Compactado Tropical = cuerpos de prueba Miniatura, Compactados y constituídos de suelos Tropicales) que permite la determinación de conductas lateríticas y no lateríticas (sapolíticas) tomando en cuenta las propiedades con relación a las características genéticas del suelo; este sistema fue concebido como forma de inclusión de suelos finos tropicales con el fin de posibilitar un mejor aprovechamiento de suelos arenosos finos lateríticos en pavimentación, teniendo en cuenta sus propiedades mecánicas e hidráulicas cuando se compactan y su potencial para el empleo en capas de pavimentos.

Figura 17. Distribución de suelos lateríticos en Brasil.



Tomado de: Considerações sobre solos tropicais e conceito de pavimentos de Baixo custo

2.2. METODOLOGÍA PARA LA CLASIFICACIÓN MCT PARA SUELOS TROPICALES.

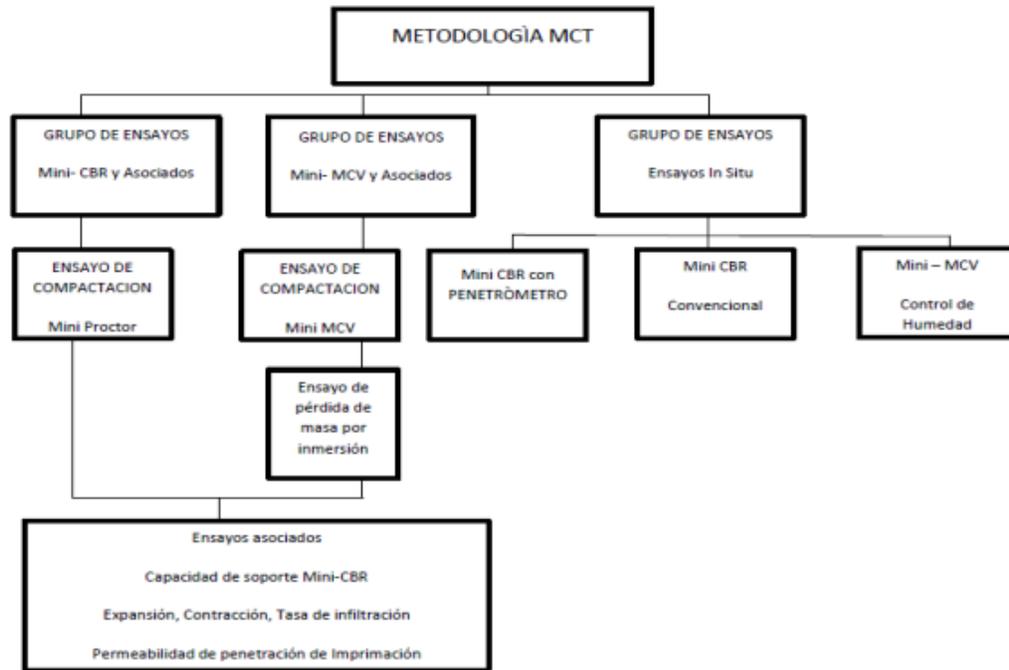
Esta clasificación ofrece valores estimativos de las propiedades de los grupos de suelos tropicales, en condiciones compactadas. Permite un estudio adecuado de diversas aplicaciones prácticas, en geotecnia en el área de construcción de carreteras, entre las cuales se destaca la elección de suelos para capas de pavimentos, definición de suelos para subrasantes para fines de dimensionamiento de pavimento, construcción de terraplenes y protección de la erosión de vías y taludes.⁵⁵

2.2.1 Ensayos mecánicos e hidráulicos. La clasificación MCT depende de una serie de ensayos realizados para la determinación de parámetros relacionados a propiedades mecánicas e hidráulicas de suelos finos tropicales, cada uno de estos procedimientos se realizan con muestras de suelo compactadas en una sola capa en moldes cilíndricos de 50 mm de diámetro y 50 mm de altura, Figura 17.⁵⁶ La metodología permite determinar propiedades fundamentales de los suelos como contracción, permeabilidad, expansión, coeficiente de penetración del agua, cohesión, capacidad de soporte y curvas de compactación, la Figura 16 muestra los diferentes grupos de ensayos de la Metodología MCT.

⁵⁵ VILLIBOR, D y LANCAROVICI, D. Clasificacao de solos tropicais de granulacao fina e grossa. Rio de Janeiro. 2017. p. 18.

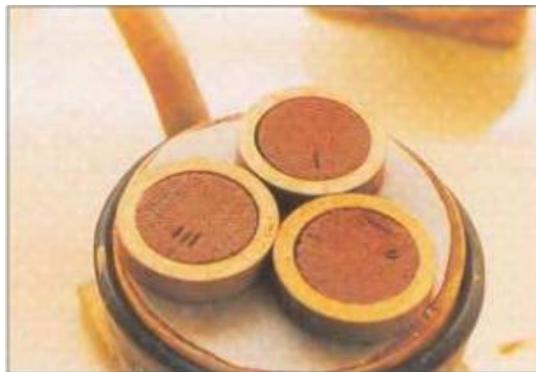
⁵⁶ BALBO, T. Pavimentação asfáltica materiais, projeto e restauração. São Paulo. 2007. p. 82-83.

Figura 18. Flujograma de los grupos de ensayos de la Metodología MCT.



Tomado de: Lineamientos básicos para la clasificación de suelos lateríticos-tropicales en Colombia orientado a pavimentos.

Figura 19. Aspecto de los moldes para suelos tropicales.

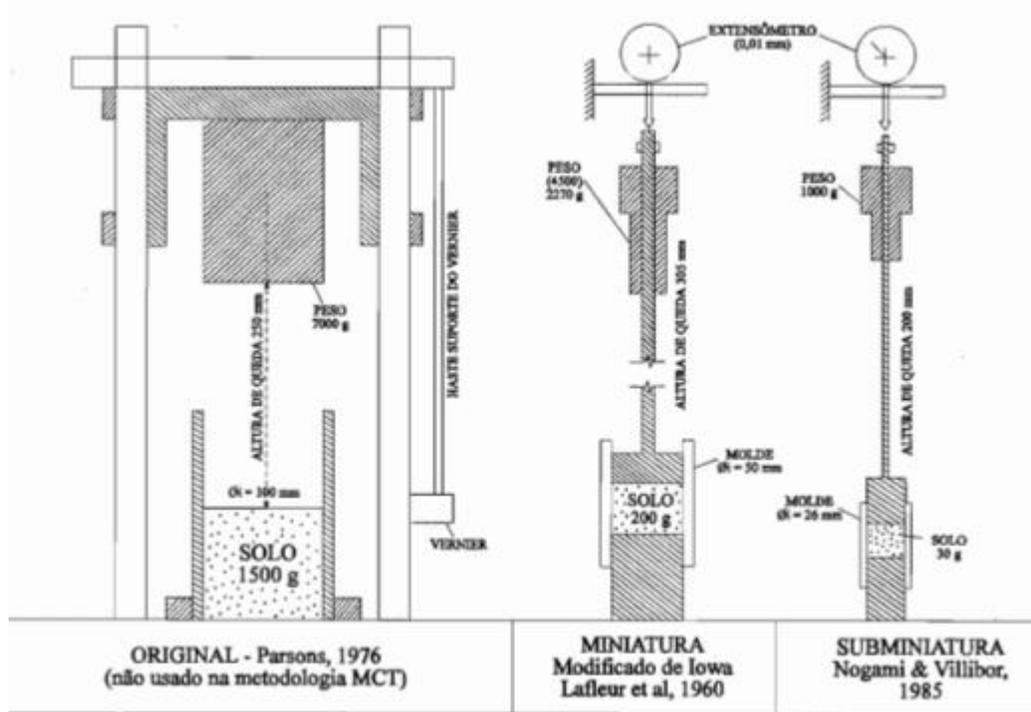


Tomado de: Pavimentacao de baixo custo com solos Lateríticos.

A diferencia de las clasificaciones tradicionales para suelos, la clasificación MCT no utiliza la granulometría ni los índices de Atterberg; por el contrario separa los suelos en dos clases: los de comportamiento laterítico considerados suelos superficiales residuales maduros formados a partir del proceso de laterización, y

los de comportamiento no laterítico o saprolíticos que corresponden a suelos formados por la disgregación y/o descomposición de las rocas in situ que pueden ser de tipo arenoso, limoso y/o arcilloso.⁵⁷

Figura 20. Esquema comparativo de los aparatos de compactación relacionados a la metodología MCT.



Tomado de: Pavimentacao de baixo custo com solos Lateríticos.

2.3. ENSAYOS PARA CARACTERIZACIÓN Y CLASIFICACIÓN MCT.

Los ensayos para la inclusión de suelos finos en la clasificación MCT son los ensayos de compactación mini-MCV (moisture condition value), mini-CBR y de pérdida de masa por inmersión.⁵⁸

⁵⁷ MALAVER, N y TAFUR, R. Lineamientos básicos para la clasificación de suelos lateríticos-tropicales en Colombia orientado a pavimentos. Bogotá. 2018. p. 28.

⁵⁸ BALBO, T. Pavimentação asfáltica materiais, projeto e restauração. Op.cit., p. 84.

2.3.1 Ensayo de compactación mini-CBR. Este ensayo tiene por objeto ensayar la muestra con un ensayo de resistencia que es muy similar al CBR convencional a excepción de sus dimensiones, en la Tabla 12 se muestran las características del ensayo de mini-CBR, para fines de evaluación libre de soporte de suelos típicos de las regiones tropicales.⁵⁹

Estas muestras se preparan para ser ensayadas en condiciones diferentes a las estandarizadas, ya sea con sobrecargas, penetración sin inmersión previa en agua, etc, o para la obtención de otras propiedades como contracción, infiltrabilidad o permeabilidad.⁶⁰

Tabla 12. Características del ensayo de compactación.

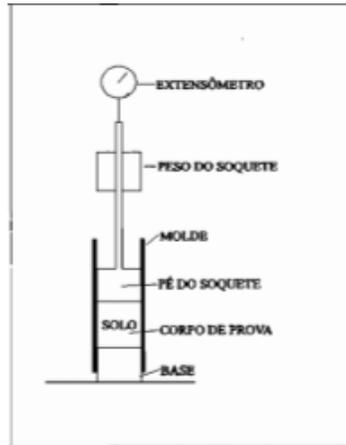
CARACTERÍSTICA	PATRONES DEL ENSAYO
Dimensión del molde	Cilindro con diámetro interno de 50 mm y volumen de 100 ml.
Cantidad de la muestra	Masa de 0,2 kg para compactación y diámetro máximo de los granos 2 mm.
Forma de Compactación	Energía Normal: peso 2,27 kg, altura de caída de 305 mm y 5 golpes por cara.
	Energía Intermedia: peso 4,50 kg, altura de caída de 305 mm y 6 golpes por cara.
	Energía modificada: 12 golpes por cara
base del tipo pistón que permite el movimiento del molde durante la compactación, distribuyendo mejor la energía aplicada por el martillo.	

Tomado de: Pavimentação asfáltica materiais, projeto e restauração.

⁵⁹ MT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. Norma Rodoviária. Solos compactados em equipamento miniatura – Mini-CBR y expansao. DNER-ME 254/97. p. 2-4.

⁶⁰ NOGAMI, J y VILLIBOR, D. Pavimentacao de Baixo Custo con Solos Lateriticos. Sao Paulo. 1995. p. 83.

Figura 21. Detalle del ensayo de compactación.



Tomado de: Pavimentacao de baixo custo com solos Lateríticos.

El método busca fijar una energía de compactación (normal, intermedia y modificada) para compactar una serie de cuerpos de prueba con diferentes contenidos de humedad, después de estar inmersos en agua por más de 20 horas y medida la expansión correspondiente.⁶¹ Este procedimiento permite determinar el contenido óptimo de humedad y la masa específica aparente seca del suelo. Este ensayo presenta una dispersión menor de valores de capacidad de soporte en relación al ensayo convencional.

Los valores típicos esperados de resistencia por el ensayo Mini-CBR para algunos suelos tropicales de comportamiento laterítico y no laterítico según la clasificación MCT son los mostrados en la Tabla 13, en la cual se puede observar que los suelos de comportamiento laterítico LA, LA' y LG' presentan menores pérdidas de resistencia debido a su saturación cuando están inmersos en agua, aunque poseen fracción arcillosa.

⁶¹ NOGAMI, J y VILLIBOR, D. Pavimentacao de Baixo Custo con Solos Lateriticos. Op.cit., p. 86.

Tabla 13. Resistencias típicas de algunos suelos tropicales compactados.

TIPO MCT	MINI-CBR % SECO	PORCENTAJE DE REDUCCIÒN EN MINI-CBR % DESPUÈS DE IMERSIÒN
NA	4 a 30	40 a 70
NA'	12 a 30	< 40
NS'	4 a 30	40 a mas de 70
NG'	12 a 30	> 70
LA	12 a 30	< 40
LA'	12 a mas de 30	< 40
LG'	12 a 30	< 40

Tomado de: Pavimentação asfáltica materiais, projeto e restauração.

Los suelos lateríticos poseen ciertas peculiaridades en cuanto al ensayo Mini-CBR de las cuales se destacan las siguientes:

- Pequeña reducción del valor de soporte por inmersión en agua, en las condiciones próximas a la óptima de compactación. Villibor propuso un valor $RIS=100 \cdot (\text{Mini-CBR}_{\text{inmerso 2 días}} / \text{Mini-CBR}_{\text{sin inmersión}})$ para caracterizar esa reducción.
- Los valores de expansión son relativamente pequeños, iguales para arcillas y suelos arcillosos, cuando son compactados en condiciones de humedad óptima y masa específica aparente seca máxima.

2.3.2 Ensayo de expansión. Este ensayo tiene por objeto determinar los valores de expansión de los argilo-minerales constituyentes de los suelos finos, clasificando los suelos para su uso en pavimentación. Con el mismo procedimiento y equipo del ensayo Mini –CBR, se obtiene la expansión como un valor expresado en porcentaje, con aproximación de 0,1, obtenido para las condiciones con inmersión (E), con sobrecarga y con indicación del contenido de humedad de compactación; con los valores obtenidos en condición sumergida, se calcula la expansión "E" por la siguiente ecuación (1):

$$E = \frac{(Li-Lf) \cdot 100}{Ai} \quad (1)$$

Donde:

E = expansión, expresada en %, con aproximación de 0,1

Li = lectura inicial del extensómetro, en milímetros, con aproximación de 0,01

Lf =lectura final del extensómetro, en milímetros, con aproximación de 0,01 mm
Ai = altura inicial del cuerpo de prueba, en milímetros, con aproximación de 0,01 mm, obtenida con la compactación del molde de prueba.

Los suelos lateríticos que sean arcillas poseen pequeña expansión cuando se compactan a humedades óptimas correspondientes a la masa específica aparente seca máxima de la energía adoptada e inmersos en agua, además, los suelos considerados presentan una expansión poco dependiente de la sobrecarga.⁶²

2.3.3 Ensayo de contracción. El ensayo de contracción permite una medida de la variación de la longitud axial de la muestra después de la compactación cuando es expuesto a las condiciones atmosféricas con el fin de evitar la propagación y la reflexión de las grietas en la capa de revestimiento, esta propiedad es importante durante el periodo de secado de los suelos lateríticos.

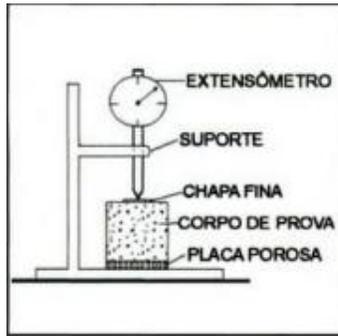
El espécimen obtenido en la compactación de Mini-MCV, es retirado completamente del molde, el espécimen se coloca sobre una placa de piedra porosa y sobre la cara superior del espécimen otra piedra porosa. Este conjunto es colocado en el dispositivo de medida de contracción, adecuadamente centrado tal que la punta del dial se apoye sobre el centro de la piedra porosa. Se registran diariamente las lecturas del dial y los tiempos respectivos, en horas y minutos, hasta que las variaciones sean insignificantes o ya no se den. Se deja este conjunto en reposo, en un ambiente protegido de viento y exceso de polvo.⁶³

Los suelos lateríticos cuanto más arcillosos, más contráctiles son, presentando, sin embargo, expansibilidad baja.

⁶² NOGAMI, J y VILLIBOR, D. Pavimentacao de Baixo Custo con Solos Lateriticos. Op.cit.,. p. 98.

⁶³ MALAVER, N y TAFUR, R. Lineamientos básicos para la clasificación de suelos lateríticos-tropicales en Colombia orientado a pavimentos. Op.cit.,. p. 46.

Figura 22. Detalle del ensayo de contracción.



Tomado de: Pavimentacao de baixo custo com solos Lateríticos.

2.3.4 Ensayo de infiltrabilidad. El ensayo tiene como objetivo medir la velocidad y la cantidad de agua que penetra en capas de suelo (bases), cuando llueve durante la fase de ejecución y/u operación de la carretera. Se estima aproximadamente cuánto un frente de humedad puede desplazarse dentro del pavimento a partir de una capa no revestida y/o a través de lugares de concentración y acumulación de agua cerca de la estructura. También sirve como delimitación para determinar la distancia en que se debe encontrar las capas externas de la estructura en relación al borde de la amenaza del agua, para dimensionar su anchura, evitando así la ocurrencia de deformación.

La infiltrabilidad del suelo compactado es una propiedad importante ya que permite asociar la capacidad del suelo de absorber agua en un tiempo prolongado de contacto, esta se mide colocando la muestra sobre una placa porosa cubierta de agua, estando el recipiente de agua conectado a un tubo horizontal graduado que permite medir el movimiento del agua en la prueba, esta medida es dada por la razón entre la cantidad de agua infiltrada y la raíz cuadrada del tiempo.

Se inicia el ensayo en $t=0$, donde el tubo horizontal graduado debe estar en cero, se efectúan las lecturas en el tubo en mm en los tiempos 1,2,4,9,16... n^2 minutos, en general por un periodo mínimo de 16 horas, con los resultados obtenidos se realiza una gráfica de lecturas (ordenadas) vs tiempo (abscisas con escala $t^{1/2}$). Se calcula en coeficiente de absorción con la siguiente ecuación (2):⁶⁴

$$S = \frac{(Lb - La) * S}{10 * (tb - ta) * A} \quad (2)$$

⁶⁴ NOGAMI, J y VILLIBOR, D. Pavimentacao de Baixo Custo con Solos Lateriticos. Op.cit., p. 100.

Donde:

s = coeficiente de absorción en $\text{cm}/\text{min}^{1/2}$

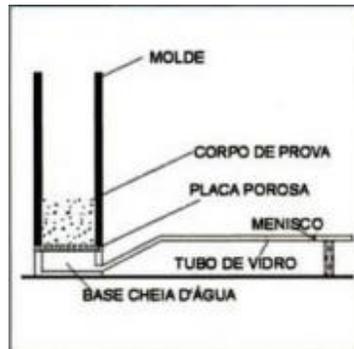
L_a, t_a = coordenadas del punto a, de la parte rectilínea de la curva obtenida.

L_b, t_b = Coordenadas del punto b, de la parte rectilínea de la curva obtenida.

S = Sección del tubo horizontal en cm^2 .

A = Sección del cuerpo de prueba en cm^2 .

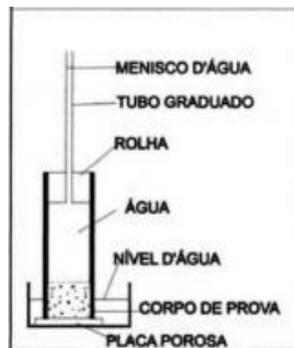
Figura 23. Detalle del ensayo de infiltrabilidad.



Tomado de: Pavimentacao de baixo custo com solos Lateríticos.

2.3.5 Ensayo de permeabilidad. La permeabilidad también es una propiedad importante para conocer el potencial drenante del suelo, esta se mide colocando el suelo compactado en un molde sellado superficialmente con un tapón que posee un tubo graduado externamente, la muestra es colocada sobre una placa porosa inmersa en agua y se mide la percolación de agua en función del tiempo. Se utiliza para cálculos de flujo de agua en medio saturado, priorizando los suelos para uso en capas de base de pavimentos.

Figura 24. Detalle del ensayo de permeabilidad.



Tomado de: Pavimentacao de baixo custo com solos Lateríticos.

Para cada contenido de humedad de compactación, el valor del coeficiente de permeabilidad k , se determina con la siguiente ecuación (3):

$$k = \frac{2,3 * A * C_b * \log_{10} * \left(\frac{H_1}{h_2}\right)}{10 * 60 * S * t} \quad (3)$$

k = Coeficiente de permeabilidad, en cm/s.

A = Altura del cuerpo de prueba en cm.

C_b = área de sección de la bureta en cm^2 .

t = intervalo de tiempo en min, correspondiente a las lecturas H_1 y H_2 .

H_1, H_2 = alturas de niveles de agua en mm, correspondiente a los tiempos t_1 y t_2 , que se determinan en el tramo rectilíneo de la curva de variación de H en función del tiempo en escala logarítmica.

S = área de la sección transversal del cuerpo de prueba en cm^2 .

Las arcillas lateríticas pueden presentar permeabilidad elevada en el tramo seco de la curva de compactación y las arenas poco arcillosas pueden tornarse prácticamente impermeables en condiciones óptimas de compactación.

2.3.6 Ensayo de compactación mini-MCV. Este ensayo tiene por objeto determinar coeficientes empíricos que se utilizan en la caracterización y clasificación de suelos tropicales que pasan en el tamiz de abertura de 2 mm. La compactación se realiza para cada humedad de los cuerpos de prueba, aplicándose sucesivamente energías crecientes hasta conseguir un aumento sensible de densidad, se recomienda utilizar dos cuerpos de prueba para cada contenido de humedad. Consiste en verificar la altura del cuerpo de prueba (ganancia de densidad) en función de un número creciente de golpes, consiguiendo entonces relacionar en peso específico del suelo en función del logaritmo del número de golpes con energías crecientes (B_n) mediante curvas, denominadas curvas de deformabilidad o de Mini-MCV, se toma una curva correspondiente a un determinado contenido de humedad y se busca su intersección con la recta de ecuación $a = 2\text{mm}$ que es paralela al eje de las abscisas, enseguida se busca el número de golpes B_i correspondiente;⁶⁵ el valor

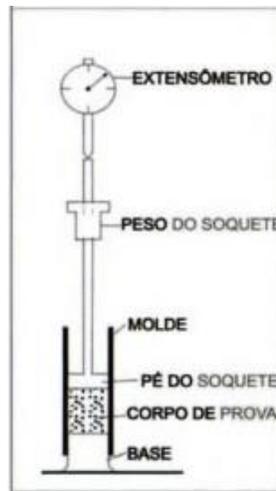
⁶⁵ NOGAMI, J y VILLIBOR, D. Pavimentacao de Baixo Custo con Solos Lateriticos. Op.cit., p. 84.

mini-MCV en función del número de golpes aplicados al cuerpo de prueba está dado por la ecuación (4):⁶⁶

$$\text{mini - MCV} = 10 \times \log_{10} B_i \quad (4)$$

Con la curva de deformabilidad correspondiente al mini-MCV igual a 10, se obtiene el coeficiente c' , utilizado en la clasificación MCT. Este ensayo también puede ser utilizado en el control de la compactación y en la predicción de la erosión.

Figura 25. Detalle ensayo Mini-MCV



Tomado de: Clasificacao de solos tropicais de granulacao fina e grossa.

2.3.7 Penetración de la imprimación. El cuerpo de prueba es compactado en una de sus caras dejando una depresión circular, la superficie del cuerpo de prueba excepto la cara de la depresión, es recubierta de parafina. El material bituminoso que se espera utilizar es derramado en condiciones estandarizadas en la depresión circular, se mide después de la cura apropiada la penetración de imprimación, si la penetración es inapropiada hay que experimentar con otro material bituminoso.

⁶⁶ MT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. Norma Rodoviária. Solos compactados em equipamento miniatura – Mini-MCV. DNER-ME 258/94. p. 2-3.

Figura 26. Detalle del ensayo de penetración de la imprimación.



Tomado de: Pavimentacao de baixo custo com solos Lateríticos.

2.3.8 Ensayo de determinación de pérdida de masa por inmersión.

Este ensayo tiene por objeto la determinación de la pérdida de masa por inmersión en agua, de suelos tropicales compactados, en laboratorio, con uso de equipo miniatura, objetivando su clasificación y previsión de su estabilidad superficial a la acción de las intemperies.⁶⁷

La muestra de suelo compactada en el molde es parcialmente extraída hasta que se obtenga una saliente de 10 mm del cuerpo de prueba cilíndrico Figura 13, luego se coloca en reposo inmerso en agua en posición horizontal por un periodo de 24 horas, una cápsula es colocada por debajo del área expuesta de la muestra para que cuando ocurra la erosión de la parte expuesta de la muestra, el suelo caiga dentro de la cápsula, con fin de medir la masa desprendida del cuerpo de prueba, el ensayo es realizado con un conjunto de cinco cuerpos de prueba compactados en unidades diferentes, recurrido el tiempo dicho, el molde y la muestra dentro de la cápsula es cuidadosamente retirado, se pone a secar la muestra para la determinación de la masa desprendida (Md). La relación entre la masa desprendida y la masa de muestra expuesta del cilindro correspondiente a 10 mm expuestos (Mt) es denominada pérdida por inmersión,⁶⁸ que se calcula con la ecuación (5):

⁶⁷ MT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. Norma Rodoviária. Solos compactados com equipamento miniatura – determinação da perda de massa por imersão DNER-ME 256/94. p. 2.

⁶⁸ BALBO, T. Pavimentação asfáltica materiais, projeto e restauração.Op.cit.,. p. 86.

$$P_i = \frac{Md * A * 10}{Mt} \quad (5)$$

A: Altura inicial del cuerpo de prueba.

Figura 27. Detalle del ensayo por pérdida de inmersión.



Tomado de: Clasificacao de solos tropicais de granulacao fina e grossa.

Los suelos lateríticos presentan un decrecimiento del valor de P_i después del contenido de humedad correspondiente al Mini-MCV =10, en el caso de arcillas y arcillas arenosas, frecuentemente el P_i próximo al Mini-MCV =10 es 0 o muy pequeño. En el caso de arenas arcillosas lateríticas, la tendencia es similar, pero ocurre un decrecimiento de P_i para Mini-MCV más elevado.⁶⁹

⁶⁹ NOGAMI, J y VILLIBOR, D. Pavimentacao de Baixo Custo con Solos Lateriticos. Op.cit., p. 104.

2.4. CLASIFICACIÓN MCT (Miniatura Compactado Tropical)

La distribución de los suelos tropicales se determina mediante un gráfico que combina el coeficiente de Deformabilidad c' el cual está asociado a la arcillosidad del suelo y el índice e' que se refiere al carácter laterítico del suelo.⁷⁰

Figura 28. Coeficientes necesarios para la clasificación MCT.



Tomado de: Clasificacao de solos tropicais de granulacao fina e grossa.

El coeficiente e' es calculado a partir del coeficiente d' (inclinación de la parte rectilínea de la rama seca de la curva de compactación, correspondiente a 12 golpes del ensayo de Mini-MCV) y de la pérdida de masa por inmersión Pi (porcentaje de la masa desglosada en relación con la masa total del ensayo cuando se somete a la inmersión en agua), expresado en la ecuación (6):

$$e' = \sqrt[3]{\left(\frac{20}{d'} + \frac{Pi}{100}\right)} \quad (6)$$

d' = coeficiente de inclinación, definido por la relación rectilínea entre la diferencia de peso específico aparente seco sobre la diferencia de entre unidades de suelo seco.

⁷⁰ MALAVER, N y TAFUR, R. Lineamientos básicos para la clasificación de suelos lateríticos-tropicales en Colombia orientado a pavimentos. Op.cit., p. 65-68

Según Nogami y Villibor⁷¹, los suelos limosos de comportamiento no laterítico se presentan frecuentemente con d' inferior a 5, en arcillas no lateríticas con d' inferior a 10 y en arcillas lateríticas con d' superior a 20, en arenas puras el valor de d' es bastante bajo y las arenas arcillosas pueden tener un valor de d' superior a 100.

Las arenas arcillosas bien gradadas poseen curvas de compactación con picos bien acentuados y un tramo seco rectilíneo, cuya inclinación se acentúa sensiblemente cuando la arcilla presente es de naturaleza laterítica. Las arcillas lateríticas también poseen curvas de forma similar con inclinación menos acentuadas.⁷²

Y por el coeficiente de deformabilidad c' , que se obtiene mediante el coeficiente angular de la parte rectilínea de la curva de deformabilidad que más se aproxima al valor Mini-MCV igual a 10, el cual se ve influenciado por la granulometría del suelo y es relativamente constante en una banda ancha de humedad el cual posee las siguientes peculiaridades:

1. Arriba de 1,5, caracteriza las arcillas y suelos arcillosos,
2. Valores bajos (inferiores a 1,0) caracterizan las arenas y los silos no plásticos o poco cohesivos.
3. En el intervalo entre 1,0 y 1,5 se sitúan diversos tipos de suelos, como arenas limosas, arenas arcillosas, arcillas arenosas y arcillas limosas.

La Tabla 14 muestra una correlación de c' con una granulometría típica de suelos lateríticos de clase L.

⁷¹ NOGAMI, J y VILLIBOR, D. Caracterização e classificação gerais de solos para pavimentação: limitações do método tradicional, citado por BALBO, T. Pavimentação asfáltica materiais, projeto e restauração. São Paulo. 2007. p. 85.

⁷² NOGAMI, J y VILLIBOR, D. Pavimentação de Baixo Custo con Solos Lateríticos. Op.cit., p. 88.

Tabla 14. Correlación del coeficiente c' con comportamiento granulométrico de clase L.

Coeficiente c' Clase L	Comportamiento granulométrico
$0 < c' < 0,7$	Areia
$0,7 < c' < 1,5$	Arenoso
$1,5 < c' < 3,0$	Argiloso

Tomado de: Clasificacao de solos tropicais de granulacao fina e grossa.

Tabla 15. Clasificación de suelos MCT a partir del coeficiente c' y la penetración del ensayo mini-MCV.

c'	Penetración (mm)	Grupo MCT
< 0,5	< 0,3	LA
	3,1 a 3,9	NA
	= 4,0	NA / NS'
0,6 a 0,9	< 2,0	LA-LA'
	2,1 a 3,9	NA'-NS'
	= 4,0	NS'-NA'
1,0 a 1,3	< 2	LA'
	2,1 a 3,9	NA'
	= 4,0	NS'
1,4 a 1,7	< 2	LA'-LG'
	2,1 a 3,9	NA'/NG'-NS'
	= 4,0	NS'-NG'
= 1,8	< 2	LG'
	2,1 a 3,9	NG'
	= 4,0	NG'

Tomado de: Lineamientos básicos para la clasificación de suelos lateríticos-tropicales en Colombia orientado a pavimentos.

Se finaliza la clasificación MCT conforme a la carta de clasificación MCT mostrada en la Figura 31, determinada para un tipo dado de suelo fino en función de los parámetros e' y c' , en la cual se emplean las siguientes nomenclaturas:

1. L indica un suelo de comportamiento laterítico. Figura 27(a).
2. N indica comportamiento no laterítico. Figura 27(b).
3. A representa arena, A' un suelo con matriz arenosa, S' suelos limosos y G' suelos arcillosos.

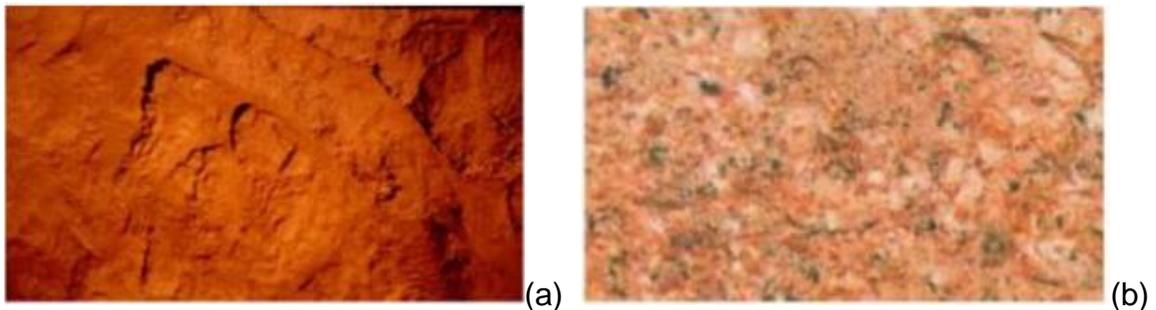
Tabla 16. Grupos de clasificación de suelos MCT.

Grupos de clasificación MCT	Descripción
LG'	Arcillas lateríticas y arcillas lateríticas arenosas
LA'	Arenas arcillosas lateríticas
LA	Arenas con poca arcilla laterítica
NG'	Arcillas, arcillas limosas y arcillas arenosas no lateríticas
NS'	Limos caoliniticos y micaceos, limos arenosos y limos arenosos no lateríticos
NA'	Arenas limosas y areas arcillosas no-lateríticas
NA	Arenas limosas con limos cuarzosos y limos arcillosos no lateríticos.

Tomado de: Lineamientos básicos para la clasificación de suelos lateríticos-tropicales en Colombia orientado a pavimentos.

Los grupos de la clasificación MCT se describen a continuación de acuerdo a Nogami y Villibor.⁷³

Figura 29. Macroestructura típica de los suelos lateríticos.



Tomado de: Revista 43 ABPv Pavimentacao.

2.4.1 Grupos de la Clasificación MCT.

2.4.1.1 Arenas lateríticas (LA): En este grupo están incluidas las arenas con pocos finos de comportamiento laterítico que presentan coeficiente c' bajo, típicas del horizonte B de los suelos cohesivos pedológicamente como arenas cuarzosas, el porcentaje de finos es muy bajo, de manera que incluso cuando son debidamente compactados, pueden ser relativamente permeables, poco cohesivos y poco contraíbles cuando están secos, propiedades poco deseables para su utilización en bases de pavimentos a pesar de su elevada capacidad de soporte y módulos de resiliencia relativamente altos.

⁷³ NOGAMI, J y VILLIBOR, D. Pavimentacao de Baixo Custo con Solos Lateriticos. Op.cit., p. 114.

La Figura 28 muestra una ocurrencia de suelo LA con acumulación de arena que generalmente poseen formas redondeadas y subredondeadas, de coloración morada, rosa o amarillo, por la presencia de óxido de hierro, originario del proceso de laterización.

Figura 30. Ocurrencia de suelo LA.



Tomado de: Clasificacao de solos tropicais de granulacao fina e grossa.

2.4.1.2 Suelos arenosos lateríticos (LA'): Suelos típicamente arenosos y constituyentes del horizonte B, presentan coeficientes c' medios. Estos suelos más allá de la presencia de los matices rojos y amarillos, presenta cortes firmes (poco o nada erosivos), nítidamente trincados, cuando se exponen a la intemperie. Cuando son debidamente compactados adquieren elevada capacidad de soporte, elevado módulo de resiliencia, baja permeabilidad, pequeña contracción por pérdida de humedad, pequeña expansibilidad por inmersión en agua, propiedades que posibilitan su utilización en bases y subbases de pavimentos.

Figura 31. Ocurrencia de suelos LA'.



Tomado de: Clasificacao de solos tropicais de granulacao fina e grossa.

2.4.1.3 Suelos arcillosos lateríticos (LG’): Este grupo está formado por arcillas y arcillas arenosas, que constituyen el horizonte B de los suelos cohesivos, presentan coeficiente c' elevado. Cuando presentan porcentajes de arena elevadas, tienen un comportamiento semejante a los suelos del grupo LA’. Poseen menor capacidad de soporte, menores módulos de resiliencia, mayor plasticidad, menor masa específica aparente seca y mayor humedad óptima; son más resistentes a la erosión hidráulica cuando son compactados adecuadamente.

Figura 32. Ocurrencia de suelos LG’.



Tomado de: Clasificacao de solos tropicais de granulacao fina e grossa.

2.4.1.4 Arenas no lateríticas (NA): Los suelos pertenecientes a este grupo son las arenas, limos y combinaciones de arenas y limos, en los cuales los granos son constituidos esencialmente por cuarzos y micas, prácticamente no posee finos arcillosos cohesivos y limos caoliníticos.

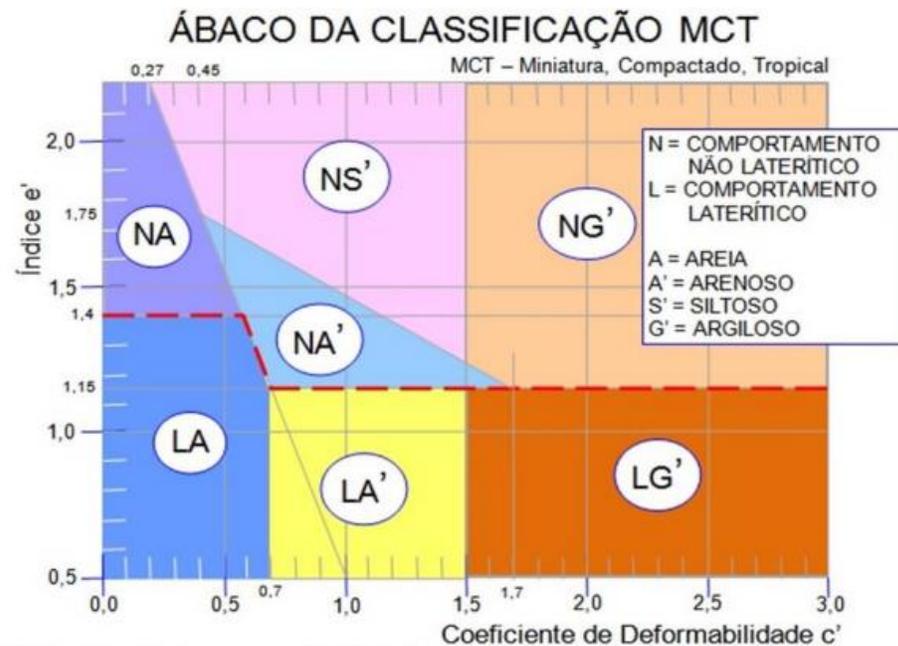
2.4.1.5 Suelos arenosos no lateríticos (NA’): Compuestos granulométricamente por mezclas de arenas cuarzosas (o de minerales de propiedades similares) con finos que pasan el tamiz de 0.075 mm, de comportamiento no laterítico. Generalmente los tipos más representativos son los suelos saprolíticos originados de rocas ricas en cuarzo tales como granitos, neis, areniscas y cuarzos impuros.

2.4.1.6 Suelos sedimentarios no lateríticos (NS’): Este grupo comprende los suelos saprolíticos limo-arenosos, resultantes del intemperismo tropical de rocas metamórficas y volcánicas, de constitución predominante de feldespatos, micas y cuarzos. La variedad más rica son las arenas provenientes de cuarzos, que pueden tener características mecánicas e hidráulicas que se aproximan a los suelos del grupo NA’.

2.4.1.7 Suelos arcillosos no lateríticos (NG'): Este grupo comprende los suelos saprolíticos arcillosos, provenientes de rocas sedimentarias arcillosas o cristalinas pobres en cuarzo y ricas en anfibolitas, piroxenos y feldespatos cálcicos. La clasificación de este grupo son suelos superficiales pedogénicos no lateríticos, como lo son vertisoles y suelos transportados.

2.4.2 Carta para la Clasificación MCT

Figura 33. Ábaco para la clasificación MCT.



Tomado de: Pavimentação asfáltica materiais, projeto e restauração.

En la carta, se puede observar que el comportamiento de suelos lateríticos empieza a manifestarse con $d' > 20$ y $P_i < 100\%$, lo que permite establecer la línea horizontal principal que corresponde a $e' = 1,15$ que separa los suelos L de los suelos N, para los suelos pobres en finos, la transición ocurre para valores más altos de P_i lo que permite establecer una línea horizontal secundaria correspondiente a $e' = 1,4$.⁷⁴ Los suelos resultantes de esta clasificación son empleados en diferentes capas de la estructura de pavimentos, como lo muestra la Tabla 17.

⁷⁴ NOGAMI, J y VILLIBOR, D. Pavimentacao de Baixo Custo con Solos Lateriticos. Op.cit., p. 111.

Tabla 17. Empleos comunes de suelos tropicales en carreteras Brasileñas.

TIPO MCT	DENOMINACIÓN	EMPLEOS EN CAPAS DE PAVIMENTOS
LA	Arenas finas	Subrasantes y refuerzos de subrasantes (eventualmente como base o sub-base)
LA'	Suelos arenosos finos	Subrasantes, refuerzos, bases y sub-bases
LG'	Arcillas lateríticas	Subrasantes y refuerzos de subrasantes
NA'	suelos arenosos no late	Subrasantes cuando no son sustituibles
NS'	Suelos limosos no lateríticos	Subrasantes cuando no sustituibles, aunque no son recomendables
NG'	Arcillas no lateríticas	Subrasantes cuando no son sustituibles

Tomado de: Pavimentação asfáltica materiais, projeto e restauração.

Los suelos de naturaleza laterítica presentan algunas particularidades bastante favorables cuando son analizados en conjunto para su aplicación como capas de pavimentos, entre ellas elevada capacidad de soporte y baja susceptibilidad en presencia de agua. En la Tabla 18 se muestran algunas peculiaridades de los suelos finos tropicales de acuerdo a la clasificación MCT.

Tabla 18. Peculiaridades de suelos finos tropicales de clasificación MCT.

GRUPO MCT	DESCRIPCIÓN	MATERIALES PRESENTES	PECULIARIDADES
NA	Arenas, limos, arenas limosas	Quarzo, mica (sericita)	Los cuarzosos son poco expansivos, Los micaceos son muy expansivos
NA'	Arenas cuarzosas con finos de comportamiento no laterítico	Rocas ricas en cuarzo (granitos, gneiss, arenitas y cuarzitos)	
NS'	Saprolíticos limo-arenosos	Feldespatos, micas y cuarzos	Baja resistencia y bajo módulo de resiliencia, muy erosionable y expansivo
NG'	Saprolíticos arcillosos	Rocas ricas en cuarzo (granitos, gneiss, arenitas y cuarzitos)	Muy plasticos, muy expansivos.
LA	Arenas con pocos finos de comportamiento laterítico	Arenas cuarzosas	Poco cohesivos, son mas erosionables que LA'
LA'	Latosoles arenosos y suelos podzólicos	Óxidos e hidroxidos de hierro, hidroxidos de aluminio	Matices rojos y amarillos poco erosionables, fisuración bastante expuesta a intemperie, elevada resistencia y módulo de resiliencia, buena cohesión, poca contracción por pérdida de humedad.
LG'	Arcillas y arcillas arenosas	Presentes en latosoles, suelos podzólicos y en tierra estructurada	Más resistentes a erosión que LA'; son permeables apesar de ser arcillas

Tomado de: Pavimentação asfáltica materiais, projeto e restauração.

Los suelos tropicales son utilizados en Brasil desde la mitad del siglo xx como materiales para las capas de base, sub-base y refuerzo de subrasantes de características pobres en pavimentos a partir del uso de la clasificación MCT de suelos arenosos finos lateríticos, arcillas lateríticas y suelos lateríticos concrecionados; como son suelos que se encuentran disponibles en varias regiones del país ha permitido una pavimentación con costos bajos de millones de vías rurales y urbanas en los que se han empleado estos materiales obteniendo resultados favorables en cuanto a su comportamiento en la estructura del pavimento.

La tabla 19 muestra las propiedades geotécnicas asociadas con las propiedades físicas de las capas en donde se utilizan los suelos lateríticos y no lateríticos y sus principales defectos constructivos.⁷⁵

Tabla 19. Propiedades físicas determinadas por los ensayos de la metodología MCT.

ENSAYO	PROPIEDADES FÍSICAS ASOCIADAS	PROBLEMAS Y DEFECTOS
Mini-CBR	capacidad de soporte (previsión)	-Deformación excesiva -Ruptura de suelo
Expansión	Aumento de volumen con contenido de humedad	-Deformación de la base -Grietas de la capa
Coefficiente de succión capilar del agua	Velocidad de penetración del frente de humedad y cantidad de agua asociada a penetración	-Ablandamiento de la parte superior de la base en época de construcción debido a lluvias -Drenabilidad lenta
Permeabilidad	Percolación del agua	-No drenante
Contracción	Contracción básica	-Desagregación por el tránsito de servicio -Grietas en las capas -Entrada excesiva de agua en la base y subrasante
Compactación	Grado de compactación del material en relación con la humedad óptima	-Deformación excesiva -Ruptura del pavimento -Grietas excesivas
Penetración de la capa de rodadura	Espesor y cantidad de material bituminoso penetrado	-Deslizamiento en la capa de rodamiento -Exudación de asfalto en la superficie de pavimento
Mini-CBR in situ	Capacidad real de soporte	-Deformación excesiva -Ruptura del pavimento
Mini-CBR en humedad de moldeo/ Mini-CBR después de inmersión	Disminución de la capacidad con aumento de la humedad	-Deformación de la base en época de construcción -Deformación excesiva en el borde del pavimento debido a la penetración lateral del agua

Tomado de: Lineamientos básicos para la clasificación de suelos lateríticos-tropicales en Colombia orientado a pavimentos.

⁷⁵ MALAVER, N y TAFUR, R. Lineamientos básicos para la clasificación de suelos lateríticos-tropicales en Colombia orientado a pavimentos. Op.cit., p. 69

La Tabla 20 muestra los valores de las propiedades geotécnicas de siete suelos de comportamiento laterítico y de siete suelos de comportamiento no laterítico. Los valores de las propiedades geotécnicas de algunos suelos determinados con el empleo de los ensayos de la Metodología MCT revelaron la inaplicabilidad de los límites estipulados por las clasificaciones tradicionales de: 25% para el límite de liquidez (LL) y el 6% para el Índice de Plasticidad (IP), para el caso de suelos y condiciones ambientales tropicales. Algunos suelos tropicales saprolíticos que presentan bajo LL y bajo IP, (dentro de los límites tradicionales anteriormente mencionados) se expanden bastante cuando se comprimen en las condiciones exigidas por las normas de carreteras e inmersas en agua.⁷⁶

Tabla 20. Principales características mecánicas e hídricas de los suelos lateríticos y no lateríticos.

Muestra No.		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Grupo MCT		LA	NA	LA'	NA'	LA'	NS'	LG'	NS'	LG'	NS'	LG'	NS'	LG'	NS'
coeficientes e índices para clasificación MCT	e'	0.5	0.35	0.8	1	1.36	0.8	1.84	0.6	1.82	1.1	1.7	1.3	1.76	1.76
	d'	66	10	66	13	80	8	65	6	67	11	25	7	30	1
	e'	1.31	2.6	1.02	1.27	0.63	1.81	0.96	1.81	0.79	1.66	0.93	1.8	0.94	1.63
	PI (%)	196	280	75	50	50	260	50	260	20	280	0	300	15	250
Masa Esp. Apar. Máx.(g/cm ²)		2.02	1.77	2.05	2	1.92	1.7	1.8	1.55	1.58	1.52	1.59	1.41	1.49	1.42
Humedad Óptima (%)		10.5	15.5	9.8	12	12.9	17	18	22.2	23	22	24	26	30	30
Mini-CBR (%)	Sin Inmersión	20	17	43	26	26	15	20	10	15	17	22	12	13	11
	con Inmersión	19	12	41	20	22	2	17	6	13	1	17	2	11	3
Expansión (%)		0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	2.1	0.1	0.8	0.1	6.3	0.3	6.5	0.4	6.5
Contracción (%)		0.2	0.1	0.2	0.3	0.2	1.1	1	0.8	1.8	0.5	1.5	0.5	5.1	2
Permeabilidad (Log k(cm/s))		-0.7	-4.1	-6.4	-5.6	-6.4	-5.6	-5.2	-5.4	-6.7	-6.1	-7.5	-5.7	-6.5	-7.2
Infiltración		-2.7	-2.1	-2.1	-1.5	-2.1	-1.5	-2	-2	-2	-1.1	-2.2	-1.1	-2.5	-2
% que pasa, Abertura en mm	2.00	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	0.42	98	55	73	96	99	92	95	100	99	99	99	100	99	100
	0.075	21	16	22	33	57	58	54	84	79	98	85	94	88	95
% de arcilla (mm) < 0.002		18	4	14	10	18	4	25	10	56	18	49	16	88	95
Límite de Liquidez (%)		NP	NP	26	25	30	12	38	38	45	46	54	56	65	50
Índice de Plasticidad (%)		NP	NP	11	11	9	10	14	14	17	19	24	26	83	88
Índice de Grupo		0	0	0	0	4	5	5	10	11	13	16	18	46	50

Tomado de: Lineamientos básicos para la clasificación de suelos lateríticos-tropicales en Colombia orientado a pavimentos.

⁷⁶ MALAVER, N y TAFUR, R. Lineamientos básicos para la clasificación de suelos lateríticos-tropicales en Colombia orientado a pavimentos. Op.cit., p. 71.

La Tabla 21 muestra los intervalos de las propiedades admisibles para que puedan ser utilizados los suelos lateríticos como bases que presenten un satisfactorio comportamiento.

Tabla 21. Propiedades mecánicas e hídricas admisibles.

Mini-CBR sin inmersión	> 40%
Pérdida de soporte por inmersión	< 50%
Expansión, sin sobrecarga	< 0,3%
Contracción	1 a 0,5%
Coefficiente de absorción (cm/min ^{1/2})	10 ⁻² a 10 ⁻⁴

Tomado de: Pavimentacao de baixo custo com solos Lateríticos.

La Tabla 22 muestra datos cualitativos sobre las propiedades consideradas más características de los suelos de la clasificación MCT para su utilización en vías, determinadas a partir de los suelos encontrados en el Estado de Sao Paulo.⁷⁷ La correspondencia numérica de cada una de las propiedades expuestas se muestra en la Tabla 23.

⁷⁷ NOGAMI, J y VILLIBOR, D. Pavimentacao de Baixo Custo con Solos Lateriticos. Op.cit.,. p. 110.

Tabla 22. Propiedades más consideradas en la clasificación MCT.

GRANULOMETRIAS TÍPICAS Designaciones del T1 - 71 del DER - SP (equivalentes de Mississippi river Comisión, USA)			Arcillas limosas	Arenas limosas	Limos limos arenosos	Arcillas arcillas arenosas arcillas limosas limos arcillosos	Arenas limosas	Arenas arcillosas	Arcillas arcillas arenosas arcillas limosas limos arcillosos
K= Caolínico m= Micáceo s= Sericítico q= Cuarzoso									
COMPORTAMIENTO			N=No Laterítico				L=Laterítico		
GRUPO MCT			NA	NA'	NS'	NG'	LA	LA'	LG
Propiedades	MINI - CBR (%)	sin inmersión	M,E	E	M,E	E	E,EE	EEE	E
		pérdida por inmersión	B,M	B	E	E	B	B	B
	expansión		B	B	E	M,E	B	B	B
	contracción		B	B,M	M	M,E	B,M	B,M	M,E
	coef de permeabilidad		M,E	B	B,M	B,M	B	B	B
	coef de adsorción		E	B,M	E	M,E	B	B	B
	Cuerpos de prueba compactados con masa específica aparente seca máxima de energía normal.			EE = Muy elevado		M = medio ver Tabla 21 para equivalente numerico		E = elevado	
Uso	base de pavimento		n	4°	n	n	2°	1°	3°
	refuerzo de subrasante compactado		4°	5°	n	n	2°	1°	3°
	subrasante compactada		4°	5°	7°	6°	2°	1°	3°
	terraplen compactado		4°	5°	6°	7°	2°	1°	3°
	protección a erosión		n	3°	n	n	n	2°	1°
	revestimiento primario		5°	3°	n	n	4°	1°	2°
n= no recomendado									
Grupos tradicionales obtenidos de muestras que se clasifican en los grupos MCT desglosados en los grupos de las tipos de las columnas	USCS		SP SM	MS CS ML	MS CS ML MH	MH CH	SP SC	SC	MH ML CH
	AASHO		A - 2	A - 4 A - 4 A - 7	A - 4 A - 5 A - 7 - 5	A - 6 A - 7 - 5 A - 7 - 5	A - 2	A - 2 A - 4	A - 6 A - 7 - 5

Tomado de: Pavimentacao de baixo custo com solos Lateríticos.

Tabla 23. Valores Numéricos de las propiedades de los grupos MCT.

SOPORTE Mini-CBR % (C/SOBRECARGA ESTÁNDAR)	Muy elevado	> 30	PÉRDIDA DE SOPORTE Mini-CBR POR INMERSIÓN %	Elevado	> 70
	Elevado	12 a 30		Medio	70 a 40
	Medio	4 a 12		Bajo	< 40
	Bajo	< 4			
EXPANSIÓN %	Elevado	> 3	CONTRACCIÓN %	Elevado	> 3
	Medio	0,5 a 3		Medio	0,5 a 3
	Bajo	< 0,5		Bajo	< 0,5
COEFICIENTE DE ADSORCIÓN -s log (cm/min ^{1/2})	Elevado	> (-1)	COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD k log (cm/s)	Elevado	> (-3)
	Medio	(-1) a (-2)		Medio	(-3) a (-6)
	Bajo	< (-2)		Bajo	< (-6)

Tomado de: Pavimentacao de baixo custo com solos Lateríticos.

2.5. ANÁLISIS QUÍMICOS.

En la Tabla 24 se muestran algunos análisis químicos de rutina aplicables a los suelos residuales tropicales.

Tabla 24. Análisis químico de rutina aplicable a suelos residuales.

PROPIEDAD DETERMINADA	REFERENCIAS	
contenido de elementos mayores	-	Pruden & King (1969)
contenido de materia orgánica	Clausula Er BS 1377:Parte 3	Kalembasa & Jenkinson (1973)
pérdida por ignición	Clausula Er BS 1377:Parte 3	-
contenido de sulfatos	Clausula Er BS 1377:Parte 3	-
contenido de carbonatos	Clausula Er BS 1377:Parte 3	Bascomb (1961)
contenido de cloruros	Clausula Er BS 1377:Parte 3	
pH	Clausula Er BS 1377:Parte 3	Schachtschabel (1971)
capacidad de intercambio catiónico	-	Bascomb (1964); Gillman (1979)

Tomado de: Suelos residuales tropicales.

Los análisis de elementos mayores pueden ser utilizados para recalcularse la composición mineralógica de conjunto si se identifican los constituyentes y su composición química individual es bien conocida; la composición de los elementos mayores proporciona la mejor evidencia de la composición mineralógica si se encuentran componentes amorfos o mal cristalizados que no pueden ser identificados por difracción de rayos X. En los análisis químicos de los suelos ricos en arcilla, es útil expresar las cantidades de los elementos mayores en relación con el óxido de aluminio, pues la mayor parte de éste se encuentra en los minerales de arcilla, y se puede tener una estimación razonablemente segura de la composición mineralógica de la fracción de arcilla sin su separación física en el laboratorio.

La relación de sílice/sesquióxidos puede ser determinada a partir de los análisis de elementos mayores con la siguiente ecuación (7):

$$K_r = (\%SiO_2/60)/(\%Al_2O_3/102) + (\%Fe_2O_3/160) \dots(7)$$

Esta expresión es usada frecuentemente para indicar la intensidad de meteorización y para diferenciar tipos de suelo. Los valores de $K_r < 2.0$ son típicos de suelos ferralíticos ricos en óxidos, ferrisoles y algunos suelos ferruginosos, en tanto que, los suelos fersialíticos y algunos suelos ferruginosos tienen valores de $K_r > 2$; las ferritas, ferralitas, allitas y la mayoría de los suelos ferralíticos endurecidos presentan valores de $K_r > 1.33$.

Sin embargo, la relación sílice/sesquióxidos depende en gran medida de la composición del material parental del suelo y en la concentración de la sílice o de los sesquióxidos por procesos diferentes a la meteorización.⁷⁸

2.5.1 Espectroscopia de fluorescencia de rayos X. Es utilizado frecuentemente para determinar la composición de elementos mayores y menores de especímenes de suelo, y sus resultados son satisfactorios para la mayoría de los elementos cuyo número atómico sea mayor que 10, pero el sodio, el magnesio y el aluminio no pueden ser determinados muy exactamente.

Este método se basa en la excitación y emisión de una radiación característica de elementos en una mezcla homogeneizada de suelo (reducida a polvo y comprimida, o fundida con borato de sodio o tetraborato de litio). La radiación fluorescente usualmente se dispersa por difracción utilizando cristales adecuados y las longitudes de ondas de la fluorescencia característica de cada elemento es medida por un contador de destello o un contador proporcional (Norrish & Happed 1967; Jasmund 1979). La concentración de cada elemento se determina por comparación de la longitud de onda diagnóstica con las intensidades de las líneas del espécimen en estándares de referencia cuya una composición es conocida.⁷⁹

2.5.2 contenido de materia orgánica. La materia orgánica del suelo afecta la cohesión, porosidad, reacciones y capacidad de intercambio iónico; se deriva de restos de plantas o animales que se agregan al suelo cuando mueren, y que posteriormente sufren descomposición a diferentes velocidades debido a la acción

⁷⁸ Geological Society Professional Handbooks. Suelos residuales tropicales. London,1997. p. 110.

⁷⁹ Geological Society Professional Handbooks. Suelos residuales tropicales. Op.cit., p. 111.

química y bacteriana.⁸⁰ Tiende a concentrarse en los 5 a 30 cm de la superficie del suelo, e influencia las características del suelo cuando su concentración aumenta por encima de 2 – 4%. Se puede determinar en función de la pérdida de peso del suelo cuando se destruye la materia orgánica o en la determinación del porcentaje de carbono orgánico presente.

Se ha demostrado que los suelos de laterita son generalmente de bajo contenido de materia orgánica, generalmente por debajo del 2% en el suelo superior. Un ejemplo, es el estudio realizado a un perfil de suelo de grava de laterita típico de África occidental el cual ha demostrado que el contenido de materia orgánica está entre 0,2 y 0,6%.⁸¹

2.5.3 pH. Puede determinarse de forma electrónica o colorimétrica, siendo el segundo más simple de realizar, se puede emplear el método de Kuhn para el trabajo en campo, donde una pequeña cantidad de suelo se agita con una solución de un indicador universal y el color resultante se compara con una tabla que da los colores obtenidos a varios valores de pH.

Los suelos de laterita tienen un medio ácido, el factor compuesto más importante que afecta la variación de los valores de pH parece ser la condición climática-vegetativa, también se cree que la naturaleza de la roca madre, el clima y las precipitaciones afectan el pH en los suelos.

2.5.4 Pérdida por ignición. Puede usarse para suelos arenosos que contienen poca o ninguna arcilla o material calcáreo. Los procesos de lixiviación y laterización reducen considerablemente las características físico-químicas de los suelos, tanto por la lixiviación de sales y los recubrimientos de sesquióxidos de los minerales arcillosos como por la mineralogía típica de los suelos lateríticos.

2.5.5 Contenido de carbonatos. El método más preciso es tratar una cantidad conocida de suelo con ácido y medir la cantidad de dióxido de carbono que se desprende al absorberlo en un álcali estándar; el dióxido de carbono que se desprende se absorbe en una solución estándar de hidróxido de bario, y el exceso de álcali se estima con ácido estándar.

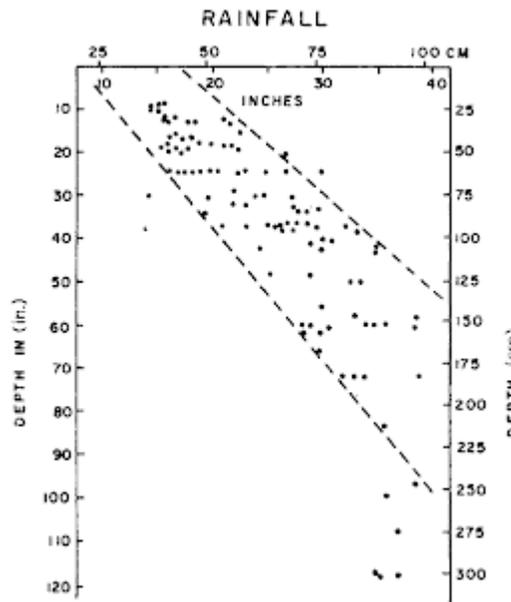
⁸⁰ GIDIGASU, M. Laterite soil engineering, Pedogenesis and engineering principles. Op.cit. p. 171-178.

⁸¹ GIDIGASU, M. Laterite soil engineering, Pedogenesis and engineering principles. Op.cit. p. 179.

La concentración de carbonato de calcio en el perfil del suelo es una función de las condiciones climáticas-vegetativas. En zonas de baja precipitación y vegetación de sabana donde la evaporación supera las precipitaciones y donde predomina un drenaje interno medio y deficiente, se pueden esperar altas concentraciones de carbonato de calcio. En cambio en zonas con un aumento en las condiciones de drenaje interno y un cambio en el medio de básico a ácido, las concentraciones de carbonato son pequeñas o inexistentes.⁸²

Según estudios, cuanto mayor sea el grado de lixiviación y laterización, menor es la concentración de carbonatos en los perfiles del suelo. En la Figura 32 se puede evidenciar como la distribución de las precipitaciones parece influir en la profundidad y el alcance de la acumulación de carbonatos en los perfiles del suelo.

Figura 34. Relación entre la precipitación y la acumulación de carbonatos.



Tomado de: Laterite Soil Engineering, Pedogenesis and Engineering Principles.

2.5.6 Capacidad de intercambio catiónico. Corresponde a la suma de los sitios cargados negativamente que se encuentran principalmente en los minerales de arcilla y en la materia orgánica, puede ser determinada por saturación con iones de bario en los suelos tropicales y en otros suelos intensamente

⁸² GIDIGASU, M. Laterite soil engineering, Pedogenesis and engineering principles. Op.cit. p. 181,193.

meteorizados, el desplazamiento de bario con Magnesio y luego la determinación de la cantidad de bario desplazado por espectrometría de absorción atómica (Gillman 1979) o por tritración con una solución estándar EDTA usando Omega Chrome Black VS como indicador (Bascombe 1964). Los resultados son expresados como miliequivalentes (mleq) por 100 g de suelo con base en el peso seco al horno (peso del suelo seco a 105°C). La capacidad de intercambio catiónico puede proporcionar alguna indicación de la composición mineralógica de la fracción arcillosa, la Tabla 25 muestra la CIC de algunos minerales típicos de arcilla.

El efecto del contenido de arcilla en la capacidad de intercambio de cationes es más pronunciado para suelos de bajo grado de lixiviación y laterización; la capacidad de intercambio de cationes depende de la superficie específica de la fracción de arcilla, sus bajos valores en suelos laterizados se atribuyeron al recubrimiento de la superficie de las fracciones arcillosas por geles de sesquióxido, que parece reducir la actividad superficial de las partículas de arcilla.⁸³

Tabla 25. Capacidades de intercambio catiónico típicos de los minerales de arcilla.

Mineral	CIC
Caolinita	3 – 15
Halloysita	5 – 50
Illita	10 – 40
Clorita	10 – 40
Alofana	25 - 50
Esmectita	60 – 150
Verruculita	100 - 150

Tomado de: Suelos residuales tropicales.

⁸³ GIDIGASU, M. Laterite soil engineering, Pedogenesis and engineering principles. Op.cit. p. 182.

2.6. MINERALOGÍA DEL SUELO Y MICROESTRUCTURA

En los suelos tropicales es importante la influencia de la microestructura y los efectos de los minerales de arcilla expansiva y de los componentes de tamaño coloidal; por estas razones es importante investigar la microestructura, la fábrica y la composición mineral de los suelos. Los métodos más utilizados comúnmente son la microscopía óptica, la microscopía de barrido electrónico, la difracción de rayos X, los análisis termodiferencial y termogravimétrico y la espectroscopia infrarroja.

2.6.1 Microscopía óptica. Facilita la identificación de partículas mayores que 10 μm y sus relaciones con otros componentes en dos dimensiones. Los diferentes elementos de la microfábrica del suelo vistos en sección delgada incluyen rasgos que resultan de la meteorización de los minerales, de la iluviación de la arcilla y de otras partículas, de la reorientación de partículas por expansión y contracción de la segregación hidromórfica del hierro y del manganeso, o de actividades de animales en el suelo.

Se realiza una impregnación con una resina que pueda endurecerse después de aplicada; la porosidad o la abundancia de minerales específicos puede ser estimada mediante el conteo por puntos, en esta técnica se identifica un número grande de granos (> 300) o de vacíos en las intersecciones de una malla localizadas con la retícula del ocular del microscopio mediante una platina de conteo; el porcentaje de cada mineral o de los poros se calcula a partir de la proporción de puntos asignados a cada uno, esto da un porcentaje volumétrico confiable en el supuesto de que no hay una anisotropía mayor en el espécimen. La distribución del tamaño y de las formas de los poros mayores pueden ser determinados en las secciones delgadas observadas a través del microscopio con una cámara de video, utilizando un computador provisto de programa de análisis de imagen. Los poros llenos con la resina de impregnación son identificados mejor si se agrega un tinte fluorescente a la resina y la sección delgada se ilumina con luz ultravioleta.⁸⁴

Los componentes de los minerales raros en las fracciones de arena fina (62 – 250 μm) o de limo grueso (10 - 62 μm) se pueden identificar mejor mediante el examen microscópico de estos tamaños, separados de especímenes de suelo disgregado

⁸⁴ Geological Society Professional Handbooks. Suelos residuales tropicales. Op.cit., p. 114.

por tamizado y sedimentación repetida en agua, debido a que las secciones delgadas muestran solo un volumen pequeño de suelo.

2.6.2 Microscopía electrónica de barrido. Es utilizado para el estudio de la microestructura del suelo y para la confirmación de la presencia de minerales específicos (incluyendo los minerales de arcilla) a partir de sus morfologías características. El microscopio electrónico de barrido aprovecha las propiedades que resultan cuando un rayo de electrones, que es absorbido, reflejado o transmitido, incide sobre un objetivo. El microscopio electrónico de barrido normalmente utiliza un rayo incidente de electrones en el intervalo de 1 a 50 keV (Electronvoltio), para examinar un área pequeña del espécimen y se sincroniza con un monitor para producir la imagen relacionada con los electrones reflejados o con los electrones secundarios dispersos. La Tabla 26 muestra la información que puede obtenerse de la operación de un microscopio electrónico de barrido.

Tabla 26. Información que puede obtenerse de la operación de un microscopio electrónico de barrido.

Tipos de información	Modos
Estructural y topográfica	Dispersión reversa, absorción reflectiva, luminiscencia conductiva.
Composición química	Rayos X, electrones Auger, luminiscencia reflectiva, absorción.
Cristalográfica	Rayos X (líneas de patrones de Kossel) transmisión, patrones de canalización de electrones.
Eléctrica y magnética	Dispersión reversa, reflexión, conducción.

Tomado de: Suelos residuales tropicales.

Los especímenes se preparan rompiendo una superficie fresca de la cual pueden retirarse cuidadosamente los fragmentos sueltos con cinta adhesiva. La base del espécimen debe ser lisa y fijada a la base del aparato con un buen conductor como la plata. El espécimen de suelo debe ser cubierto con una capa delgada (aproximadamente 20 nm) de oro-paladio, carbón u otro material conductor debido a que la resolución es disminuida por los materiales no conductores, está cubierta proporciona una trayectoria a tierra para cualquier carga superficial inducida por el rayo. Las observaciones de la microestructura y de la fábrica del suelo pueden ser hechas convenientemente con aumentos de x200 a x1000, pero para estudiar la morfología de los minerales de arcilla se requiere una resolución de 15 a 10 nm.

La mayor parte de los estudios de microscopía electrónica de barrido de la microestructura de los suelos tropicales ha sido cualitativa, aunque el nivel de medición puede mejorarse tomando pares estereoscópicos de fotografías. Esto puede conseguirse fotografiando la imagen antes y después de un pequeño cambio en el ángulo de inclinación. Las mediciones pueden ser hechas con un estereoscopio convencional.⁸⁵

2.6.3 Difracción de rayos X. Es indispensable para la identificación de los minerales presentes en los suelos tropicales, esta técnica debe ser utilizada como procedimiento de rutina siempre que sea posible y tiene considerable ventaja para el análisis mineralógico de suelos tropicales ricos en hierro. Para el análisis de una muestra total el tamaño de grano de un espécimen representativo debe ser reducido cuidadosamente a menos de 10 μm ; en el caso de los especímenes de material muy fino en el que las arcillas mal cristalizadas son abundantes, es conveniente separar la fracción coloidal ($> 2 \mu\text{m}$) o subdividirla en fracciones más uniformes (0.6 – 0.2 μm , 0.2 – 0.6 μm y $< 0.2 \mu\text{m}$) y analizar cada fracción por separado.

Los picos de difracción resultantes de la práctica, se identifican inicialmente en el registro del análisis y se miden como un ángulo (2θ) que es el doble del ángulo de desviación (θ) del rayo difractado, los valores 2θ se convierten luego en espaciamiento de mallas (d) en unidades Angstrom (\AA). Los patrones de los minerales en los especímenes analizados pueden ser identificadas mediante el JCPDS Powder Diffraction Index (1974).

2.6.4 Análisis térmico de arcillas. Sirve para proporcionar información que es complementaria a la contenida por la difracción de rayos X debido a que diferentes propiedades químicas y físicas contribuyen a los resultados que se obtienen; la técnica del análisis termodiferencial mide la diferencia en temperatura entre un espécimen y un material de referencia mientras los dos son sometidos a un programa de temperatura controlada, se registra los cambios de masa de un espécimen al aumentar la temperatura; la calorimetría de barrido diferencial mide la diferencia en la entrada de energía entre un espécimen y un material de referencia mientras los dos son sometidos a un programa de temperatura controlada; el análisis de gas desprendido registra la naturaleza y cantidad desprendida por un espécimen durante un programa controlado de temperatura. En la Tabla 27 se muestran las temperaturas típicas de reacciones endotérmicas y exotérmicas de algunos minerales de arcilla.⁸⁶

⁸⁵ Geological Society Professional Handbooks. Suelos residuales tropicales. Op.cit., p. 114.

⁸⁶ Geological Society Professional Handbooks. Suelos residuales tropicales. Op.cit., p. 119.

Tabla 27. Temperaturas características de picos endotérmicos y exotérmicos de minerales.

Mineral	Picos endotérmicos (°C)	Pico exotérmico (°C)
Caolinita	500 - 600	900 - 1000
Halloysita	100 - 150 500 - 600	900 - 1000
Crisotilo	700 - 750	800- 850
Esmectita	100 - 250	800- 900
Vermiculita	700	-
Illitas	150 - 200 500 - 700	-
Clorita	500 - 600	750 - 850
Paligorskita	100 - 150 400 - 450	-
Sepiolita	100 - 150 300 - 350	850 - 900
Gibssita	300 - 350	-
Goetita	-	550
Carbonatos	500 - 800	-

Tomado de: Suelos residuales tropicales.

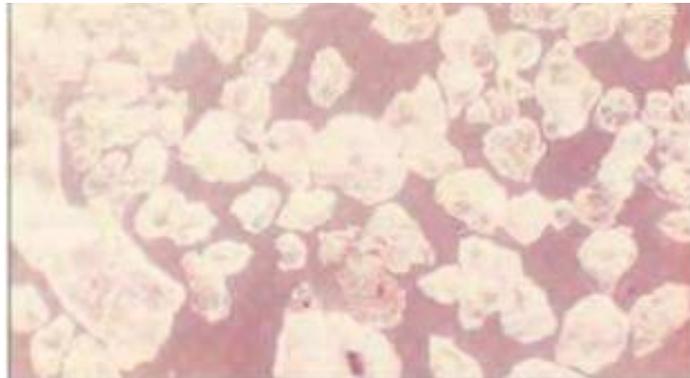
2.6.5 Espectroscopia infrarroja. Puede aplicarse a materiales cristalinos o amorfos, los espectros normalmente se obtienen a temperaturas de 30 - 40°C, usando preferiblemente fracciones separadas de arcilla o especímenes molidos hasta < 2 µm, en los suelos tropicales es particularmente útil para la identificación de los óxidos de aluminio, los óxidos hidratados y anhidros de hierro, los filosilicatos, fosfatos y carbonatos. Los especímenes se humedecen con alcohol isopropílico para evitar la modificación estructural durante la molienda, el polvo seco se mezcla luego con un haluro alcalino, como el bromuro de potasio en una relación de 1:100 y se comprime para formar un disco en un molde evacuable.

2.7. APLICACIONES DE LA METODOLOGÍA MCT EN LAS CAPAS DE LA ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO.

La Metodología MCT permitió el desarrollo de nuevos tipos de bases y subbases para pavimentos formados por suelos tropicales considerados inadecuados por los criterios tradicionales.

2.7.1 Suelo arenoso fino laterítico (SALF). Estos suelos se encuentran en extensas áreas de Brasil, según el DER/SP (Departamento de Estradas de Rodagem) son aquellos suelos que poseen un comportamiento laterítico según la clasificación MTC de LA, LA' o LG', tienen un porcentaje superior al 50% retenido en el tamiz nº 200 siendo la fracción de arena constituida de granos de cuarzo, son empleados como materiales en capas de base y subbase de pavimentos.

Figura 35. Suelo superficial laterítico con cuarzo arenoso.

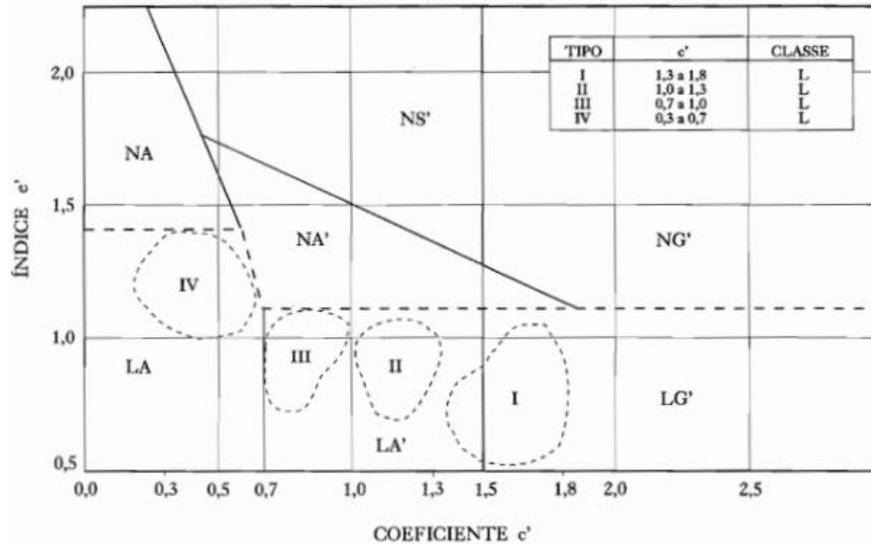


Tomado de: Pavimentacao de baixo custo com solos Lateríticos.

El SALF, se divide en 4 tipos, I,II,III y IV que se distribuyen dentro de la clasificación MCT como se muestra en la Figura 34, cada tipo de SALF influencia considerablemente las operaciones constructivas de la base.⁸⁷

⁸⁷ NOGAMI, J y VILLIBOR, D. Pavimentacao de Baixo Custo con Solos Lateríticos Parte II. Op.cit.,. p. 27

Figura 36. Jerarquización de los SALF de acuerdo a la clasificación MCT.

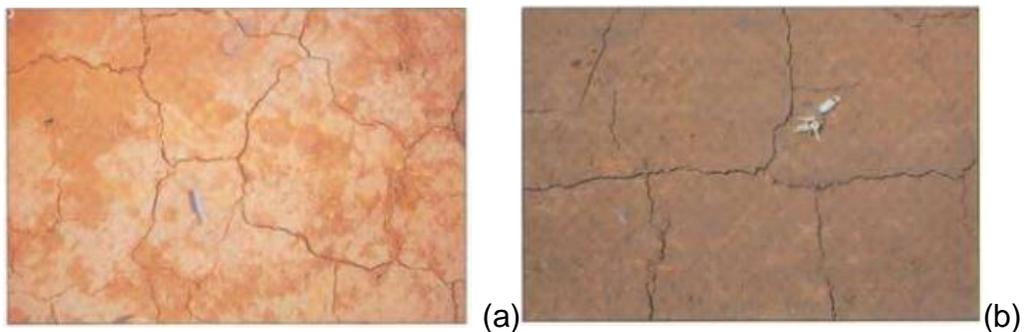


Tomado de: Pavimentacao de baixo custo com solos Lateríticos.

SALF de tipo I (c' de 1,3 a 1,8)

- Posibilidad de excesiva contracción por secado, produciendo en la base agrietamiento y la formación de bloques de dimensiones reducidas del orden de 20x20 cm, Figura 35a.
- Excesivos daños en la superficie de la base bajo la acción de tráfico, por la disgregación de los bordes de los bloques, resultando en la ampliación de las grietas en su parte superficial y posibilitando eventual aumento de humedad por penetración del agua.

Figura 37. Agrietamiento debido al secado de la base.



Tomado de: Pavimentacao de baixo custo com solos Lateríticos.

SALF de tipo II (c' de 1,0 a 1,3)

- Excelente compactibilidad, alcanzando fácilmente el grado de compactación 100% y relativamente una masa específica aparente seca máxima en energía intermedia.
- Fácil acabado de la superficie de la base y bajo desgaste superficial por la acción del tráfico.
- Baja contracción por secado, resultando a la formación de bloques de dimensiones del orden de 50x50 cm, Figura 35b.
- Satisfactoria receptividad a la imprimadura bituminosa, proporcionando buena adherencia al revestimiento.
- Superficie y borde de la base menos susceptible al ablandamiento debido al humedecimiento excesivo, proporcionando una buena resistencia a la erosión hidráulica.

SALF de tipo III y IV (c' de 0,3 a 1,0)

- El grado de compactación alcanza valores aproximados de 90% y masa específica aparente seca máxima correspondiente a la energía intermedia.
- Propensión a la formación de láminas, en el acabado de la base.
- Dificultad en el acabado superficial de la base y desgaste excesivo por la acción del tráfico.
- Superficie y borde de la base muy susceptible al ablandamiento debido al humedecimiento, presentando elevado grado de erosión hidráulica.

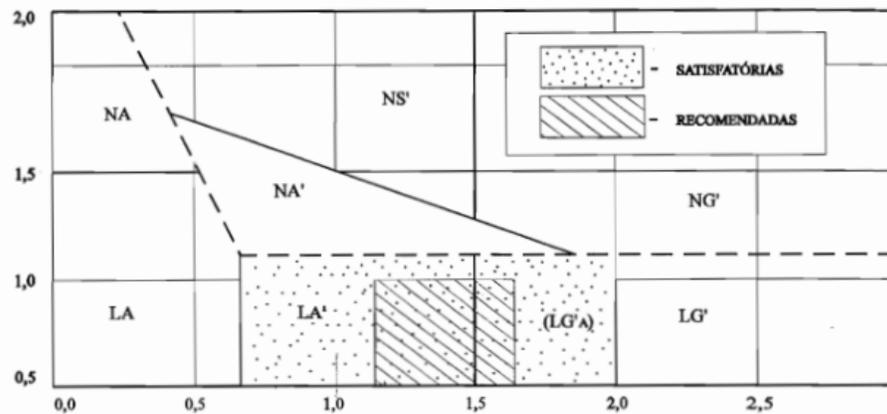
Dosificación de las mezclas:

Nogami, Villibor y Serra⁸⁸ recomiendan utilizar el siguiente procedimiento:

- a) Clasificar los componentes según la metodología MCT, obteniendo la localización en el gráfico clasificatorio y la variación de soporte con y sin inmersión.
- b) Descartar los componentes no lateríticos a no ser que sean arenas cuarzosas del grupo NA y no fueron determinadas visualmente limos y arenas micáceas en abundancia.
- c) Buscar componentes cuya mezcla conduzca a suelos-agregados que se localicen en el área achurada de la gráfica de la Figura 36.

⁸⁸ NOGAMI, J y VILLIBOR, D. Pavimentacao de Baixo Custo con Solos Lateriticos. Op.cit., p. 110.

Figura 38. Áreas satisfactorias y recomendadas para las mezclas de suelo-agregados.



Tomado de: Pavimentacao de baixo custo com solos Lateríticos.

- d) Ejecutar mezclas experimentales clasificándolas según la metodología MCT y determinar la variación de soporte con y sin inmersión.
- e) Escoger siempre las mezclas que cumplen las propiedades satisfactorias de acuerdo a los criterios de la Tabla 21 cuando es compactado con energía intermedia.
- f) Considerar en la elección final de la mezcla, otros factores que interfieren en el costo total de la base a ser construida, como las propiedades mecánicas e hidráulicas que ofrezcan mayor coeficiente de seguridad, menor costo de exploración, menor costo de transporte y de operaciones constructivas.

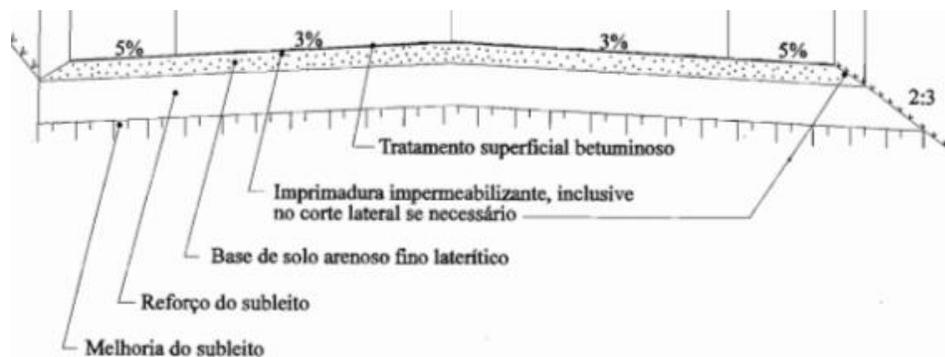
La construcción de la base con este suelo se realiza de la siguiente manera⁸⁹:

1. Se retira el material del depósito y se transporta al lugar de aplicación.
2. Se esparce el suelo sobre la superficie previamente compactada.
3. Se adiciona agua y se mezcla hasta homogeneizar.
4. Se compacta el suelo inicialmente con rodillo pata de cabra o de neumáticos a baja presión, luego se aplica alta presión para evitar fisuramiento en la superficie.
5. Después de compactada y acabada superficialmente la base, se deja secar libremente por un periodo que puede variar entre 48 a 60 horas. El buen secado proporciona un aumento considerable de soporte y mejora las condiciones del recubrimiento de imprimadura bituminosa. También permite determinar el patrón de agrietamiento.

⁸⁹ BALBO, T. Pavimentação asfáltica materiais, projeto e restauração.Op.cit., p. 161.

6. Una vez seca la base es necesario realizar un barrido para eliminar el material suelto, luego se hace un riego ligeramente de agua variando de 0,5 a 1,0 l/m², con el fin de facilitar la penetración de imprimadura.
7. 15 minutos después de realizada la imprimación, se realiza la distribución del material bituminoso, cuidando de no dejar residuos para evitar exudación e inestabilidades.
8. Si la base es de SALF tipo III o IV, que tienen baja cohesión, se debe construir después de la imprimadura una capa de protección que consiste en un tratamiento superficial simple.

Figura 39. Sección típica de un pavimento vial con base SALF.



Tomado de: Pavimentacao de baixo custo com solos Lateríticos.

2.7.2 Suelo arcilloso laterítico y arena (ALA). La mezcla de suelos arcillosos lateríticos que pasa el tamiz 0,075 mm (# 200) y arena, se realiza con el fin de obtener un material con características similares al SALF, en el caso de contar con suelos lateríticos arcillosos LG', estos se deben corregir con arena laterítica cuarzosa y/o arena lavada de río, por el contrario, si hay presencia de arena laterítica LA, se debe añadir suelo arcilloso laterítico. Estas mezclas se recomiendan para uso en capas de subbases de vías sometidas a tráfico pesado, y para tráfico ligero se utilizan para capas de bases.

Algunos problemas asociados al uso de arcillas lateríticas son: capacidad de soporte y módulos de resiliencia debajo de los valores límites especificados para bases de pavimentos con revestimientos bituminosos y desarrollo de grietas en la superficie del pavimento que producen degradación de éste por la infiltración de agua.

El aumento de la capacidad de soporte y de los módulos de resiliencia se han conseguido mediante la utilización de energías de compactación mayores a las

tradicionales, teniendo como base la energía intermedia, dejar sacar parcialmente la capa después de la compactación, impermeabilización bituminosa para evitar la entrada de agua, incrustación superficial de grava; y para evitar el desarrollo de grietas se aconseja llenar las grietas con arena fina, usar geotextiles y utilizar mezclas bituminosas de tipo aglutinante debajo del revestimiento.⁹⁰

2.7.3 Suelo-grava, suelo-agregado o suelo estabilizado granulométricamente (SLAD). El aprovechamiento de suelos con propiedades indeseables para su uso en carreteras se realiza mediante la estabilización de suelos con agregados; muchos de estos suelos son los suelos no lateríticos o suelos lateríticos de tipo LA', LA y LG'.

Las bases de suelos-agregados pueden ser consideradas como pertenecientes al grupo de bases granulares, debido a que generalmente contienen más de 50% de agregado constituido de fracción retenida en el tamiz de 0,075 mm.

Las mezclas de suelo-agregado discontinuas son mezclas de suelo con agregados o materiales bridados mal gradados. Los tipos de mezclas más comunes utilizadas en muchas regiones de Brasil como capas de base y subbase para tráfico liviano y pesado son las de suelo arenoso fino laterítico y agregados pétreos de granulometría uniforme, suelos arcillosos lateríticos y agregados uniformes y suelos lateríticos concrecionados; los criterios tradicionales de dosificación limitan en cerca de 25% la cantidad de suelo en la mezcla que debe presentar IP próximo a cero.⁹¹

Cuando las mezclas tienen en su constitución suelos lateríticos que se sitúan en las áreas IV, esta mezcla tendrá un comportamiento con características que se aproximan a un material granular no cohesivo, en el caso de que el suelo se sitúe en el área I o II, la mezcla tendrá comportamiento de un material granular cohesivo. Las bases ejecutadas con las mezclas anteriores tienen las siguientes características:⁹²

⁹⁰ NOGAMI, J y VILLIBOR, D. Pavimentacao de Baixo Custo con Solos Lateriticos Parte II. Op.cit.,. p. 63.

⁹¹ BALBO, T. Pavimentação asfáltica materiais, projeto e restauração.Op.cit.,. p. 162.

⁹² NOGAMI, J y VILLIBOR, D. Pavimentacao de Baixo Custo con Solos Lateriticos Parte II. Op.cit.,. p. 57.

2.7.3.1 Bases de suelo laterítico- Grava discontinua, con uso de suelo arenoso fino laterítico (SLBD-A)

Mezclas poco o no cohesivas:

- Ninguna contracción de la base por secado al aire.
- Permeabilidad elevada.
- Baja cohesión de base acabada.
- Elevada penetración de imprimadura impermeabilizante.
- Pequeña susceptibilidad a segregación de suelo y de grava por procesos de exudación de la base.
- En determinadas condiciones ambientales, presentan elevada pérdida de humedad en la parte superior de la capa.

Mezclas cohesivas:

- Pueden presentar contracción de la base por secado al aire, con aparición de pequeñas grietas.
- Baja permeabilidad.
- Bases cohesivas facilitando su adherencia a la capa de rodamiento
- Alcanza con facilidad un grado de compactación de 95% correspondiente a la masa específica aparente seca de energía modificada.
- Elevada susceptibilidad a segregación de suelo y de grava por procesos de exudación de la base.
- Pequeña pérdida de humedad superficial de colocación al ser compactado.

La mezcla de suelo-agregado para base puede ser realizada en planta o en campo por una pala cargadora, mediante el siguiente procedimiento:

- Transportar la grava hasta el yacimiento de suelo, o a la cantera, cuando el suelo esté almacenado.
- Mezclar en volumen el suelo humedecido o seco con el fin de alcanzar el contenido de humedad adecuado, con la grava en proporciones adecuadas, el propio volumen de cucharón del cargador deberá ser utilizado como unidad de medida.
- Transportar la mezcla hasta el lugar de aplicación y descargar, luego nivelar con motoniveladora.
- Después de ajustar la capa, ajustar la humedad si es necesario, por la acción combinada de rodillos e irrigadora.
- Determinar el equipo de compactación de acuerdo al tipo de suelo que integra la mezcla. Iniciar la compactación con un rodillo de presión variable, completar 3 pasadas, ajustar la humedad a través de irrigación y esperar la penetración de la humedad en el suelo-grava, pasar la motoniveladora y el

rodillo de neumáticos para completar la compactación, el número de pasadas depende del equipo a usar.

- Se realiza el procedimiento recomendado para SALF para la imprimación.

La mezcla puede ser realizada en campo con el uso de cargadores o de motoniveladora para la distribución de los agregados y la compactación se realiza con rodillos vibratorios. Para este tipo de estabilización, en lateritas, los valores típicos de CBR son mayores al 40% y depende del porcentaje de finos.

Un suelo arenoso fino mezclado con 40% a 70% de grava, cuando se compacta con las condiciones cercanas de la masa específica aparente máxima de la energía modificada, presenta un CBR generalmente por encima del 100%.

2.7.3.2 Bases de suelo –grava discontinua con uso de arcilla laterítica (SLBD-G)

La arcilla debe pertenecer al grupo LG', para facilitar las operaciones constructivas, se debe utilizar grava de diámetro máximo que pase el tamiz de 25 mm de abertura y sin cantidad apreciable de fracción que pasa el tamiz de 2 mm de abertura. La presencia de finos en la grava hace que presenten dificultades en la homogeneización de la fracción más pequeña de la muestra. La grava utilizada debe tener elevada resistencia a la abrasión, el valor de desgaste en la máquina de los Ángeles debe ser inferior al 20% para garantizar que no se formen finos en las operaciones constructivas. ⁹³

2.7.4 Suelo laterítico concrecionado (SLC). Se originan de la cementación por óxidos de hierro y aluminio de granos de suelos estables, incluyendo sílices y cuarzos en el horizonte laterítico de los perfiles de suelo, pueden presentar elevado grado de cementación, dureza y resistencia, presentándose en forma de concreciones con colores más definidos, estos suelos desempeñan buen comportamiento como bases de pavimentos en vías con bajo volumen de tráfico en el interior del país.

Debe aplicarse los ensayos normalmente aceptados para evaluar los materiales más débiles para agregados, como el ensayo modificado del impacto de

⁹³ NOGAMI, J y VILLIBOR, D. Pavimentacao de Baixo Custo con Solos Lateriticos Parte II. Op.cit.,. p. 62.

agregados o el ensayo de 10% de finos. Dichos ensayos deben ejecutarse en muestras secas y saturadas.⁹⁴

En regiones con gran escasez de agregados pétreos como lo es el Norte de Brasil, las lateritas también son tamizadas y empleadas como agregados para mezclas asfálticas y concretos.

Para determinar el módulo de resiliencia de los suelos finos lateríticos y no lateríticos y suelos lateríticos concrecionados se realizaron diferentes estudios de los cuales se determinaron algunas expresiones, uno de ellos es el estudio realizado por Cardoso⁹⁵, quien mediante ensayos de CBR y pruebas triaxiales dinámicas correlacionó los parámetros con el fin de determinar el módulo de resiliencia de suelos arcillosos finos lateríticos, de la cual llegó a la ecuación (8)

$$M_r = \frac{179,0412 * CBR^{1,08774} * \theta^{1,43833}}{\sigma_1^{1,18598}} \left[\frac{lb}{pul^2} \right] \quad (8)$$

Otra correlación es la planteada por Preussler⁹⁶ quien planteó una correlación entre el valor de módulo de resiliencia y el CBR del suelo, para una humedad en el punto óptimo o un poco arriba, después de la muestra estar saturada por inmersión por cuatro días, el resultado se muestra en la ecuación (9)

$$M_r = 32,6 + 6,7 * CBR \quad [MPa] \quad (9)$$

De acuerdo a resultados obtenidos por otros ensayos para los suelos de la metodología MCT el módulo de resiliencia tiene algunas peculiaridades, para las arcillas lateríticas LG' y los suelos arenosos finos lateríticos LA' los valores de Mr son mayores a 200 MPa, para arenas limosas LA' y arenas cuarzosas LA un Mr de

⁹⁴ Geological Society Professional Handbooks. Suelos residuales tropicales. Op.cit., p. 119.

⁹⁵ CARDOSO, S.H. Procedure for flexible airfield pavement desing based on pavement deformation, citado por BALBO, T. Pavimentação asfáltica materiais, projeto e restauração. São Paulo. 2007. p. 235.

⁹⁶ PREUSSLER, E. Estudo da deformação resiliente de pavimentos flexíveis e aplicação ao projeto de camadas de reforço, citado por BALBO, T. Pavimentação asfáltica materiais, projeto e restauração. São Paulo. 2007. p. 355.

150 MPa y para lateritas conformadas en cantos rodados areno limosos el Mr puede llegar entre 300 - 600 MPa.

2.7.5 Materiales estabilizados con cementos. Se encuentra el suelo mejorado con cemento (SMC) con la cual la capa realizada con esta mezcla presenta reducida susceptibilidad al agua lo que lo hace menos expansivo, es normalmente empleada en capas de refuerzo de subrasante y eventualmente en capas de subbase, y el suelo-cemento (SC) que constituye una mezcla de suelo con un dado contenido de cemento que tiene como objetivo proporcionar una mayor resistencia a una capa que trabaja a flexión, es utilizada en capas de base y subbase.⁹⁷

De acuerdo a ensayos realizados por Larsen⁹⁸ a este tipo de estabilización, las mezclas SMC son aquellas en que el contenido de cemento es inferior a 7% en masa o 8% en volumen y las mezclas SC son aquellas que tienen contenidos de cemento no inferiores a 7% en masa o 8% en volumen para los suelos finos, siltosos y arcillosos.

Las mezclas mencionadas anteriormente se pueden realizar en planta o en campo, en planta se realiza mediante el uso de un mezclador donde el suelo es introducido junto con el cemento adicionando agua para obtener la humedad de compactación; en el caso de mezcla en campo se realiza el siguiente procedimiento:

1. Dispersar el suelo en el espesor dado.
2. Realizar una corrección de humedad del suelo
3. Colocar el cemento en sacos, controlando el volumen de este en función del volumen del suelo suelto, luego homogeneizar utilizando pulvimezclador.
4. Compactar la mezcla con rodillo de pata de cabra o de neumáticos de presión regulable o rodillo liso.
5. Ejecutar la imprimación de la superficie acabada para la protección del material.

2.7.6 Suelo-cal (SCA). Se trata de una mezcla de suelos expansivos con cal hidráulica, que resulta en reacciones que se producen por presencia de humedad,

⁹⁷ BALBO, T. Pavimentação asfáltica materiais, projeto e restauração.Op.cit., p. 198-200.

⁹⁸ LARSEN,T. J. Ensaios de bases de solo-cimento e de solo modificado por cimento en Minnesota, citado por BALBO, T. Pavimentação asfáltica materiais, projeto e restauração. São Paulo. 2007. p. 198-199.

cuando la cal reacciona con la sílice o con óxidos de aluminio resulta una modificación que puede estabilizar a la expansibilidad de los suelos. Antes del curado de la mezcla puede dar menor susceptibilidad al agua y aumento de la resistencia, en el caso de la mezcla aún no curada la cal proporciona mayor plasticidad y trabajabilidad del material.⁹⁹

Se debe utilizar una cantidad pequeña de cal en relación al volumen total de suelo, ya que puede generar reacciones puzolánicas y afectar varios factores como el pH, la mineralogía y el grado de madurez del suelo, haciendo posible la producción de cristales expansivos durante las reacciones de hidratación que resultan indeseables para la estabilización.

Para realizar la mezcla en campo se deben seguir los siguientes procedimientos:

1. Preparar el suelo (distribución) ya con la humedad de compactación.
2. Aplicar cal hidratada por aspersion (pulverización) o en sacos estratégicamente posicionados en función del volumen del suelo.
3. Alternativamente, aplicar cal en forma de lodo para mantener la humedad óptima de compactación.
4. Mezclar el suelo y la cal utilizando rodillos.
5. Compactar la mezcla por medio mecánico, utilizando rodillo de pata de cabra y de neumáticos.

Cuando la mezcla es empleada como material de refuerzo de subrasante o como subbase, su dosificación se puede dar con el empleo del criterio de CBR (para CBR mayor a 20%) y la aprobación del módulo de resiliencia.

Los dos componentes principales que reaccionan con la cal son la alúmina y la sílice, esta reacción es una reacción a largo plazo y se traduce en una mayor resistencia si la mezcla de cal y suelo se cura durante un periodo de tiempo.

Se pueden obtener valores de Mr para mezclas SCA de 700 MPa y para mezclas SC de cerca de dos veces el mencionado anteriormente, es conveniente mencionar que una mezcla SCA puede presentar problemas de pérdida de resistencia a lo largo del tiempo, sin embargo, estas pueden presentar capacidad de autoreparación con algún grado de resistencia; Larsen propuso una expresión para determinar el valor de Mr estimado en función del consumo de cemento en peso (c), de acuerdo a la ecuación (10).

⁹⁹ BALBO, T. Pavimentação asfáltica materiais, projeto e restauração.Op.cit., p. 201.

$$M_r = 140,62 * c^{1,85} \quad [MPa] \quad (10)$$

2.8. PROPUESTA DE UNA CLASIFICACIÓN PARA SUELOS TROPICALES DE GRANULACIÓN GRUESA, G-MCT.

Los suelos de ocurrencias de granulación gruesa están constituidos de concreciones lateríticas y/o de cuarzo. La clasificación se fundamenta en la definición de los tipos de granulometría del suelo y la clasificación MCT de la fracción que pasa el tamiz de 2 mm de abertura.¹⁰⁰

Figura 40. Yacimiento de suelo de granulación gruesa de concreción laterítica.



Tomado de: Clasificacao de solos tropicais de granulacao fina e grossa.

Inicialmente es importante realizar una clasificación visual-táctil de muestras, con el fin de identificar su composición gruesa. Para esta clasificación se utiliza una muestra de 50 kg la cual debe ser compactada de acuerdo a la ABNT-NBR 6457:2016, la cual especifica un método para la preparación de muestras de suelos para los ensayos de compactación y de caracterización (análisis granulométrico y determinación de límites de liquidez y plasticidad, de masa específica de las partículas que pasan el tamiz de 4,8 mm de abertura, de masa específica aparente y de adsorción de agua por los granos retenidos en el tamiz

¹⁰⁰ VILLIBOR, D y LANCAROVICI, D. Clasificacao de solos tropicais de granulacao fina e grossa. Rio de Janeiro. 2017. p. 28.

de 4,8 mm)¹⁰¹; para después dividirla en dos partes para realizar el procedimiento clasificatorio que consta de dos fases:

- Fase 1: Determinación de los tipos granulométricos específicos, para la G-MCT, utilizando $\frac{3}{4}$ de muestra. Mediante la norma ABNT-NBR 7181:1984 de acuerdo con el porcentaje de material que pasa el tamiz de 2,0 y 0,075 mm y después definir los tipos granulométricos específicos: suelo con roca (Sp), roca con suelo (Ps) o granular fino (Gf).
- Fase 2: Determinación de la clasificación MCT del suelo resultante de la fracción que pasa el tamiz de 2 mm de abertura, por medio del tamizado de $\frac{1}{4}$ de la muestra. Después de establecer el tipo granulométrico, se realiza la determinación MCT mediante los ensayos de compactación Mini-MCV y de pérdida de masa por inmersión.

Figura 41. Programa de ensayos para la clasificación G-MCT.



Tomado de: Clasificacao de solos tropicais de granulacao fina e grossa.

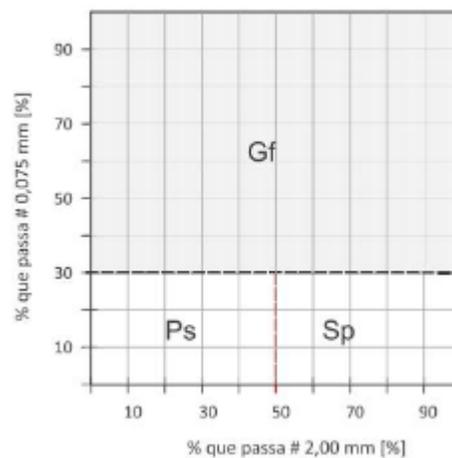
2.8.1 Determinación del tipo granulométrico específico de suelo granular.

¹⁰¹ ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Amostras de solo — Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. ABNT-NBR 6457:2016.

Con los resultados del ensayo del análisis granulométrico de suelos de la fase 1, se definen los tipos granulométricos de G-MCT de acuerdo a la Figura 40.

- Tipo Ps: constituido de grava (P) con suelo (s), definidos por: % que pasa # 2,0 mm < 50% y % que pasa # 0,074 mm < 30%.
- Tipo Sp: Constituido de suelo (s) con grava (p), definidos por: % que pasa # 2,0 mm > 50% y % que pasa # 0,074 mm < 30%.
- Tipo Gf: Constituido de material granular (G) con media a elevada cantidad de finos (f), definidos por: % que pasa # 2,0 mm < 100% y % que pasa # 0,074 mm > 30%.

Figura 42. Grafica de los tipos granulométricos específicos de suelos de granulación gruesa.



Tomado de: Clasificacao de solos tropicais de granulacao fina e grossa.

2.8.2. Clases y grupos de la clasificación G-MCT. En la Tabla 28 se definen todas las combinaciones de los grupos y clases de G-MCT y los valores de las propiedades de un suelo de un determinado grupo, así como la jerarquización de su uso; las utilizaciones de los mejores grupos deben ser definitivamente indicados por medio de los valores obtenidos en los ensayos para los fines que se especifican.

Tabla 28. Clasificación G-MCT.

CLASSIFICAÇÃO G-MCT									
Granulometria			Grupo MCT da parte fina da amostra						
% que passa		Tipos	LA	LA'	LG'	NA	NA'	NS'	NG'
# nº 10	# nº 200		Classe GL			Classe GN			
2,0 mm	0,075 mm		Grupo G-MCT do solo de granulação grossa						
< 50	< 30	Ps	Ps-LA	Ps-LA'	Ps-LG'	Ps-NA	Ps-NA'	Ps-NS'	Ps-NG'
> 50	< 30	Sp	Sp-LA	Sp-LA'	Sp-LG'	Sp-NA	Sp-NA'	Sp-NS'	Sp-NG'
-	> 30	Gf	Gf-LA	Gf-LA'	Gf-LG'	Gf-NA	Gf-NA'	Gf-NS'	Gf-NG'

Tomado de: Clasificacao de solos tropicais de granulacao fina e grossa.

Tabla 29. Propiedades y jerarquización de los grupos de la clasificación G-MCT.

Granulometrias típicas		Ps: grava con suelo			Sp: suelo con grava			Gf: granular fino		
Grupos MCT de finos (< 2,00 mm)		LA			LA'			LG'		
Características de suelos granulares		Grava con arena laterítica	arena laterítica con grava	suelo granular fino con arena laterítica con grava	Grava con suelo arenoso laterítico	suelo arenoso laterítico con grava	suelo granular fino arenoso laterítico con grava	Grava con suelo arcilloso laterítico	suelo arcilloso laterítico con grava	suelo granular fino arcilloso laterítico con grava
grupo G-MCT		Ps-LA	Sp-LA	Gf-LA	Ps-LA'	Sp-LA'	Gf-LA'	Ps-LG'	Sp-LG'	Gf-LG'
CBR	Inmersión con sobrecarga	E, EE			E			E, EE		
	Expansión (Es)	B			B			B		
contracción (C)		B			B			B		
coeficiente de permeabilidad (kg)		E, EE			M, E			E		
Propiedades estimadas en CPs compactados		EE = Muy elevado E = elevado								
Base y sub-base de pavimento		2°			5°			1°		
Refuerzo y /o subrasante compactado		1°			4°			2°		
Protección a erosión y revestimiento primario		n			5°			1°		

n = no recomendado

Ps: grava con suelo			Sp: suelo con grava			Gf: granular fino			Ps: grava con suelo		
NA			NA'			NS'			NG'		
Grava con arena no laterítica	arena no laterítica con grava	suelo granular fino con arena no laterítica con grava	Grava con suelo arenoso no laterítico	suelo arenoso no laterítico con grava	suelo granular fino arenoso no laterítico con grava	Grava con suelo limoso no laterítico	suelo limoso no laterítico con grava	suelo granular fino limoso no laterítico con grava	Grava con suelo arcilloso no laterítico	suelo arcilloso no laterítico con grava	suelo granular fino arcilloso no laterítico con grava
Ps- NA	Sp- NA	Gf- NA	Ps- NA'	Sp- NA'	Gf- NA'	Ps- NS'	Sp- NS'	Gf- NS'	Ps- NG'	Sp- NG'	Gf- NG'
E, EE			E			E, EE			E, EE		
B			B			B			B		
B			B			B			B, M		
E			M, E			E			M, E		
M = Medio B = Bajo											
2°		n		1°		n		4°		n	

n = no recomendado

Tomado de: Clasificacao de solos tropicais de granulacao fina e grossa.

Los suelos Ps y Sp que presentan menos del 30% de material que pasa el tamiz de 0,075 mm, presentan un esqueleto granular bien gradado, generalmente adecuado para la transmisión de esfuerzos, lo que le permite su utilización en

capas de bases y sub-bases de pavimentos. Un parámetro de resistencia mínima aceptable para bases y subbases con pocos finos está en el orden de 65 a 70% de abrasión en la máquina de los Ángeles.

2.8.3. Cantidad de fracción que pasa el tamiz de 0,075 mm. Para suelos granulares con menos del 30%, los mejores suelos para base son los de clase GL, dando prioridad, a los Ps y Sp, con finos de los grupos LA', LA y LG'.

Los suelos granulares con más de 30%, pueden ser utilizados para base y subbase, priorizando los de la clase GL y más granulares.

2.8.4. Cantidad de fracción que pasa el tamiz de 2,0 mm. Los suelos granulares con menos de 15%, presentan baja influencia en el desempeño independientemente del comportamiento L o N de sus finos. Estos suelos presentan un buen comportamiento como capa de base.

Los suelos granulares entre 15 a 30% presentan mejor desempeño para capas, estos son los finos de la clase L.

Los suelos granulares con más de 30%, cuanto mayor es el porcentaje de la fracción que pasa el tamiz de 2 mm se priorizan los de la clase GL.

2.9. SUELOS LATERÍTICOS EN INDIA

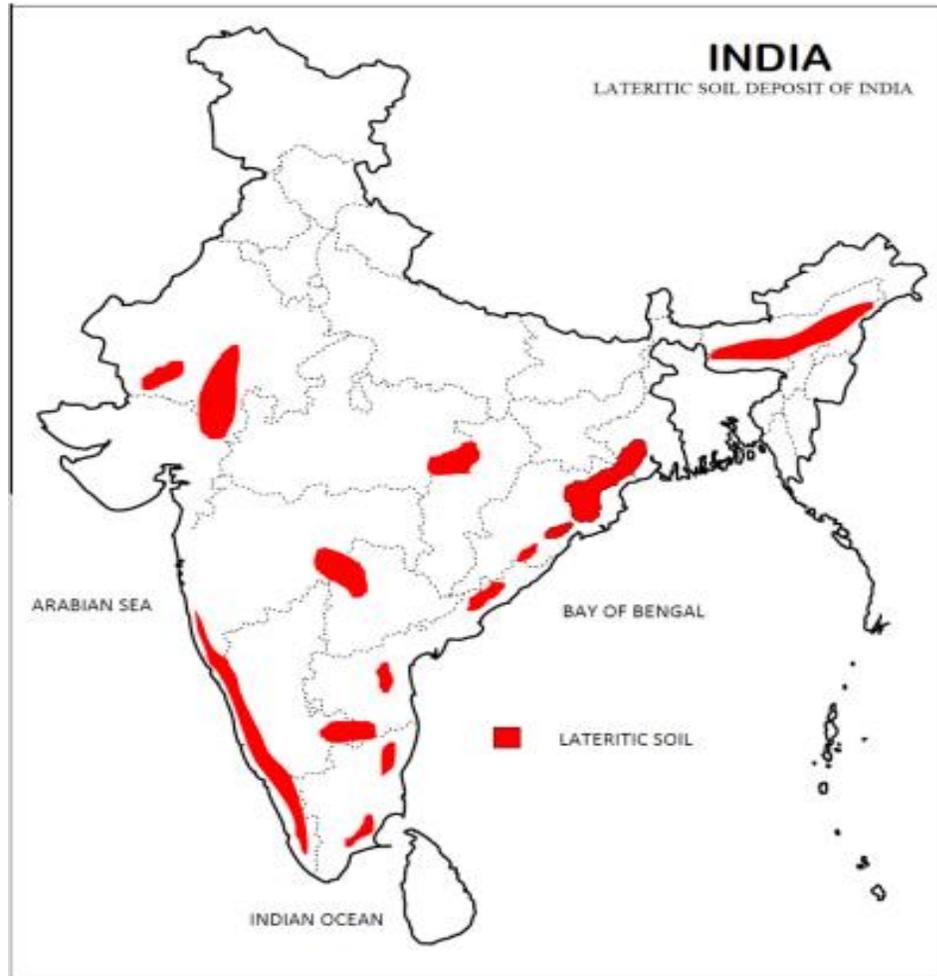
La India es otro de los países donde el uso de suelos lateríticos en pavimentos es común, ya que es una región donde son escasos los agregados triturados, lo cual hace que sea necesario el uso de agregados disponibles localmente, como lo es el suelo laterítico, en la Figura 41 se muestra la distribución de suelos lateríticos en la India; es por ello que en los últimos años se ha ido implementando una tendencia hacia el diseño mecanicista de los pavimentos, donde se requieren las propiedades mecánicas de los materiales utilizados en las diferentes capas de la estructura del pavimento, como el módulo elástico y relación de Poisson.

En la India, se encuentran grandes depósitos de lateritas, como en los límites de Traps del Decán; donde el grosor de la cubierta puede tener a veces 100 pies; generalmente hay una capa de material altamente ferruginoso en la superficie, debajo de la cual hay una capa de laterita aluminosa o bauxita. La precipitación anual en la India varía de 2000 a 4000 mm, mientras que las temperaturas medias anuales varían de 23 a 34 ° C.¹⁰²

Se ha determinado que las lateritas indias de Calicut en Kerala y Rajahmundry en Andhra Pradesh contienen minerales de halloysita, caolinita, goethita, gibbsita y cuarzo, se ha reportado un pH ácido que varía de 6.1 a 6.9 para las lateritas de Kerala y Andhra Pradesh, los contenidos relativamente altos de materia orgánica del 7 al 10% están presentes en las lateritas de Calicut en Kerala y Rajahmundry en Andhra Pradesh. Sin embargo, se informa un rango mucho más bajo de contenido de materia orgánica que varía de cero a 1.3% para las lateritas de Goa y Kerala central; algunos autores informan una relación muy baja de sílice / alúmina de 0,1 a 0,54 para las lateritas de Kerala, y relaciones de sílice / alúmina de 0.71, 0.18, 0.12 y 1.12 para lateritas de Andhra Pradesh, Assam, Maharastra y Madhya Pradesh, respectivamente.

¹⁰² BUJANG, B, TOLL, D y PRASAD, A. Handbook of Tropical Residual Soils Engineering. 2013. p. 494.

Figura 43. Localización de suelo laterítico en la India.



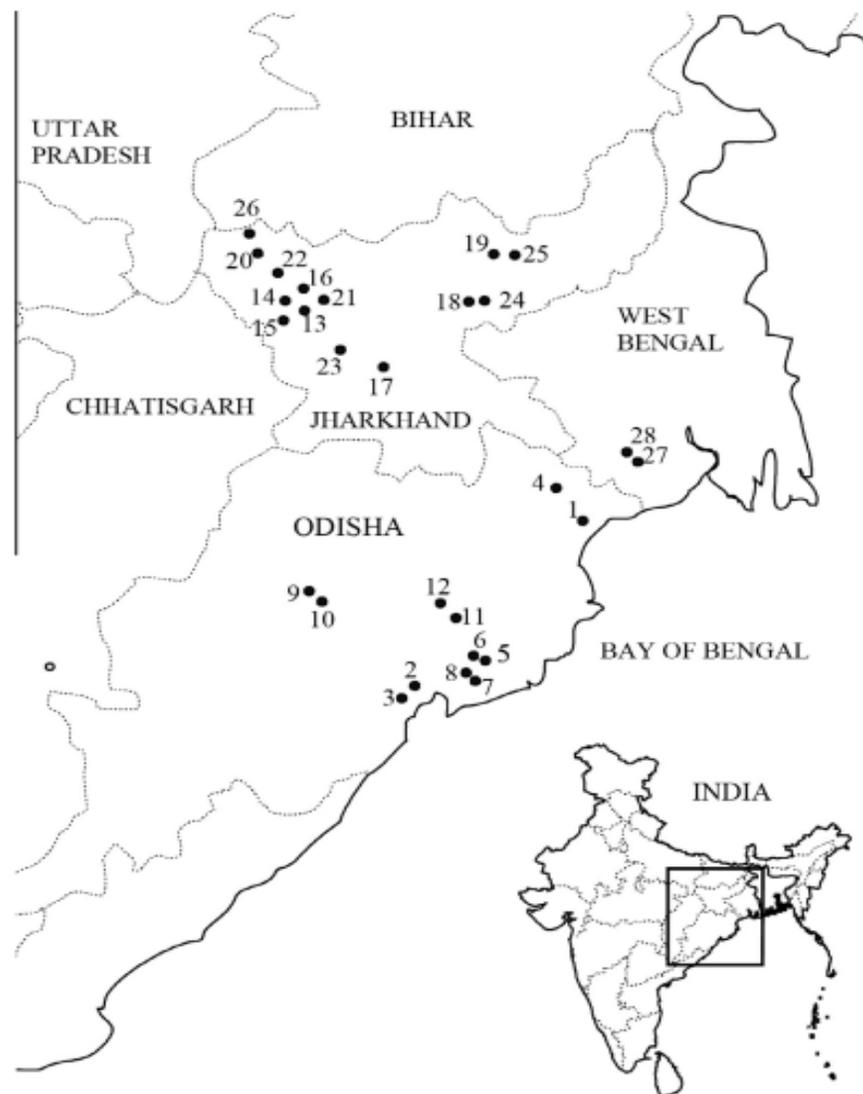
Tomado de: Characterization of granular lateritic soils as pavement material

Estudios realizados como el de Biswal,¹⁰³ a 28 muestras de suelos lateríticos tomados de tres canteras diferentes del oriente de la India, mostradas en la Figura 42; las cuales se emplearon para la realización de laboratorios para la caracterización y evaluación de las propiedades mecánicas de tales suelos granulares, cuyo objetivo era establecer modelos de módulo de resiliencia no lineal adecuados para estos suelos granulares y el desarrollo de correlaciones adecuadas entre el módulo de resiliencia y los parámetros del suelo como CBR; se realizaron pruebas de laboratorio como gradación y propiedades índice como análisis de tamaño de partículas, límites de Atterberg y pruebas de compactación

¹⁰³ BISWAL, D.R. Characterization of granular lateritic soils as pavement material. Odisha, India. 2015. p. 1-4.

de acuerdo a los estándares Indios IS: 2720 parte 4 (1985), IS: 2720 parte 5 (1985) y IS: 2720 parte 8 y pruebas de resistencia como UCS (Unconfined compressive strength) según IS: 2720 parte 10 (1991) y CBR según IS: 2720 parte 16 (1987), el análisis mineralógico de muestras lateríticas se llevó a cabo mediante la técnica de difracción de rayos X y se realizaron pruebas triaxiales de carga repetidas para determinar el módulo elástico de los suelos lateríticos granulares compactados según las pautas de AASHTO T-307 (2003).

Figura 44. Ubicación de las muestras de suelo laterítico granular recogidas para el estudio.



Tomado de: Characterization of granular lateritic soils as pavement material

Una vez realizados los diferentes procedimientos de estudio se obtuvieron los resultados mostrados a continuación:¹⁰⁴

Tabla 30. Resumen de las propiedades básicas del suelo.

Sample No	Region	% Retained on 4.75 mm sieve	% passing 75 μ	LL	PI	Soil Type as per ISCS
S1	Balasure, Odisha	94.7	0.04	48	22	GW
S2	Banapur, Odisha	41.93	0.03	45	19	SW
S3	Banapur, Odisha	37.9	0.06	35	10	SW
S4	Baripada, Odisha	95.26	0.02	34	10	GW
S5	Bhubaneswar, Odisha	72.97	0.57	43	17	GW
S6	Bhubaneswar, Odisha	46.17	0.31	51	14	SW
S7	Khurdha, Odisha	30.1	0.42	40	15	SW
S8	Khurdha, Odisha	26.13	0.28	36	12	SW
S9	Sonepur, Odisha	42.45	0.17	68	38	SW
S10	Sonepur, Odisha	47.41	0.3	67	37	SW
S11	Kamakhyanager, Dhenkanal, Odisha	75.21	0.26	48	14	GW
S12	Dhenkanal, Odisha	69.87	0.89	52	17	GW
S13	Latehar Sadar, Jharkhand	20.84	3.64	42	17	SW
S14	Barwadih, Jharkhand	17.77	1.66	37	13	SW-SM
S15	Garu, Jharkhand	21.88	3.78	43	17	SW-SM
S16	Manlika, Jharkhand	22.69	1.99	52	31	SW-SM
S17	Ranchi, Jharkhand	40.43	0.66	35	18	SW-SM
S18	Bokaro, Jharkhand	65.05	0.63	27	6	GW
S19	Jamua, Giridih, Jharkhand	21	2.13	42	20	SW-SM
S20	Palamu, Jharkhand	18.54	2.77	33	13	SC
S21	Latehar, Jharkhand	25.78	4.31	32	10	SC
S22	Chianki, Jharkhand	26.96	2.13	36	13	SW-SM
S23	Kuru, Jharkhand	26.76	3.14	47	19	SW-SM
S24	Bokaro, Jharkhand	22.87	2.58	52	29	SW
S25	Bengabad, Jharkhand	26.98	1.14	42	16	SW-SM
S26	Hussainabad, Jharkhand	25.45	0.98	47	19	SW-SM
S27	Medinapore, West Bengal	75.34	0.13	58	19	GW
S28	Medinapore, West Bengal	61.93	0.25	60	35	GW
Range		18-96	0-4.31	27-68	6-38	
Mean		43	1.3	44.7	18.6	

Tomado de: Characterization of granular lateritic soils as pavement material

De la tabla 30 se puede observar que las muestras recolectadas contienen 0-5% de sedimentos y arcillas, el tamaño máximo de partícula de las muestras recolectadas es de 25 mm, según la especificación de carreteras y puentes de MORTH (Ministerio de Transporte y Carreteras, Gobierno de la India), los límites superior e inferior de la subbase granular de materiales son de 75 mm y menos de 25 micrones. Por lo tanto, satisface los requisitos de gradación de subbase granular, también se puede observar que el límite de líquido (LL) en su mayoría varía entre 30 y 55, excepto en tres casos, donde los valores informados son 60, 67 y 68 y el índice de plasticidad varió entre 6 y 38.

¹⁰⁴ BISWAL, D.R. Characterization of granular lateritic soils as pavement material. Op.cit., p. 4-12.

Tabla 31. Resumen de las propiedades básicas del suelo.

Sample No	w_{unc} (%)	MDD (kN/m^3)	Soaked CBR (%)	UCS (kPa)
S1	10.4	23.6	22	520
S2	9.6	21.7	26	250
S3	9.2	22.8	29	240
S4	9.4	22.4	20	760
S5	8.4	22.2	28	360
S6	13	21.3	29	400
S7	14	19.2	23	720
S8	12.9	19.8	20	500
S9	8.5	21.5	27	950
S10	9.3	21.2	26	900
S11	9.7	22.7	35	760
S12	12.8	19.8	29	760
S13	8.5	20.76	28	740
S14	9.8	20.9	24	370
S15	8.8	21.4	26	460
S16	9.2	21.2	25	440
S17	8.4	21.6	26	525
S18	9.6	21.4	28	800
S19	8.1	21.6	21	430
S20	8.5	21	22	950
S21	8.8	20.8	28	780
S22	10	21.4	22	720
S23	9.7	22.7	30	460
S24	8.4	21.2	24	360
S25	9.6	21.3	24	460
S26	9.6	20.6	23	410
S27	12.3	21.4	28	260
S28	10.4	21.5	29	280
Range	8.1-14	19.2-23.6	20-35	240-950
Mean	9.9	2.15	26	566

Tomado de: Characterization of granular lateritic soils as pavement material

De la Tabla 31 se puede observar que los valores de CBR de las muestras se encuentran entre el 20 y el 35%. Los valores de UCS varían en un amplio rango de 200–950 kPa.

En la tabla 32 se muestra el resultado del análisis de todas las muestras donde se confirma la presencia de una cantidad sustancial de cuarzo (Qt) y alguna cantidad de feldespato, hematita (Ht), goetita, moscovita como minerales no arcillosos, se puede evidenciar que la caolinita (Kt) es el mineral de arcilla predominante presente en la mayoría de las muestras, además también se muestra que la illita (Il) está presente en algunas muestras de suelo lateríticas.

Además se evaluaron los módulos resistentes a partir de los resultados de pruebas triaxiales de carga repetidas y se utilizaron para encajar en cuatro modelos constitutivos no lineales para suelos lateríticos granulares, de los cuales se pudo observar que el modelo universal propuesto por Witczak-Uzan¹⁰⁵ proporcionó un buen coeficiente de correlación para todos los suelos y se

¹⁰⁵ WITCZAK MW, UZAN J. The universal airport pavement design system, citado por BISWAL, D.R. Characterization of granular lateritic soils as pavement material. Odisha, India. 2015. p. 9.

consideró como el mejor modelo para describir el comportamiento no lineal del suelo laterítico granular.

Tabla 32. Resumen de las propiedades básicas del suelo.

Sample Id	Clay minerals	major non-clay minerals
51	Kaolinite	Quartz, goethite, hematite
52	Kaolinite	Quartz, goethite, muscovite
53	Kaolinite	Quartz, goethite, muscovite, biotite
54	Kaolinite	Quartz, goethite, muscovite
55	Kaolinite	Quartz, goethite, hematite
56	Kaolinite	Quartz, goethite, hematite
57	Kaolinite	Quartz, goethite, hematite
58	Kaolinite	Quartz, goethite, hematite, muscovite
59	Illite, kaolinite	Quartz, feldspar, muscovite
510	Illite, kaolinite	Quartz, microcline, muscovite, biotite
511	Kaolinite	Quartz, goethite, hematite, muscovite
512	Kaolinite	Quartz, goethite, magnetite, muscovite
513	Kaolinite	Quartz, biotite magnetite
514	Kaolinite, montmorillonite	Quartz, magnetite
515	Kaolinite, montmorillonite	Quartz, muscovite, microcline
516	Kaolinite, halloysite	Quartz, feldspar, muscovite
517	Kaolinite	Quartz, goethite, muscovite
518	Very little kaolinite	Quartz, goethite, muscovite, magnetite
519	Kaolinite	Quartz, muscovite, microcline
520	Kaolinite	Quartz, muscovite, microcline, mica
521	Kaolinite	Quartz, muscovite, feldspar, mica
522	Kaolinite	Quartz, biotite, muscovite, hematite
523	Kaolinite	Quartz, biotite, hematite
524	Kaolinite	Quartz, magnetite, muscovite
525	Kaolinite	Quartz, Magnetite, biotite
526	Kaolinite	Quartz, muscovite, microcline
527	Very little kaolinite	Quartz, biotite, goethite
528	Very little kaolinite	Quartz, biotite, goethite

Tomado de: Characterization of granular lateritic soils as pavement material

Los resultados obtenidos de estos laboratorios fueron comparados con parámetros obtenidos por diferentes autores que anteriormente habían estudiado las características de arcillas lateríticas, suelos lateríticos y gravas lateríticas secadas al aire, en la Tabla 33 se muestran los rangos de algunos de los parámetros tomados como referencia.

Tabla 33. Parámetros de suelos lateríticos obtenidos por diferentes autores.

PARÁMETROS	RANGO
Limite líquido	25-63
Indices de plasticidad	5-42
Humedad óptima	9%-19%
Densidad seca máxima	1.3 - 2.4 g/cm ³
Ángulo de fricción efectivo para arcillas lateríticas	20-30
Angulo de fricción efectivo para gravas lateríticas	30-40
CBR del suelo laterítico australiano	35% - 90%
CBR del suelo laterítico Nigeria según Bello (2012)	26% – 34%
CBR del suelo laterítico Nigeria según Ugbe (2011)	3% – 43%
CBR del suelo laterítico Nigeria según Bayewu (2011)	16% – 29%

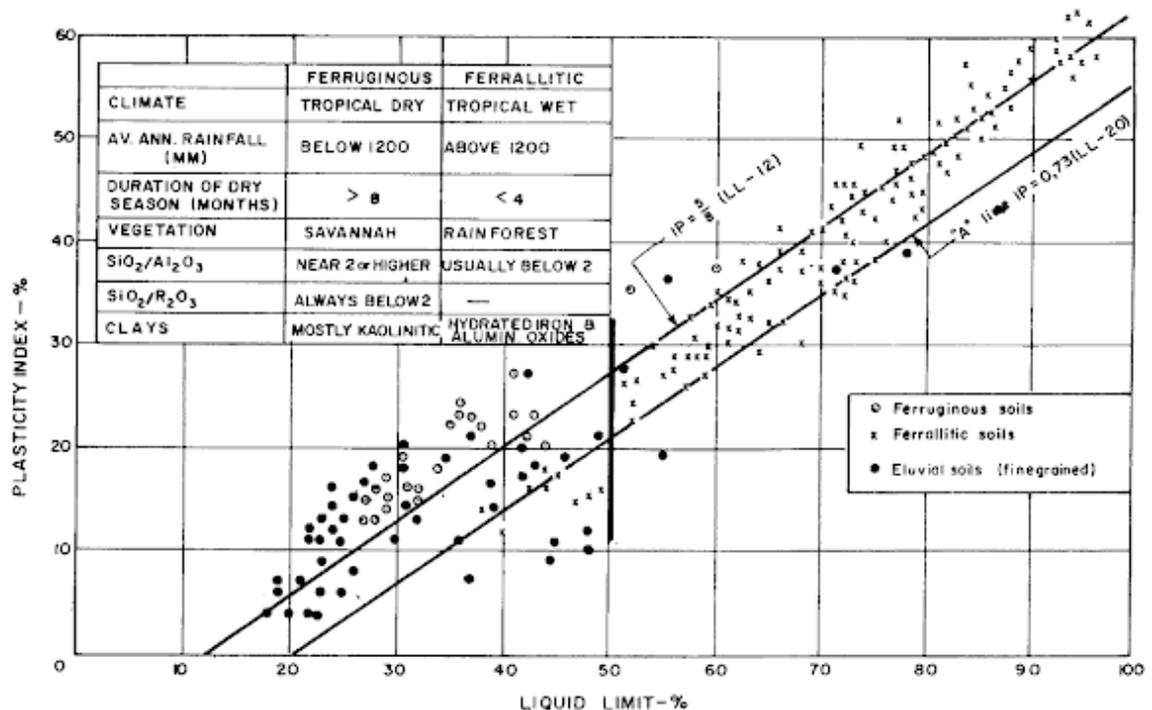
Tomado de: Characterization of granular lateritic soils as pavement material

De los resultados y análisis anteriores realizados por el estudio de Biswal, se encuentra que los suelos lateríticos granulares disponibles en esta región satisfacen los requisitos como material de subbase en términos de gradación y parámetros de resistencia, pero fallan en las características de plasticidad.

2.10. SUELOS LATERITICOS EN ÁFRICA

Varios investigadores informaron sobre la relación entre el clima y las características de plasticidad de los suelos de laterita, por ejemplo Remillon propuso una agrupación generalizada de suelos de laterita de África occidental y central basada en las condiciones vegetativas climáticas, mostrada en la Figura 45, donde se observó que los suelos ferruginosos o sea aquellos que se forman en áreas tropicales secas bajo vegetación de sabana con precipitación promedio menor a 1200 mm/año tienen un límite líquido y un índice de plasticidad por debajo del 50% y 30% respectivamente, y los suelos ferralíticos, o sea los formados en áreas húmedas de selva tropical con una precipitación promedio de más de 1200 mm/año tienen un límite líquido y un índice de plasticidad por encima del 50% y 30% respectivamente.

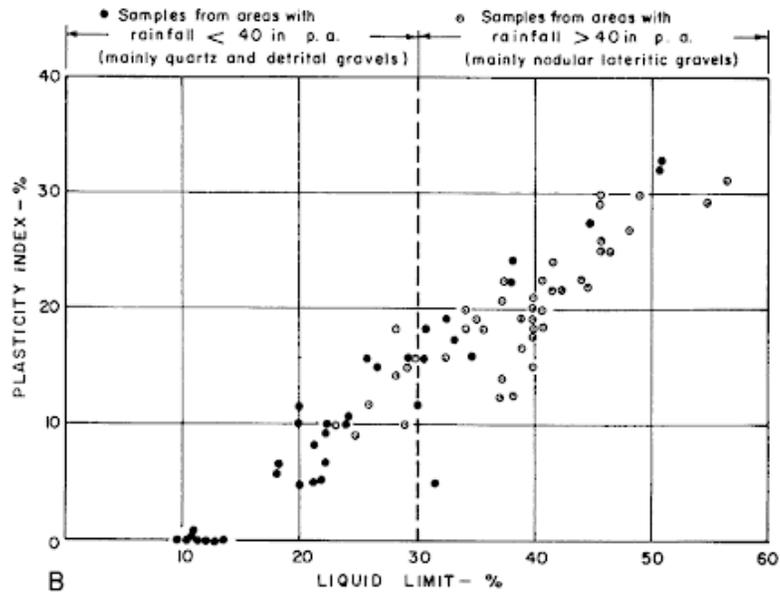
Figura 45. Clasificación de la plasticidad de los suelos de laterita en relación a las condiciones climáticas.



Tomado de: Laterite Soil Engineering, Pedogenesis and Engineering Principles.

Otro autor como Clare, también encontró una correlación significativa entre la lluvia y la plasticidad para algunos suelos de laterita formados en África central, mostrado en la Figura 46.

Figura 46. Clasificación de la plasticidad de los suelos de África central en relación con la distribución de las precipitaciones.



Tomado de: Laterite Soil Engineering, Pedogenesis and Engineering Principles.

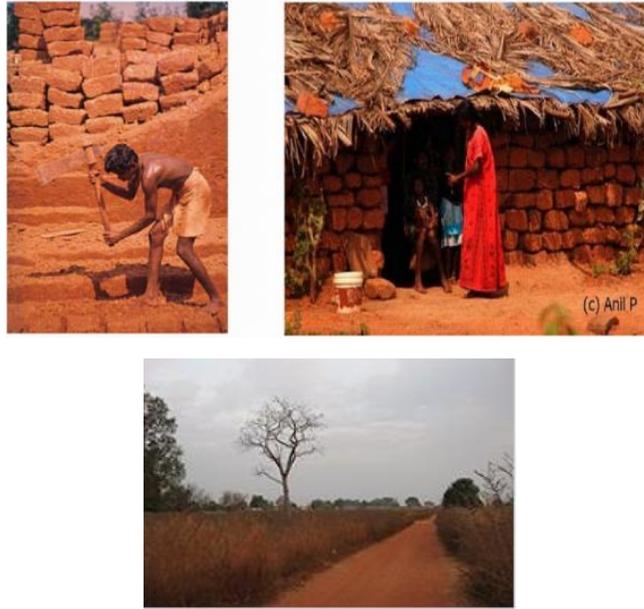
En África, las pruebas para establecer la resistencia y durabilidad de las lateritas además de la prueba de Abrasión de Los Ángeles, es la prueba del Valor de Impacto Agregado (AIV) que parece ser la prueba más utilizada en los países africanos para la estimación y especificación de la resistencia de las partículas agregadas, esta es una prueba simple y económica, y se recomienda cuando se necesita un conocimiento de la resistencia de las partículas.

África es otro de los lugares donde se encuentra la mayor concentración de suelos lateríticos, allí es común el uso de estos suelos como material para elaborar ladrillos para vivienda o esculturas, como también para construcción de vías, como se muestra en la Figura 47; de este último se han realizado diferentes estudios como por ejemplo el realizado por Oladele Omotoso, Olusola Ojo y Emmanuel Adetolaju¹⁰⁶ donde se tomaron dos muestras de suelos lateríticos de la cantera DALL en la metrópolis de Ilorin (área de Sango), en el suroeste de Nigeria mostrado en la Figura 48, para realizar una investigación con respecto a sus propiedades geotécnicas y su idoneidad como materiales de construcción y

¹⁰⁶ OMOTOSO, A.O, OJO, J.O y ADETOLAJU, E.T. Engineering Properties of Lateritic Soils around Dall Quarry in Sango. Ilorin, Nigeria. 2012. p 1-12.

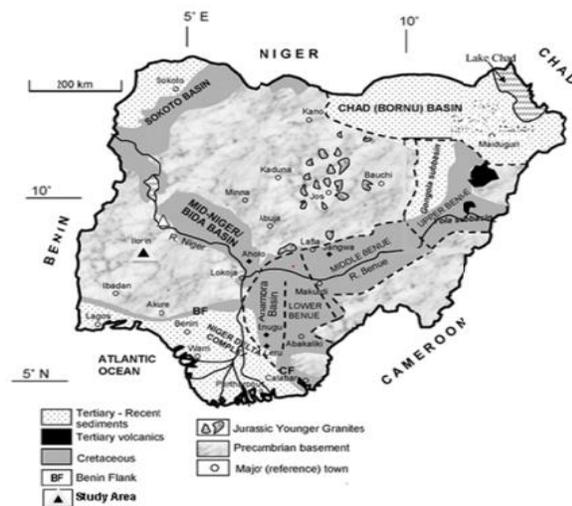
comparar su comportamiento de acuerdo a estudios realizados anteriormente por varios autores.

Figura 47. Usos de suelos lateríticos en África.



Tomado de: Review of Specifications for the Use of Laterite in Road Pavements

Figura 48. Mapa geológico de Nigeria mostrando el área de estudio.



Tomado de: Engineering Properties of Lateritic Soils around Dall Quarry in Sango Area, Ilorin, Nigeria

En este estudio se realizó el análisis de tamaño de grano (granulometría) utilizando los métodos de tamiz grueso convencional y tamiz fino, gravedad específica, límites de Atterberg, prueba de compactación mediante métodos de proctor estándar y modificados, pruebas CBR con muestra saturada y no saturada y prueba de corte directo, de las cuales se llegó a las siguientes conclusiones planteadas por los autores¹⁰⁷:

1. De acuerdo en el análisis granulométrico, la muestra de suelo 1 corresponde a arena arcillosa muy limo arcillosa de color marrón rojizo con 30% de grava, 47% de arena, 23% de limo y arcilla respectivamente; mientras que la muestra 2 es arena grava limo arcillosa de color marrón rojizo que se caracteriza por tener 12% de grava, 52% de arena, 36% de limo y arcilla, respectivamente.
2. La prueba de límites de consistencia de Atterberg indica que las muestras de suelo se encuentran por encima de la línea de actividad (A) en la zona de arcillas de plasticidad intermedia CL y no se observa una expansión significativa de los suelos.
3. Los valores de CBR oscilan entre el 1 y el 5%, lo que puede indicar que el suelo sea útil como material de sub-base en la construcción de carreteras.
4. De acuerdo a los resultados de la prueba de corte directo se da un valor promedio de 33° para el ángulo de fricción interna y un promedio de 75 Kpa para la cohesión, por lo cual se atribuye la alta capacidad de carga de estos suelos.

Finalmente teniendo en cuenta los valores obtenidos en todas las pruebas realizadas y comparándolos con valores de pruebas realizadas anteriormente a suelos lateríticos de la región, los autores concluyeron que los suelos estudiados son buenos materiales para la construcción de carreteras.

Otro estudio realizado a los suelos lateríticos es el elaborado por Aginam, Chidolue y Nwakaire¹⁰⁸ cuya investigación se llevó a cabo para determinar las propiedades geotécnicas de los suelos lateríticos utilizados para la construcción de carreteras en las ciudades de Obosi, Umunya, Awkuzu y Igbariam, todas en la Zona Norte del estado de Anambra en Nigeria, para lo cual se realizaron pruebas de límites de Atterberg, análisis de granulometría, gravedad específica, prueba de

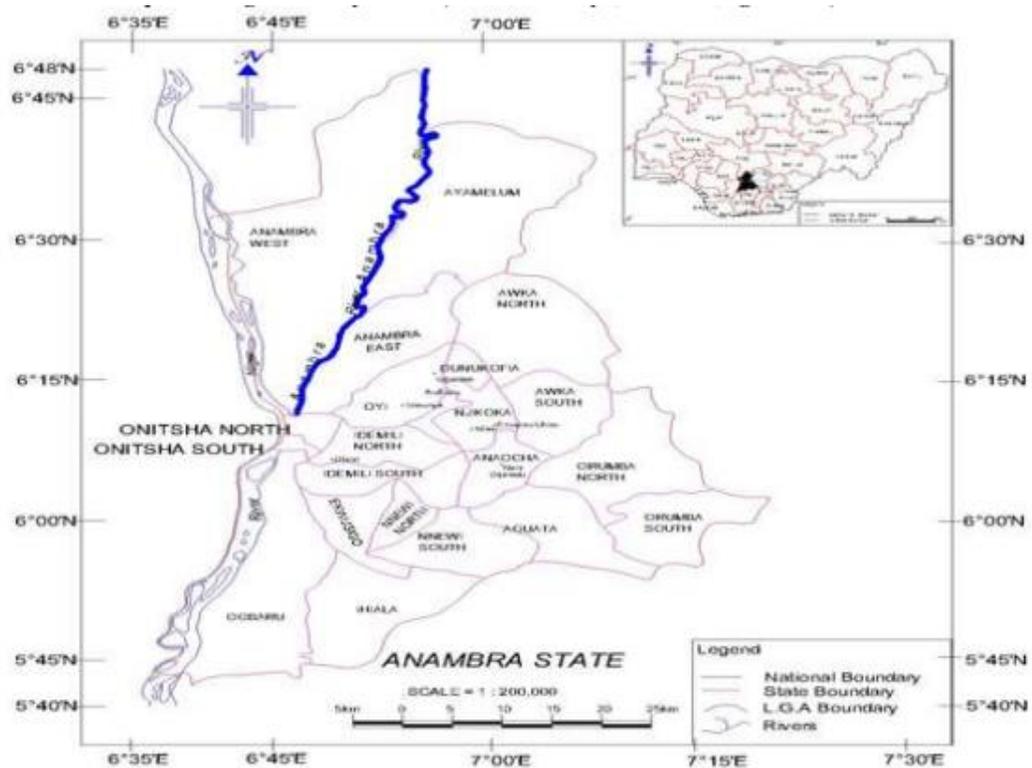
¹⁰⁷ OMOTOSO, A.O, OJO, J.O y ADETOLAJU, E.T. Engineering Properties of Lateritic Soils around Dall Quarry in Sango. Op.cit., p. 12.

¹⁰⁸ AGINAM, C. H., CHIDOLUE, C. A y NWAKAIRE, C. Geotechnical Properties of Lateritic Soils from Northern Zone of Anambra State, Nigeria. Anambra, Nigeria. 2014. p. 1-2.

compactación mediante el British Standard Light (BSL), esfuerzo de compactación y la prueba CBR, según lo especificado por el West African Standard (WAS).

Se utilizaron muestras obtenidas de cuatro zonas de depósitos en Obosi, Awkuzu, Igbariam y Umunya, ubicados en la Zona Norte de Anambra en el Estado de Anambra, Nigeria, como se indica en el Mapa de la Figura 49.

Figura 49. Mapa que muestra las áreas de estudio Obosi, Umunya, Awkuzu, Igbariam.



Tomado de: Geotechnical Properties of Lateritic Soils from Northern Zone of Anambra State, Nigeria

A partir del resultado de las pruebas realizadas, los autores llegaron a las siguientes conclusiones¹⁰⁹:

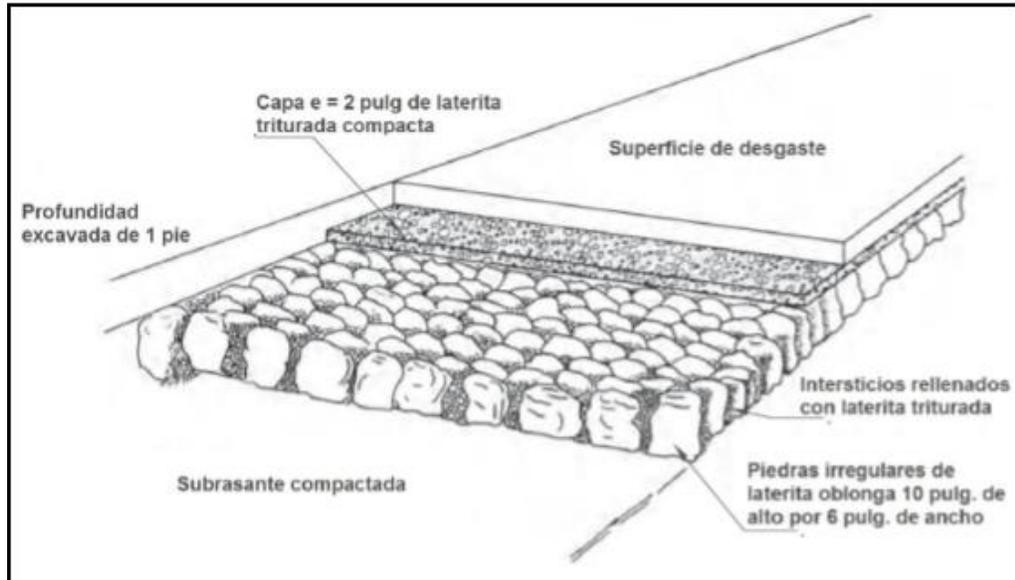
¹⁰⁹ AGINAM, C. H., CHIDOLUE, C. A y NWAKAIRE, C. Geotechnical Properties of Lateritic Soils from Northern Zone of Anambra State, Nigeria. Op.cit., p. 6.

1. Las cuatro muestras de suelo se pueden clasificar como SC (arenas arcillosas) usando la clasificación USCS.
2. Las características de compactación del suelo fueron 1931 KN / m³, 2003.8 KN/m³, 1965 KN/m³ y 1923 KN/m³, para la densidad seca máxima y 10.8%, 9.4%, 10.4% y 12.20% para un contenido óptimo de humedad para las muestras.
3. Los resultados de CBR del 48%, 58%, 45% y 52% para las muestras 1, 2, 3 y 4 respectivamente indican que los suelos son adecuados como materiales sub-base, pero no deben ser usados como material de base, ya que ninguno alcanzó el 80% de la relación CBR.

Pérez en su investigación nombro otro uso de suelos lateríticos en Nigeria, de acuerdo con Persons¹¹⁰ (1970) quien expone la técnica que utiliza material laterítico, para la construcción de la calzada de las calles y las vías arteria en la ciudad de Lagos, Nigeria, ver Figura 48. De acuerdo con el autor, las rocas (de 6x12 pulg) son colocadas en posición vertical de manera adyacente una a la otra y los espacios o huecos que quedan entre las mismas son rellenas con laterita triturada que posteriormente es compactada. Se adiciona laterita triturada hasta alcanzar un espesor de 2 pulg. por encima de la roca. La geometría y la instalación de la roca laterítica se realiza de forma manual, por lo que es un proceso demorado.

¹¹⁰ PERSONS, B. Laterite: Genesis, Location, Use. New York. 1970. Citado por PEREZ, Influencia de la succión en la deformación cortante de suelos lateríticos. Bogotá. 2017. p. 35.

Figura 50. Estructura del pavimento en algunas vías de Lagos, Nigeria.



Tomado de: Influencia de la succión en la deformación cortante de suelos lateríticos.

Younoussa, Karfa, Raguilnaba, Kalsibiri, Philippe y Hugues¹¹¹, realizaron un estudio que asocia las características geotécnicas y mecánicas a las composiciones mineralógicas y químicas de las gravas lateríticas provenientes de Sapouy, utilizadas en un vía de Burkina Faso, África Occidental, mostrado en la Figura 51; esta red de carreteras está sujeta a considerables deterioros, corrugaciones, pérdida de materiales y depresiones, comportamientos que podrían estar relacionados con la insuficiencia de las pruebas geotécnicas que justifican la elección de las gravas lateríticas destinadas a la construcción de carreteras.

¹¹¹ YOUNOUSSA, M, KARFA, T, RAGUILNABA, O, KALSIBIRI, K, PHILIPPE, B Y HUGUES, T. Geotechnical, mechanical, chemical and mineralogical characterization of a lateritic gravels of Sapouy (Burkina Faso) used in road construction. Burkina Faso. 2006.

Figura 51. Localización del lugar de proveniencia de la grava laterítica.



Tomado de: Geotechnical, mechanical, chemical and mineralogical characterization of a lateritic gravels of Sapouy (Burkina Faso) used in road construction

Se realizaron ensayos para determinar la distribución del tamaño de partícula de acuerdo con las normas NF P18-560 [13] (distribución del tamaño de partícula por tamizado en seco) y NF P94-057 [14] (distribución del tamaño de partículas por sedimentación), el análisis de límites se realiza de acuerdo a la norma NF P94-051, el valor de metileno azul se determinó de acuerdo con NF EN 933-9, el contenido de humedad óptimo y la densidad seca máxima se determinaron de acuerdo con NF P94-093, la prueba de CBR después de 4 días de remojo se determinó de acuerdo con el estándar NF P94-078 y el ensayo de compresión se realizó de acuerdo a la norma NF P 18-406.

Después de realizadas las pruebas; se obtuvieron los siguientes resultados: los datos obtenidos de las características geotécnicas se muestran en la Tabla 34, la pérdida de ignición determinada fue de 8.14% en peso, este valor bajo puede expresar un contenido limitado de minerales arcillosos, el bajo valor del índice de plasticidad probablemente se debe a una consecuencia del bajo contenido de minerales arcillosos y la abundancia de cuarzo, el bajo valor de azul de metileno puede sugerir la ausencia de minerales arcillosos inflamados, el contenido de

humedad óptima, la densidad seca máxima y el CBR al 95% permiten concluir que la materia prima puede ser conveniente para el uso de sub-base en la construcción de carreteras, y su uso como material base requiere estabilización con trituración dura o de aglutinantes hidráulicos.

Tabla 34. Características geotécnicas de la muestra de grava laterítica.

Geotechnical characteristics	Results
Particles size distribution (wt.%)	
<2 mm (skeleton)	28
<0.425 mm (mortar)	18
< 80 μm (fine particles)	10.5
< 2 μm (clays)	5
Atterberg limits	
Liquid limit, w_L (%)	22.5
Plasticity limit, w_p (%)	12.0
Plasticity index, PI (%)	10.5
Blue methylene value of the total sample (g/100 g)	0.17
Modified proctor	
Optimum moisture content (OMC) (%)	6.6
Maximum dry density (MDD) (kN/m^3)	21.7
CBR at 95% of MDD (%)	43

Tomado de: Geotechnical, mechanical, chemical and mineralogical characterization of a lateritic gravels of Sapouy (Burkina Faso) used in road construction

Las resistencias a la compresión y la tracción fueron de 1.26 y 0.09 MPa, respectivamente. La resistencia a la compresión está en el rango de 0.5 a 1.5 MPa, la muestra es adecuada para la capa de sub-base.

Los resultados del análisis químico mostraron la presencia de una cantidad importante de SiO_2 (56.19% en peso), asociada con una cantidad apreciable de Fe_2O_3 (16.09% en peso) y Al_2O_3 (10.1) % en peso y un contenido débil de CaO (3.24% en peso), y los resultados del análisis mineralógico se muestran en la Tabla 34. La relación de sílice / sesquióxidos se encuentra alrededor de 2.1.

Tabla 34. Resultados de la composición mineralógica de la muestra de grava laterítica.

Crystallized minerals	Quartz	Kaolinite	Goethite	Rankinite	Hematite	Total
Mineralogical composition (wt.%)	42	26	15	6	3	92

Tomado de: Geotechnical, mechanical, chemical and mineralogical characterization of a lateritic gravels of Sapouy (Burkina Faso) used in road construction.

La especificación completa más reciente para el uso de gravas de laterita es la del Departamento de Carreteras de Australia Occidental (MRWA, 2002), la cual da los requisitos de grava laterítica y laterita triturada para diferentes aplicaciones en carreteras, estas se pueden encontrar en Review of Specifications for the Use of Laterite in Road Pavements.

Un ejemplo del estado de las carreteras construidas con lateritas en Sudáfrica es el mostrado en la Figura 52, las cuales tenían entre 4 y 8 años en servicio y en general, se habían desempeñado satisfactoriamente, aunque presentara algunas grietas y ahuellamientos por el tráfico.

Figura 52. Ejemplo del estado de las vías en Sudáfrica.



Tomado de: Review of Specifications for the Use of Laterite in Road Pavements.

Las propiedades resumidas de las lateritas utilizadas en relación con las especificaciones brasileñas relevantes se muestran en la Tabla 35.

Tabla 35. Comparación de las propiedades de los materiales sudafricanos con la especificación brasileña.

Property	Brazilian specifications (DNIT 098/2007)	South African Properties		
		Mean	Max	Min
Liquid limit (%)	≤ 40	30	38	22
Plasticity Index (%)	≤ 15	12.7	20.5	5.7
P425	10 –45 (± 5)	49	59	29
P075 mm	5–30 (± 2)	25	34	11
Grading modulus	1.65 – 2.70	1.59	2.04	1.27
Dust ratio	≤ 0.67	0.52	0.68	0.38
CBR (%)	≥60			

Tomado de: Review of Specifications for the Use of Laterite in Road Pavements.

Botswana se encontraron caminos tenían bases de laterita, grava laterítica y casi todos se habían desempeñado bien con respecto al tráfico de servicio, las propiedades resumidas en relación con las especificaciones brasileñas relevantes son las mostradas en la Tabla 36.

Figura 53. Vía en Botswana con base de laterita.



Tomado de: Review of Specifications for the Use of Laterite in Road Pavements.

Tabla 36. Comparación de las propiedades de los materiales de Botswana con la especificación brasileña.

Property	Brazilian specifications (DNIT 098/2007)	Botswana Properties		
		Mean	Max	Min
Liquid limit (%)	≤ 40	28	37	NP
Plasticity Index %	≤ 15	12.3	15	NP
% age passing 0.425 mm	10 – 45 (± 5)	41	69	22
%age passing 0.075 mm	5 – 30 (±2)	16	26	12
Grading modulus	1.65 – 2.70	1.94	2.38	1.08
Dust ratio	≤ 0.67	0.43	0.55	0.31
CBR (%)	≥ 60			

Tomado de: Review of Specifications for the Use of Laterite in Road Pavements.

Mozambique, Etiopia y Malawi son otras regiones que también poseen vías construidas con bases de laterita, las Tablas 37, 38 y 39 muestran la comparación de los materiales con las especificaciones brasileñas.

Tabla 37. Comparación de las propiedades de los materiales de Mozambique con la especificación brasileña.

Property	Brazilian specifications (DNIT 098/2007)	Botswana Properties		
		Mean	Max	Min
Liquid limit (%)	≤ 40	28	37	NP
Plasticity Index %	≤ 15	12.3	15	NP
% age passing 0.425 mm	10 – 45 (± 5)	41	69	22
%age passing 0.075 mm	5 – 30 (±2)	16	26	12
Grading modulus	1.65 – 2.70	1.94	2.38	1.08
Dust ratio	≤ 0.67	0.43	0.55	0.31
CBR (%)	≥ 60			

Tomado de: Review of Specifications for the Use of Laterite in Road Pavements.

Tabla 38. Comparación de las propiedades de los materiales de Etiopia con la especificación brasileña.

Property	Brazilian specifications (DNIT 098/2007)	Ethiopia Properties		
		Mean	Max	Min
Liquid limit (%)	≤ 40		47	40
Plasticity Index %	≤ 15		12	11
Percentage passing 0.425 mm	10 –45 (± 5)			
Percentage passing 0.075 mm	5–30 (± 2)		17.4	9.4
Grading modulus	1.65 – 2.70			
Dust ratio	≤ 0.67			
CBR (%)	≥ 60			

Tomado de: Review of Specifications for the Use of Laterite in Road Pavements.

Tabla 39. Comparación de las propiedades de los materiales de Malawi con la especificación brasileña.

Property	Brazilian specifications (DNIT 098/2007)	Malawi Properties		
		Mean	Max	Min
Liquid limit (%)	≤ 40			
Plasticity Index (%)	≤ 15	16.3	18	14
Percentage passing 0.425mm	10–45 (± 5)			
Percentage passing 0.075 mm (0.063)	5 – 30 (± 2)	37.6	49	14
Grading modulus	1.65 – 2.70			
Dust ratio	≤ 0.67			
CBR (%)	≥60			

Tomado de: Review of Specifications for the Use of Laterite in Road Pavements.

De acuerdo a los valores de las propiedades mostradas de Malawi, se evidencia que ninguna de las lateritas utilizadas en la construcción cumple plenamente con

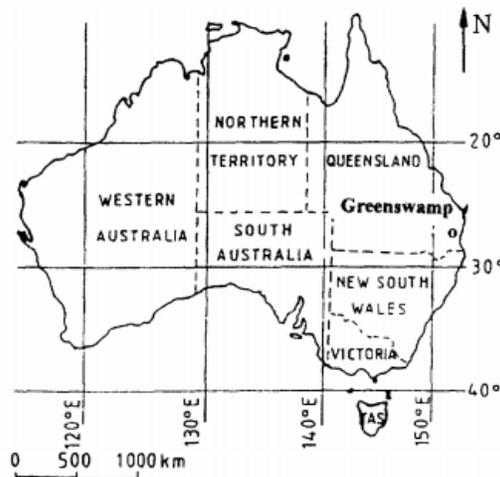
los estándares y especificaciones tradicionales que normalmente se aplican en términos de la plasticidad, requisitos de clasificación y resistencia.

2.11. SUELOS LATERITICOS EN AUSTRALIA.

Mahalinga ¹¹² realizó una investigación donde discute las propiedades y el rendimiento de un pavimento construido con un suelo laterítico desarrollado sobre arenisca, que se encuentra en el sureste de Queensland.

El área de estudio estaba en Greenswamp, ubicada en la región occidental del sureste de Queensland, Australia, la figura 54 muestra la ubicación del área de estudio. El perfil del suelo consiste en una capa superior de 200-300 mm de arena limosa gris, que cubre un horizonte de suelo laterítico de aproximadamente 1 m de espesor. Este suelo laterítico consiste en arena limosa y arcillosa moteada roja y amarilla. Debajo de este horizonte, se encuentra una zona moteada que comprende una capa delgada de grava arcillosa de color rojo anaranjado, y esto está subyacente en la arenisca erosionada. El suelo laterítico ha sido excavado y utilizado como base para la construcción de la carretera Forest Hill a Fernvale.

Figura 54. Ubicación del área de estudio.



Tomado de: Properties and performance of lateritic soil in road pavements.

¹¹² MAHALINGA, U y WILLIAMS, D. Properties and performance of lateritic soil in road pavements. Queensland, Australia, 1996.

Los análisis mineralógicos utilizando difracción de rayos X mostraron que el suelo laterítico está compuesto de caolinita, hematita, goetita y cuarzo. El suelo consta de 16% de Fe_2O_3 , 66% de SiO_2 y 10% de Al_2O_3 , con una proporción de sílice / sesquióxido de 2.51. Los resultados de los análisis de los límites de Atterberg y la gravedad específica se muestran en la Tabla 41 y los límites de tamaño de partícula de la Asociación Nacional de Autoridades Viales del Estado de Australia (NAASRA, 1980) para su aplicación en carreteras Construcción de pavimentos. La prueba de compactación mostró que el contenido de humedad óptimo del suelo laterítico fue del 11% y la densidad seca máxima fue de 2.02 Ton^{-3} y los valores de CBR se situaron entre el 35 y el 90%.

Tabla 41. Resultados de los análisis de límites y gravedad específica.

Liquid limit (%)	Plasticity index (%)	Linear shrinkage (%)	Specific gravity	
			Coarse (+ 2.36 mm)	Fine (- 2.36 mm)
Greenswamp lateritic soil:				
26.0	8.1	7.0	2.82	2.69
NAASRA (1980) specification:				
25.0	6.0	3.0		

Tomado de: Properties and performance of lateritic soil in road pavements.

Se realizaron pruebas triaxiales sin consolidar y sin drenar en muestras de suelo lateríticas de 100 mm de diámetro y 200 mm de altura compactadas con el contenido de humedad óptimo, la Prueba de compresión confinada de Australia Occidental es esencialmente una prueba triaxial en la que se evalúa la resistencia al corte del material en diversas condiciones de humedad y densidad; estas pruebas se llevaron a cabo de acuerdo con la Prueba manual WA 142.1 de Australia Occidental¹¹³, el número de clase WACCT con contenido de humedad óptimo de 11% estuvo entre 3.0 y 3.2 disminuyendo entre 2.4 y 2.0 a 90% de contenido de humedad óptimo y entre 1.8 y 1.0 a 70% de contenido de humedad óptimo, el número de clase WACCT refleja la resistencia al corte de un material de base de pavimento de carretera, y el Departamento de Carreteras Principales de Australia Occidental recomienda que el número de clase no sea mayor que dos en el contenido de humedad del campo esperado, para un desempeño satisfactorio. La contracción volumétrica se estudió en dos muestras de suelo lateríticas compactadas de 106 mm de diámetro y 110 mm de altura, las muestras se secaron al aire a 23°C y 50% de humedad, hasta alcanzar un contenido de humedad del 2%, y luego se dejaron hinchar gradualmente, las muestras de suelo

¹¹³ Western Australian confined compression test. Test method WA 142.1 – 2012.

laterítico compactadas mostraron una ligera hinchazón en el laboratorio, pero esto puede no ser significativo en el campo ya que la base está confinada; el valor de succión varía de 166 kPa a 17 780 kPa.

La cantidad de contracción es función de la cantidad y el tipo de minerales de arcilla presentes y el contenido de humedad del molde, La contracción aumenta con el aumento del contenido de arcilla, y la montmorillonita contribuye más que la illita o el mineral de caolinita. En el suelo laterítico probado, la fracción de arcilla es de 4-6%, y el mineral de arcilla dominante es la caolinita.

El suelo laterítico se humedeció a contenido de humedad óptimo utilizando un tanque de agua y una niveladora y se compactó usando un rodillo vibrador de 10 ton, La compactación relativa al cien por cien se logró fácilmente con ocho a diez pasadas de balanceo a plena vibración seguidas de cinco a seis pasadas de balanceo estático.

Después de 4 años de servicio de la vía con suelo laterítico como base, se realizó una inspección y Como se esperaba, el CIV disminuye con el aumento del contenido de humedad. A lo largo del centro de la carretera, el CIV se ubicó entre 35 y 58 (CBR equivalente de 82 y 207%, respectivamente) y el contenido de humedad se ubicó entre 7.4 y 5.3%. A lo largo de la ruta del tráfico, el CIV estuvo entre 43 y 55 (CBR equivalente de 114 y 192%, respectivamente) y el contenido de humedad se ubicó entre 7.4 y 6.9%. Estos valores CIV muestran que la resistencia de la base es bastante alta.

3. LATERITAS EN COLOMBIA

En nuestro país, la construcción de bases y subbases de pavimentos se realiza con materiales seleccionados, los cuales deben cumplir con especificaciones dadas por el Instituto Nacional de Vías (INVIAS) y las Normas Técnicas Colombianas (NTC), especificaciones como capacidad de soporte suficiente para transmitir de manera adecuada las cargas impuestas por el tráfico y las acciones climáticas, sin embargo, no en todas las regiones del país se dispone de estos materiales. La localización geográfica de nuestro país favorece condiciones para la formación de suelos residuales, asociadas a su clima, precipitación y orografía.

La presencia de suelos residuales lateríticos en Colombia se evidencia mayormente en la región oriental, como lo son los llanos orientales, la amazonia y algunos sectores planos de la región Caribe, zonas donde la topografía es plana a suavemente ondulada, la cual conforma extensas llanuras inundables en épocas de lluvia. El clima, característico de la región tropical, con alta temperatura y humedad, con periodos bimodales de lluvia y sequía, propició la meteorización de los sedimentos depositados en esta región, dando origen a la formación de suelos con perfil típico laterítico. La Figura 56 muestra la distribución de los distintos tipos de suelos en Colombia, los tipos de suelos que se asocian a materiales lateríticos se presentan como oxisoles que son conocidos por su presencia en selvas tropicales húmedas y han sido clasificados también como suelos lateríticos, estos, se forman por meteorización y humificación, siempre tienen color rojo o amarillo debido a la alta concentración de hierro, óxidos e hidróxidos de aluminio; en el mapa están representados por el color rojo y ocupan aproximadamente un 40 % del territorio colombiano.

En la región oriental del territorio colombiano los sistemas de transporte vial, aéreo y fluvial son deficientes tanto en la zona urbana como rural. Aunque los departamentos de Meta y Casanare disponen de una oferta vial terrestre del orden primario, secundario y terciario, todas estas vías se encuentran en mal estado.¹¹⁴

¹¹⁴ CONSORCIO GEOMINAS-GEMI. Estudios de cartografía geológica a escala 1.100.000 bloque 8 en el vichada. Medellín, 2014. p. 20.

Figura 55. Vías de la región oriental del territorio colombiano.



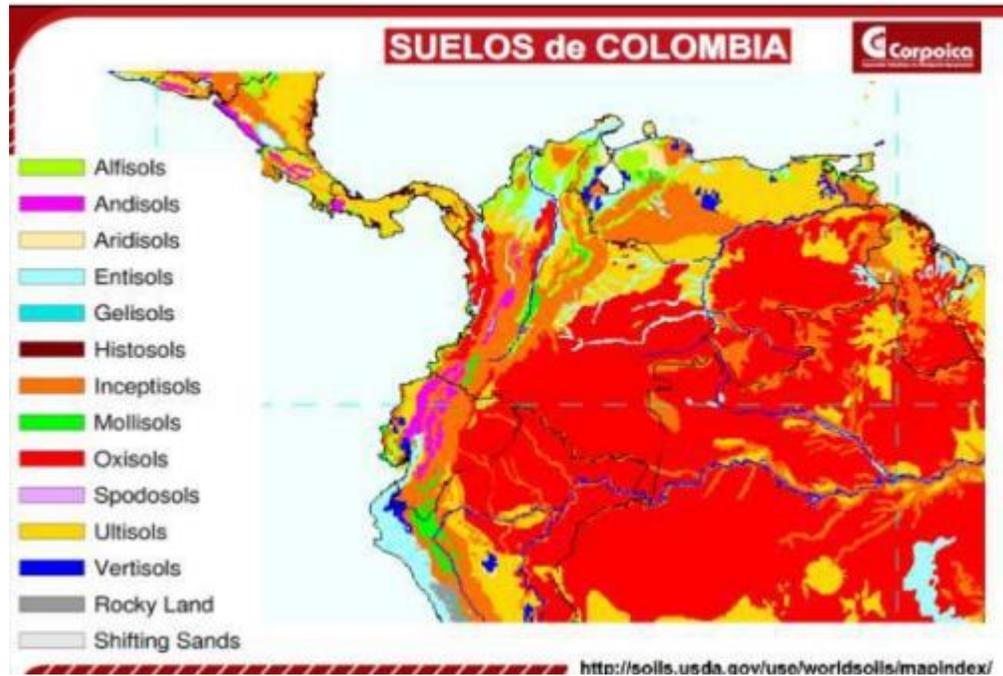
Tomado de: estudios de cartografía geológica a escala 1.100.000 bloque 8 en el Vichada

La cuenca de los Llanos Orientales, a través del tiempo, ha estado sometida a procesos de levantamiento, hundimiento y erosión durante diferentes épocas, dando origen a las geformas actuales en la zona, caracterizadas por superficies planas en abanicos aluviales, penillanuras aluviales y llanuras aluviales actuales. La región de la cuenca de los Llanos Orientales se divide en dos grandes subregiones: la Orinoquía inundable o mal drenada y la Orinoquía bien drenada o mejor conocida como altillanura, cuyo límite lo establece el río Meta. La parte de la Orinoquía que presenta inundaciones prolongadas durante la época de lluvias, se localiza hacia la margen izquierda del río Meta correspondiente a la llanura aluvial de desborde, y la Orinoquía bien drenada se extiende entre los ríos Meta y Orinoco y está conformada por extensas planicies con diferentes grados de disección, por lo que, en general, se ha dividido en altillanura plana y altillanura disectada, ambas dominadas por gramíneas e interrumpidas por fajas angostas de bosques de galería.¹¹⁵

La mayoría de los suelos en parte de los Llanos Orientales se derivan de sedimentos limo – arcillosos recientes de origen aluvial, caracterizados por el alto contenido de hierro y aluminio, así como la pérdida de minerales básicos por lixiviación debido al exceso de humedad durante la época de lluvias.

¹¹⁵ CONSORCIO GEOMINAS-GEMI. Estudios de cartografía geológica a escala 1.100.000 bloque 8 en el vichada. Op.cit. p. 25.

Figura 56. Distribución de suelos en Colombia.



Tomado de: Intemperismo o meteorización.

En el departamento del Vichada la presencia de materiales aptos para la construcción de la estructura de pavimentos es poca, por lo cual se ha visto en la necesidad de utilizar depósitos de suelos limo arcillosos los cuales son abundantes en la región pero que no cumplen con las especificaciones del INVIAS, este departamento presenta regímenes de lluvia con comportamiento bimodal del orden de 1450 mm/año y temperaturas promedio anuales entre 24°C y 33°C, estos rangos de precipitación y de temperatura, determinan un área dentro del bosque húmedo tropical y de sabana, de acuerdo al sistema de clasificación climática empleado por el IGAC, por lo que las variaciones en el contenido agua afectan con fuerza la estabilidad de los terraplenes viales y todo tipo de estructuras en tierra debilitando tanto el suelo que los conforma como el que los soporta, Figura 57.

Por lo anterior, las vías del departamento se han visto afectadas a pesar de la construcción de las obras de drenaje tales como cunetas, alcantarillas, drenes, canales, y demás obras diseñadas con el objetivo de evacuar el agua tanto de la superficie como de la estructura interna del terraplén, lo que ha dejado

incomunicada la región con el resto del país¹¹⁶ que dificulta la comunicación y el avance del desarrollo social y económico de los municipios del oriente del país. Gran parte de las razones del mal estado de las vías en el departamento, está en el desconocimiento general de las características y comportamiento mecánico de los suelos lateríticos del sector.

Figura 57. Ejemplo del estado de una vía del departamento del Vichada.



Tomado de: Influencia de la microestructura en la rigidez máxima de un perfil de suelo residual, en condiciones edométricas.

Se han realizado estudios a algunos suelos lateríticos del departamento del Vichada como el de Torres¹¹⁷, donde se estudió la influencia de la microestructura en la rigidez máxima en condiciones edométricas para dos intensidades de meteorización. Para ello, el autor realizó algunos de los ensayos mencionados anteriormente para la caracterización del suelo, para la ejecución de estos se extrajeron muestras en bloques que fueron recubiertas con una capa de parafina y posteriormente envueltas en papel de vinilo, Figura 58. De la exploración en campo se logró diferenciar dos niveles de meteorización o estratos de suelo laterítico, distribuidos en profundidad de la siguiente forma: 0.00m – 0.25m Limo

¹¹⁶ PEREZ, Influencia de la succión en la deformación cortante de suelos lateríticos. Bogotá. 2017. p. 19.

¹¹⁷ TORRES, Carlos. Influencia de la microestructura en la rigidez máxima de un perfil de suelo residual, en condiciones edométricas. Op.cit., p. 68.

orgánico, 0.25m – 0.75m Arcilla con limo de color amarillo a café (Horizonte 1) y 0.75m – 1.80m Arcilla con limo de color café a rojizo (Horizonte 2)

Figura 58. Extracción de muestras en bloque.



Tomado de: Influencia de la microestructura en la rigidez máxima de un perfil de suelo residual, en condiciones edométricas.

Se realizó el estudio de la mineralogía de las muestras mediante el uso del microscopio electrónico de barrido, para el horizonte 1 y 2 donde se determinaron los siguientes elementos: carbono, oxígeno, sodio, magnesio, aluminio, silicio, potasio, titanio y hierro, también se evidenciaron minerales de arcilla agregados en hidróxidos de Al, óxidos e hidróxidos de Fe, cuarzo de tamaño arena fina y óxido de Ti tamaño limo, el haber encontrado partículas de arcilla y cuarzo agregadas dentro de los hidróxidos de aluminio, evidencia la presencia de una microestructura cementada, incrementando las propiedades de resistencia y rigidez del material en condición natural.

El horizonte 1 presenta un elevado contenido de sílice y el horizonte 2 presenta un contenido de sílice más bajo, también presenta la formación del mineral caolinita que en comparación con la illita y la montmorillonita, está asociada a un mejor comportamiento mecánico y también registra un mayor contenido de óxido de hierro.

Tabla 40. Contenido de minerales de las muestras.

Mineral	Horizonte 1 (%)	Horizonte 2 (%)
Cuarzo	23	22
Caolinita	18	12
Illita	13	19
Hidróxidos de Al	34	30
Hidróxidos de Fe	8	15
Óxidos de Ti	4	2

Tomado de: Influencia de la microestructura en la rigidez máxima de un perfil de suelo residual, en condiciones edométricas.

La Tabla 40 muestra la cuantificación de los minerales e hidróxidos presentes en cada una de las muestras de acuerdo a los resultados de los ensayos mineralógicos realizados, donde se puede evidenciar que el grado de alteración de un horizonte de suelo con respecto al otro se refleja en la mayor cantidad de hidróxidos de aluminio y caolinita en el horizonte 1, y por su parte la mayor cantidad de hidróxidos de hierro e illita en el horizonte 2, lo anterior debido al hecho de que el horizonte 1 esté más próximo a la superficie lo que lo hace susceptible a la acción de los procesos erosivos y de meteorización, así como los cambios en el contenido de agua que hidratan los óxidos de hierro removiéndolos de las partículas de arcilla y cuarzo.¹¹⁸

Se realizaron ensayos para la obtención de las propiedades índice de los dos horizontes investigados, tales como el contenido de agua, el peso unitario total, la gravedad específica de los sólidos del suelo, la distribución granulométrica de las partículas y las características de plasticidad; lo que permitió clasificar los dos horizontes según el sistema unificado de clasificación de suelos (USCS por sus siglas en inglés), y así tener un marco de referencia para comparar los resultados.

Los resultados que se obtuvieron para los dos horizontes de suelo en cuanto a su contenido de agua en los diferentes estados límite, se presenta en la Tabla 41.

¹¹⁸ TORRES, Carlos. Influencia de la microestructura en la rigidez máxima de un perfil de suelo residual, en condiciones edométricas. Op.cit., p. 72.

Tabla 41. Resultados de ensayos de contenido de agua y plasticidad.

Horizonte	ID	ω (%)	LL (%)	LP (%)	IL (%)	IP (%)	Ic (%)
Horizonte 1 (superior)	EV-H1	29.0	57.6	26.3	0.09	31.3	0.9
Horizonte 2	EV-H2	32.5	60.1	32.5	0.00	27.6	1.0

Tomado de: Influencia de la microestructura en la rigidez máxima de un perfil de suelo residual, en condiciones edométricas.

Los dos horizontes tienen más del 90% de contenido de finos, y el índice de plasticidad que se obtuvo clasifica en ambos niveles como arcillas de alta plasticidad. También se determinaron los valores de actividad en los dos horizontes, obteniendo un valor de 0.33 para el horizonte 1 y 0.29 para el horizonte 2, lo que demuestran que son suelos lateríticos inactivos.

El material en su estado natural se encuentra agrupado en fragmentos tamaño arena y gravas pequeñas, los cuales se disgregaron por remoldeo tratando siempre de no afectar la estructura mineral, esto con el fin de obtener la distribución granulométrica. Se observa que la distribución de tamaño de partículas en los suelos de los dos horizontes es similar, dado que en ambos casos el contenido de minerales de arcilla fue aproximadamente el mismo, en ambos casos más del 90% del material pasó el tamiz No 200.

En cuanto a la gravedad específica, se encontró que el horizonte 1 tiene una gravedad específica de 2.79 y el horizonte 2 de 2.82, siendo esto consecuente con el mayor contenido de óxidos de hierro encontrado en el horizonte 2.

Del ensayo de proctor, encontrando que la densidad seca máxima es mayor en el horizonte 1 (superior) que en el horizonte 2, para un contenido de agua similar. Esto se debe a la composición mineralógica del horizonte 2 ya que presenta mayor contenido de arcilla y menor cantidad de cuarzo e hidróxidos de aluminio. Los resultados obtenidos muestran que las densidades secas máximas son bajas y los contenidos óptimos de agua son altos, lo cual es característico de los suelos lateríticos de grano fino y se debe a la interacción entre minerales arcillosos y micáceos, cuya forma aplanada y mayor área superficial favorece la retención de agua y la reducción en la densidad.¹¹⁹

¹¹⁹ TORRES, Carlos. Influencia de la microestructura en la rigidez máxima de un perfil de suelo residual, en condiciones edométricas. Op.cit., p. 82.

Otro de los estudios realizados a suelos lateríticos del departamento del Vichada es el ejecutado por Pérez¹²⁰, las muestras utilizadas en esta investigación fueron tomadas del margen de la vía La Arepa – El Viento – El Progreso; el material analizado se componía por un 64% de arcilla, 30% de limo y el restante 6% corresponde a partículas de tamaño arena fina. Se realizaron ensayos de microscopía electrónica de barrido, espectroscopia de rayos X de energía dispersiva, difracción de rayos X y fluorescencia de rayos X con lo cual se buscó realizar la identificación química y mineralógica del material, como se muestra en la Tabla 42, así como establecer el grado de meteorización; en la cual se observaron partículas de tamaño arcilla, arena y algunas aglomeraciones de partículas de tamaño limo y tamaño arcilla las cuales se encontraban impregnadas en hidróxido de aluminio.

El material EV-2-A corresponde a una arcilla de alta plasticidad de consistencia firme con algo de limo cuyo comportamiento es plástico y el material EV-2-B corresponde a un limo de alta plasticidad de consistencia firme y su comportamiento es plástico. Los materiales del perfil presentan alta meteorización dado el bajo contenido de silicio y su ganancia o alto contenido de aluminio. Los resultados de los límites de consistencia, muestran que los límites líquido y plástico presentan menor valor para el estrato superior pero un leve incremento en el índice de plasticidad. Esto se puede atribuir a la disminución de los minerales arcillosos y a la precipitación de los sesquióxidos de hierro y de aluminio en dicho estrato. El IP < 50% para ambos estratos, indica que los minerales de arcilla, presentan una relativa estabilidad a las variaciones en el contenido de agua del suelo, o a la interacción agua – suelo, por lo que no presentan expansiones elevadas.

Mediante el ensayo de compactación establecido por la norma INV E-141-2013 con material secado a 110° se obtuvo una densidad seca máxima de aproximadamente 1.47Mg/m³ y un contenido de agua óptimo igual a 27%, se realizó otro ensayo sobre una muestra secada al horno a una temperatura igual a 50°C obteniendo un valor de densidad seca máxima de 1.62 Mg/m³ y un contenido de agua óptimo de 22%. Después de determinar los parámetros anteriores, estas diferencias son debidas a que las aglomeraciones de partículas de tamaño limo y arcilla con los sesquióxidos de hierro y de aluminio, al ser expuestas a temperaturas superiores a las ambientales se adhieren firmemente y se comportan como una partícula altamente rígida de mayor tamaño, siendo capaces de resistir impactos mecánicos moderados y que luego no se desintegran al ser humedecidas (sin llegar a saturarlas), alterando así la densidad del material.

¹²⁰ PEREZ, Influencia de la succión en la deformación cortante de suelos lateríticos. Op.cit., p. 88.

Se realizaron los ensayos de succión del material y corte simple, objeto del trabajo de investigación del autor. ¹²¹

Tabla 42. Composición mineralógica de las muestras.

Mineral	EV-2-A	EV-2-B
Hidróxidos de Al (G)	34	30
Cuarzo (Q)	24	22
Caolinita (K)	18	12
Illita (I)	13	19
Hidróxidos de Fe (FH)	8	15
Óxidos de Ti (A)	4	2

Tomado de: Influencia de la succión en la deformación cortante de suelos lateríticos

Se realizó una evaluación de la aptitud del material analizado en ese trabajo a partir de la comparación con las exigencias del artículo 200 – 13 del INVIAS mostrado en la Tabla 43, con lo cual se concluyó que el material analizado no es apto para la construcción de terraplenes viales debido a su excesivo contenido de finos y elevado límite líquido.

¹²¹ PEREZ, Influencia de la succión en la deformación cortante de suelos lateríticos. Op.cit., p.151.

Tabla 43. Evaluación de la aptitud del material para terraplén.

CARACTERÍSTICA	NORMA DE ENSAYO INV	SUELOS SELECCIONADOS	SUELOS ADECUADOS	SUELOS TOLERABLES	SUELO ANALIZADO	Cumple sí / No
Partes del terraplén a las que se aplican		Todas	Todas	Cimiento y Núcleo		
Tamaño máximo, mm	E-123	75	100	150	0.5	Sí
Porcentaje que pasa el tamiz de 2mm (No. 10) en masa, máximo.	E-123	80	80	-	100	NO
Porcentaje que pasa el tamiz de 75µm (No. 200) en masa, máximo.	E-123	25	35	35	95	No
Contenido de materia orgánica, máximo (%)	E-121	0	1.0	1.0	N/A	-
Límite líquido, máximo (%)	E-125	30	40	40	58	No
Índice de plasticidad, máximo (%)	E-126	10	15	-	32	No
CBR de laboratorio, mínimo (%)	E-148	10	5	3	N/A	-
Expansión en prueba CBR, máximo (%)	E-148	0.0	2.0	2.0	N/A	-
Índice de colapso, máximo (%)	E-157	2.0	2.0	2.0	N/A	-
Contenido de sales Solubles, máximo (%)	E-L58	0.2	0.2	-	0	Sí

* N/A: No aplica, es una característica del material que no fueron evaluadas en este trabajo por no estar en el alcance del mismo.

Tomado de: Influencia de la succión en la deformación cortante de suelos lateríticos

Osorio¹²², es otra de los autores que han realizado estudios a suelos lateríticos del territorio colombiano, en su investigación, se analizaron partículas de laterita en diferentes condiciones de humedad, que fueron sometidas a pruebas de abrasión y compresión, para este fin se practicaron tres ensayos en los que se simulaban las situaciones de carga y esfuerzos para la observación de cambios morfológicos y de resistencia en la laterita, también se realizaron mediciones microscópicas de tamaño y distribución de poros para estudiar las tendencias de los parámetros de resistencia y compresibilidad asociadas a cambios micro estructurales.

¹²² OSORIO, Camila. Caracterización física y análisis del comportamiento mecánico de lateritas colombianas a nivel de partículas. Bogotá. 2016.

Se realizó un ensayo de compactación normal para determinar la gravedad específica y relaciones de humedad-peso unitario seco, del cual se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 44.

Tabla 44. Resultados obtenidos del ensayo de compactación normal.

Densidad Seca Máxima	2.19 ton/m ³
Contenido Óptimo de Humedad	14%
Gravedad específica	2.81 ton /m ³

Tomado de: Caracterización física y análisis del comportamiento mecánico de lateritas colombianas a nivel de partículas.

Para determinar la porosidad del material como la mineralogía, mostrada en la Tabla 45, se realizó el análisis de microscopía con el microscopio electrónico de barrido, del cual se determinó que el tamaño de los macroporos está en mayor proporción entre 0.1-35 µm; debido a que no fue posible observar los poros atrapados de las partículas; se realizó un ensayo de porosimetría de intrusión de mercurio, para reevaluar el rango de tamaños encontrado con la microscopía, la distribución de volumen poroso obtenida indica que los diámetros equivalentes de los poros intruídos están en su mayoría entre 0.001 y 1 µm.

Tabla 45. Resultados del análisis químico de microscopía electrónica de barrido.

Elemento	%W
O	92%
Al	2%
Si	1%
Fe	5%

Tomado de: Caracterización física y análisis del comportamiento mecánico de lateritas colombianas a nivel de partículas.

Para analizar el cambio en la forma y la disposición espacial de las partículas, se llevó a cabo un estudio de fracturamiento, el cual consistió en la observación de los cambios que presentaron las partículas de suelo debidos a cargas de tipo dinámico, cíclico y abrasivo; en diferentes condiciones de humedad.

Con el fin de estudiar el cambio en la granulometría de las lateritas, se realizaron ensayos de compactación giratoria con sesiones de compactación de 10, 100, 1000 y 10000 giros. que implica además de compactación, esfuerzos cortantes y abrasivos, con el fin de examinar la afectación en la distribución de los tamaños de las partículas de laterita, la compactación giratoria puede llegar a simular las cargas presentes en un pavimento debido a la circulación de vehículos; se encuentra que, tanto para el caso de lateritas en estado natural de humedad, como para el estado saturado, el mayor cambio de tamaño, se presenta en el tamiz número 4 que corresponde a una abertura de 4.75 mm, y el más grande de ellos cuando se compacta a 10000 giros, se evidencia que las partículas se hacen más pequeñas en cuanto son más compactadas.¹²³

Finalmente, tras realizar los ensayos de resistencia a nivel de partículas y por compactación giratoria, se concluyó que las lateritas presentan una resistencia alta, en especial cuando el ambiente está entre 3-50% de humedad, además las lateritas presentan un comportamiento mecánico muy bueno, comparado a un material granular de río.

Montes¹²⁴ es otro de los autores de investigaciones a lateritas en la zona del Vichada en la región de la Orinoquía, el objetivo de su trabajo fue realizar una estabilización al material granular de manera que sus propiedades mecánicas aumentaran lo suficiente para ser utilizado como capa de base o subbase en una estructura de pavimento, utilizando cemento Portland como agente modificador en tres porcentajes de adición por peso total de la muestra: 2%, 4% y 6%; se realizaron algunos ensayos de caracterización como los fueron el Proctor Modificado y Límites de Atterberg, con el fin de realizar una estabilización al material granular, de manera que sus propiedades mecánicas aumenten lo suficiente para ser utilizado como capa de base o subbase en una estructura de pavimento.

- Humedad Óptima Laterita (sin cemento): 10.5%
- Humedad Óptima Laterita + 2% de cemento: 6.1%
- Humedad Óptima Laterita + 4% de cemento: 8.4%
- Humedad Óptima de Laterita + 6% de cemento: 8.8%
- Densidad Máxima Seca de Laterita (sin cemento): 2.2 ton/m³
- Densidad Máxima Seca de Laterita + 2% de cemento: 2.32 ton/m³
- Densidad Máxima Seca de Laterita + 4% de cemento: 2.3 ton/m³

¹²³ OSORIO, Camila. Caracterización física y análisis del comportamiento mecánico de lateritas colombianas a nivel de partículas. Op.cit., p. 9.

¹²⁴ MONTES, S. Determinación de la resistencia a la fatiga de material tipo laterita estabilizado con cemento mediante un montaje experimental tipo tensión-compresión. Bogotá D.C. 2015.

- Densidad Máxima Seca de Laterita + 6% de cemento: 2.28 ton/m³
- Gravedad Específica de Laterita: 2.81

Luego se definió el montaje experimental para los ensayos de fatiga, para el cual se siguió lo dispuesto en la norma INV E – 808 – 13 de las Normas de Ensayos de Materiales para Carreteras INVIAS 2013, donde se establece el procedimiento para el experimento de resistencia a la fatiga mediante el ensayo de flexión a dos puntos en probetas trapezoidales, las cuales tuvieron problemas en la elaboración ya que se rompían o desmoronaban cuando se retiraba la probeta, razón por la cual se realizó el ensayo con probetas cilíndricas con un radio de 2.5” y 5 centímetros de altura.

Se definió el siguiente proceso para la preparación del suelo-cemento:

1. Tamizado del material: se inició el proceso de elaboración con el tamizado del material tipo Laterita, con el objetivo de controlar e intentar las condiciones en las cuales se realizaron los ensayos de caracterización preliminar.
2. Definición de cantidades de cemento y agua: debido a que se tienen tres tipos de probeta (2%, 4% y 6% de cemento), se procedió a rectificar la cantidad en peso de cemento y de agua.
3. Mezclado en seco: una vez definidas las cantidades de cemento y agua, se encontraron los pesos de material por tamaño de acuerdo a la granulometría. Luego, se adicionó la cantidad de cemento necesaria y se procedió a mezclar, de manera que se tuviera la mayor homogeneidad posible antes de humedecer el material.
4. Mezclado con agua: luego de tener seguridad de que la mezcla de cemento y Laterita era completamente homogénea, se procedió a aplicar la cantidad de agua necesaria para llevar al material a su humedad óptima.
5. Se realiza el proceso de curado para lo cual se utilizaron dos tanques sellados herméticamente con agua destilada; se definió un tiempo de 28 días de curado y uno de 7 días para desencofrar las muestras, una vez desencofradas las muestras, se volvían a poner dentro del contenedor para completar los 28 días antes mencionados y se realiza el montaje experimental.

Rodríguez¹²⁵, realizó una investigación que tuvo como objetivo la caracterización del material y la evaluación del potencial del suelo laterítico rico en hierro y aluminio conocido como Ripio, para una posible implementación en la

¹²⁵ RODRÍGUEZ, P. Evaluación del potencial de suelos lateríticos (ripio) para obras de infraestructura vial en el vichada. Bogotá, Colombia. 2017.

infraestructura vial en el departamento del Vichada, la Figura 59 muestra dos acopios de Ripio en dos tonalidades diferentes en Puerto Carreño, capital del departamento de Vichada, inicialmente realizó la caracterización del material y luego se propusieron dos métodos de estabilización, el primero con nanotecnología agregando organosilano y el segundo con polímeros, materiales que ya se han utilizado en la estabilización de vías internacionales y algunas nacionales.

Figura 59. Suelo laterítico granular, ripio. Puerto Carreño, Vichada



Tomado de: Evaluación del potencial de suelos lateríticos (ripio) para obras de infraestructura vial en el vichada.

La Tabla 46 muestra la cantidad de ensayos que se realizaron en la investigación, separados según el suelo laterítico, o la mezcla de Ripio con organosilano y polímero, en total se realizaron 111 ensayos.

Tabla 46. Número de ensayos realizados en la investigación.

ENSAYO	Ripio	Ripio y organosilano			Ripio y polímero		
		Concentración de organosilano (l/m ³)			Concentración de polímero (l/m ³)		
	0	0.3	0.5	1.0	2.0	3.0	4.0
Propiedades intrínsecas							
Microscopia Electrónica (SEM)	1	1	0	0	1	0	0
Difracción de Rayos X	1	1	1	1	1	1	1

Microscopia Electrónica de Transmisión (TEM)	1	1	1	1	0	1	0
Contenido de agua	6	2	2	2	2	2	2
Granulometría	6	0	0	0	0	0	0
Ensayo normal de compactación	5	1	1	1	0	0	0
Propiedades mecánicas							
Resistencia a la compresión inconfiada	2	1	1	1	1	1	1
Resistencia a la compresión inconfiada	2	1	1	1	1	1	1
CBR seco	5	1	1	1	1	1	1
CBR inmersión	5	1	1	1	1	1	1
Propiedades hidráulicas							
Durabilidad	1	1	-	-	-	1	-
Permeabilidad	3	3	3	3	3	3	3
Ascensión capilar	1	1	-	-	-	-	-

Tomado de: Evaluación del potencial de suelos lateríticos (ripio) para obras de infraestructura vial en el vichada.

Se realizó el ensayo de microscopia electrónica a dos muestras distintas, la primera es de tamaño grava después de un proceso de trituración y la segunda una muestra de material con tamaño arena media, en la primera muestra los elementos presentes son C, O, Al, Si, Ti y Fe, y fue identificado un grano de cuarzo, en el que se evidenció presencia de Si y O; y en la segunda muestra, se identificó que está constituida principalmente por cuarzo (91 %), y en menor proporción por caolinita (8 %) y hematita (1 %).

Con el ensayo de Microscopia Electrónica de Transmisión, se observa que en las partículas de Ripio las partículas están formadas por la acumulación de partes finas, después de un proceso de cementación típico en perfiles lateríticos y que una vez se pierde la cementación, las partículas quedan totalmente independientes unas de otras.

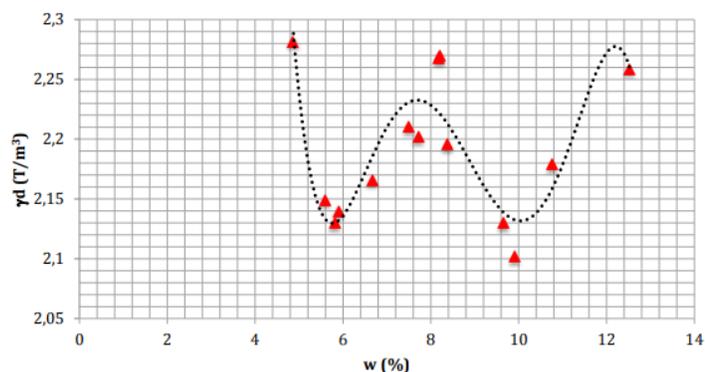
La granulometría se determinó de acuerdo a la norma INV E-123-13, donde el material se clasificó como una arena bien gradada (SW) en el sistema de clasificación USCS, y como un suelo A-1-a en la clasificación AASHTO. Un suelo SW está caracterizado por estar bien gradado y tener bajo contenido de finos, la presencia de finos en ese tipo de suelos no produce cambios apreciables en las características de resistencia de la fracción gruesa, ni interfiere con su capacidad de drenaje. En la clasificación AASHTO un suelo A-1-a se refiere a materiales como cantos, grava y arena; los coeficientes del Ripio correspondieron a $C_u = 31.6$ y $C_c = 1.6$.

Los resultados del ensayo de granulometría mostraron que el Ripio es susceptible a fracturación durante el proceso de compactación, generando variaciones hasta del 10 % en algunos tamices, especialmente las partículas que están contenidas entre los tamices con aberturas de 2.36 mm (#8) y 0.3 mm (#50); el proceso de fracturación de las partículas del suelo, genera un incremento en el porcentaje de arenas y finos que es de hasta 4 %, un valor que no es significativo. También se registraron valores negativos en la prueba de expansión de hasta 2 %, lo que apunta un ligero aumento en la densidad del material.

Los ensayos de límites de consistencia se realizaron sobre la fracción del Ripio pasante al tamiz No. 40, de acuerdo a los ensayos INV E-125-13 – INV E-126-13, mediante el ensayo INV E-122-13 se determinó el contenido de agua natural del ripio para 6 muestras de suelo distintas, y de acuerdo a los resultados, se determinó un valor promedio para establecer un escenario inicial del suelo. El valor del contenido de agua del material fue de 10.2 %, que corresponde al valor obtenido usando la totalidad de la granulometría.

Se realizó el ensayo de compactación de acuerdo a la norma INV E-141-13, donde se realizaron 6 ensayos distintos, cada uno de 5 puntos, las probetas realizadas fueron de 12 cm de alto y 10 cm de diámetro, la Figura 57 muestra la gráfica de los resultados de los puntos realizados, donde se puede identificar una alta variabilidad en la consistencia del material laterítico Ripio, para cambios en el contenido de agua entre 6 % y 8 %, los cambios en el peso unitario seco fueron de aproximadamente 7 %. El peso unitario seco del material varía entre 2.10 Ton/m³ y 2.28 Ton/m³, aproximadamente un 8 %.

Figura 60. Curva de compactación.



Tomado de: Evaluación del potencial de suelos lateríticos (ripio) para obras de infraestructura vial en el vichada.

Del ensayo de CBR INV E-148-13, se obtuvieron los datos mostrados en la Tabla 47, se concluyó que el suelo laterítico tiene un valor de CBR del 58 % en estado seco, y de 67 % después de la etapa de inmersión.

Tabla 47. Valores de CBR para Suelo laterítico.

	Ensayo	CBR (%)	CBR inmersión (%)	ΔCBR (%)
Ripio utilizado en la campaña experimental	1	58	67	15
	2	61	66	8

Tomado de: Evaluación del potencial de suelos lateríticos (ripio) para obras de infraestructura vial en el vichada.

De acuerdo a las especificaciones del INVIAS, los valores de CBR del suelo laterítico utilizado en la campaña experimental de la investigación, son aptos para la implementación de terraplenes y sub bases granulares, tanto para la condición seca, como para la condición saturada del material.

Tabla 48. Comparación de los valores de CBR (%) obtenidos en los ensayos, con los valores requeridos por INVIAS.

	CBR (%)	CBR inmersión (%)	Valores de CBR (%) para sub bases granulares			Valores de CBR (%) para terraplenes		
			Clase A	Clase B	Clase C	Suelos seleccionados	Suelos adecuados	Suelos tolerables
Ripio utilizado en la campaña experimental	58	67	>30	>30	>40	10	5	3
	61	66	>30	>30	>40	10	5	3

Tomado de: Evaluación del potencial de suelos lateríticos (ripio) para obras de infraestructura vial en el vichada.

De acuerdo al ensayo de permeabilidad realizado en un equipo desarrollado por la Universidad Nacional de Colombia, de carga hidráulica variable, Cada una de las probetas tenía dimensiones de 16 cm de altura y 14 de diámetro, se obtuvo un valor k de 1.134×10^{-6} m/seg, y se establece que el material es una arena con contenido de limo y arcilla, clasificación dentro de la que se ubica el suelo laterítico.

En arenas que no son limpias y tienen un porcentaje significativo (mayor al 10 %) de arcillas y limos, es común que la permeabilidad pueda tomar valores en un

rango comprendido entre 1×10^{-5} y 1×10^{-9} m/seg, ya que la fracción granular del suelo no tiene mayor influencia en la conductividad hidráulica. Los suelos con un valor de permeabilidad dentro de ese rango, tienen una capacidad de drenaje pobre. Adicional, definir un valor de permeabilidad en ese tipo de suelos no puede hacerse de manera directa, sino que debe recurrirse a métodos indirectos, generalmente por permeámetros de carga hidráulica decreciente.

También se planteó un ensayo de durabilidad con el que se evaluó la susceptibilidad del suelo cuando es expuesto al agua, este ensayo consiste en colocar dentro de un recipiente una muestra de roca o suelo, e ir midiendo la variación del pH durante un tiempo de 4 horas, este ensayo se ejecutó debido a las condiciones climáticas que se presentan en el departamento de Vichada, en especial porque las vías en la zona están bajo el nivel del agua durante varios meses en el año; como resultado al ensayo se evidencia la acción del agua sobre el material, destruyendo la probeta en un 60 % aproximadamente.

Figura 61. Estado de la muestra antes y después del ensayo de durabilidad.

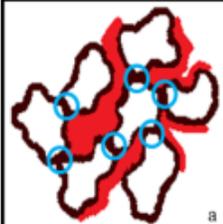
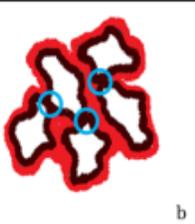


Tomado de: Evaluación del potencial de suelos lateríticos (ripió) para obras de infraestructura vial en el vichada.

Se desarrolló un equipo que permite determinar el ascenso del agua en una columna de suelo, el ensayo se realizó durante 24 horas, con registro de datos para intervalos de tiempo cortos, el valor de ascensión de agua en la columna de suelo fue de 30 cm, el cual se volvió constante después de un $t=8$ h, como resultado se concluyó que la ascensión capilar depende principalmente de la fracción fina del suelo, la cual es responsable de crear vacíos en el material con tamaños similares a los de un tubo capilar, también se identificó un valor máximo de ascensión capilar en el suelo, a partir del cual se alcanza una etapa de estabilización en donde el valor de ascensión capilar no varía en función del tiempo.

En cuanto a las propuestas dadas para la estabilización del suelo en estudio, en relación con el organosilano, Gonzales¹²⁶, guiada en investigaciones y usos anteriores de este, planteó tres interacciones organosilano – partículas de suelo distintas, representadas en tres dosificaciones diferentes, las concentraciones de organosilano que se definieron son 0.3 l/m³, 0.5 l/m³ y 1.0 l/m³, mostradas en la Tabla 51, con el fin de obtener una dosificación óptima la cual se calcula mediante la mezcla de agua y compuesto orgánico de silicio iónico, y es determinada de acuerdo a las necesidades de cada proyecto.

Tabla 51. Interacción del organosilano con las partículas de suelo.

Concentración de organosilano		
0.3 l/m ³	0.5 l/m ³	1 l/m ³
		
Contactos entre partículas		
90 % - 100 %	40 % - 50 %	0 % - 10 %
		

Tomado de: Evaluación del potencial de suelos lateríticos (ripio) para obras de infraestructura vial en el vichada.

Nuevamente se realizó el ensayo de Difracción de Rayos X, donde se preparó una muestra de Ripio tamaño arena con organosilano, de ésta se concluye que el organosilano reacciona con la superficie del mineral de cuarzo sin cambiar el espesor de la unidad cristalina.

Según el ensayo de Microscopia Electrónica de Transmisión, realizado a las tres concentraciones de organosilano, se concluye que, aunque el compuesto está presente en el material, los enlaces entre partículas se conservan.

Teniendo en cuenta que el organosilano es un compuesto impermeabilizante, se realizaron ensayos de compactación normal con el fin de identificar si había algún cambio en la densidad del suelo mezclado con el compuesto químico. Las

¹²⁶ RODRÍGUEZ, P. Evaluación del potencial de suelos lateríticos (ripio) para obras de infraestructura vial en el vichada. Bogotá, Colombia. 2017.

dosificaciones usadas fueron 0.3, 0.5, 1.0 y 2.0 l/m³, la última se incluyó con el fin de observar el comportamiento del suelo con una gran cantidad de organosilano, y de esa manera definir si la cantidad de compuesto agregado influye de manera constante, o si por el contrario hay una cantidad a partir de la cual las propiedades del suelo ya no se ven afectadas; se registraron caídas de hasta 6 % en el peso unitario seco, con respecto al óptimo del material sin aditivos, en las 4 concentraciones de organosilano, las disminuciones en la densidad seca del suelo con adición de organosilano, se debieron a que el compuesto orgánico afecta la trabajabilidad del suelo.

El ensayo de resistencia a la compresión inconfiada se realizó para las tres concentraciones de organosilano establecidas y se fallaron en dos edades distintas 3 y 15 días, como resultado, se identificó que sin importar la dosificación de organosilano, la resistencia a la compresión del material aumenta cuando el tiempo de curado es mayor en el cuarto de condiciones controladas, también se pudo observar que la probeta que contenía organosilano, tenía una mayor cohesión entre la fracción fina y la fracción granular del material, permitiendo una mayor continuidad en la muestra y que no se presentaran espacios vacíos; aunque el organosilano incrementa la cohesión entre las partículas del suelo, no es suficiente para que la mezcla de Ripio y el compuesto orgánico adquiera una consistencia tal que el ensayo de resistencia a la compresión inconfiada represente el estado del suelo.

El ensayo de CBR (%) se realizó para cada una de las concentraciones establecidas, los valores obtenidos muestran que entre mayor sea la adición de organosilano, mayor es la disminución en el valor de CBR en la etapa de falla en seco, como se muestra en la Tabla 49. De lo cual se concluyó que los valores de CBR de la mezcla de Ripio y organosilano, en condición seca y saturada, son óptimos para la implementación de terraplenes y para sub bases granulares, a excepción de la concentración de organosilano de 1.0 l/m³, que es la única que disminuye el valor de CBR (%) lo suficiente, para que no sea posible la ejecución de sub bases granulares con la mezcla del suelo y el compuesto orgánico.

Tabla 49. Valores de CBR en seco e inmersión, para mezclas de ripio y distintas concentraciones.

Concentración de organosilano (l/m³)	CBR (%)	CBR_{inmersión} (%)	ΔCBR (%)
0,3	45	59	31
0,5	31	47	52
1,0	23	24	4

Tomado de: Evaluación del potencial de suelos lateríticos (ripio) para obras de infraestructura vial en el vichada.

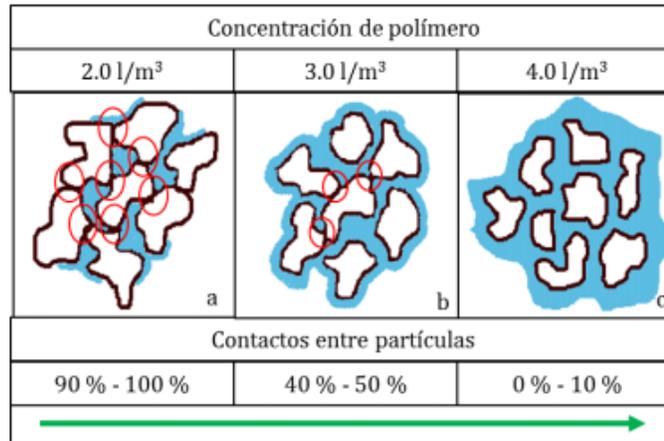
De acuerdo a los resultados del ensayo de permeabilidad, se pudo observar que solo en la dosificación de 0.3 l/m³ se logró una reducción del 22 % en la conductividad hidráulica, mientras que en las dosificaciones de 0.5 l/m³ y 1.0 l/m³ las permeabilidades fueron aproximadamente iguales o mayores que la del suelo laterítico en estado natural, sin embargo, la disminución en la permeabilidad no logra que el suelo laterítico cambie su naturaleza, la cual, de acuerdo al valor de permeabilidad corresponde a una arena con contenido de limo y arcilla, teniendo en cuenta la necesidad de evitar la infiltración de agua en la estructura de pavimento, se encuentran beneficiosos los resultados de los ensayos de permeabilidad, demostrando que el aditivo puede reducir el flujo de agua en el material.

El ensayo de durabilidad, se realizó para la mezcla de suelo laterítico y organosilano en una concentración de 0.3 l/m³, en donde se evidencia la acción del agua sobre el material, destruyendo la probeta en un 30 % aproximadamente, la cual muestra el efecto positivo del compuesto orgánico sobre el suelo laterítico, al conservar el material en buen estado aún bajo condiciones agresivas.

El ensayo de capilaridad se realiza para una mezcla de suelo laterítico y organosilano en una concentración de 0.3 l/m³, como resultado, se evidencia que la cantidad de agua absorbida por el material se redujo en un 73 %, con respecto a la cantidad en la columna de la mezcla de ripio con organosilano, por lo que puede concluirse que la adición de organosilano logra que el material se comporte hidráulicamente como una arena gruesa.

En cuanto a la propuesta de estabilización con polímeros, se utiliza un producto orgánico, correspondiente a una emulsión acrílica de polivinilo, compuesta en un 55 % de emulsión y 45 % de agua. La aplicación del producto en el suelo se realiza por medio de la mezcla del compuesto orgánico en agua, la concentración de ésta se obtiene variando la cantidad de agua, la definición de la cantidad ideal de polímero depende de las necesidades del proyecto, en afectan el desempeño de la mezcla factores como temperatura, proceso de mezclado y tipo de compactación. Se establecieron tres concentraciones para la mezcla de suelo laterítico – polímero, 2.0 l/m³, 3.0 l/m³ y 4.0 l/m³.

Figura 62. Interacción del polímero con las partículas de suelo.



Tomado de: Evaluación del potencial de suelos lateríticos (ripio) para obras de infraestructura vial en el vichada.

Nuevamente se realizó el ensayo de Difracción de Rayos X, donde se preparó una muestra de ripio tamaño arena con polímero, como resultado se concluye que el polímero reacciona con la superficie del mineral y disminuye el espesor de la unidad cristalina.

Para el ensayo de Microscopia Electrónica de Transmisión, se preparó una muestra con una concentración de 3.0 l/m³, como conclusión de las imágenes obtenidas, se observa que en los bordes de las partículas, se presentan algunos fragmentos más pequeños que han sido cubiertos por polímero, mientras que en la parte central aun el polímero no ha entrado en contacto.

El ensayo de resistencia a la compresión inconfiada se realizó para las tres dosificaciones de polímero establecidas y se fallaron en dos edades distintas 3 y 15 días, como resultado, se observó que los valores de resistencia a la compresión inconfiada registrados, muestran que el polímero puede producir un decremento o un incremento según la concentración del compuesto orgánico, también se pudo observar que el polímero logra mejorar la resistencia a la compresión inconfiada para las dosificaciones de 3.0 l/m³ y 4.0 l/m³, mientras que la dosificación de 2.0 l/m³ reduce la resistencia del material.

El ensayo de CBR (%) se realizó para cada una de las concentraciones establecidas, de las curvas realizadas fue posible identificar que solo para la

concentración 3.0 l/m³ de polímero se obtuvo un valor de CBR mayor que el que se obtuvo para el suelo laterítico, aunque el incremento fue solo del 2 % y para las concentraciones de 2.0 l/m³ y 4.0 l/m³, se observó una disminución en el valor de CBR. De acuerdo a los valores de CBR consignados en la Tabla 50, se puede verificar que el polímero no es eficiente frente a la acción del agua, en un estado crítico como aquel en el que la probeta está totalmente sumergida durante un periodo de tiempo prolongado y de acuerdo con los datos especificados por la normativa la mezcla de suelo laterítico y polímero podría implementarse solo en terraplenes y sub bases granulares.

Tabla 50. Valores de CBR en seco e inmersión, para mezclas de ripio y distintas concentraciones.

Concentración de polímero (l/m ³)	CBR (%)	CBR _{inmersión} (%)	ΔCBR (%)
2.0	54	45	-17
3.0	60	57	-5
4.0	48	34	-29

Tomado de: Evaluación del potencial de suelos lateríticos (ripio) para obras de infraestructura vial en el vichada.

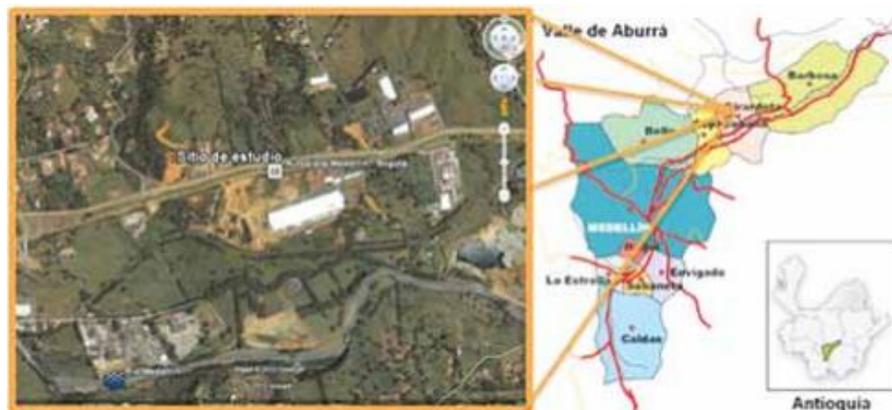
El ensayo de permeabilidad se realizó para las tres concentraciones de mezclas de suelo y polímero, los valores obtenidos muestran que el polímero no disminuye la permeabilidad del material para ninguna de las dosificaciones, y que por el contrario aumenta su valor en un mínimo de 140 % aproximadamente para 3.0 l/m³, siendo esta la dosificación en la que se registró el menor incremento, también se puede concluir que el polímero no contribuye con un posible aislamiento de las capas granulares del pavimento.

Para el ensayo de durabilidad, se elaboró una probeta de mezcla de suelo laterítico y polímero en una concentración de 3.0 l/m³, el estado final de la probeta fue un material desintegrado en un 95%, como conclusión de la prueba, la destrucción del 95 % de la probeta de suelo laterítico y polímero, comparada con la destrucción de la probeta de solo suelo laterítico que fue de 60 % aproximadamente, deja en evidencia el efecto negativo que tiene el compuesto orgánico sobre el suelo laterítico, al no conservar el material en buen estado mientras que está totalmente sumergido durante 5 horas.

En general se concluyó que la implementación del organosilano es viable en el suelo lateríticos, si se acepta la disminución de sus propiedades mecánicas, teniendo en cuenta que los valores de CBR son óptimos para la implementación de terraplenes y sub bases granulares, con respecto a las especificaciones mínimas exigidas por el INVIAS, y teniendo en cuenta los resultados de los ensayos mecánicos e hidráulicos de la mezcla suelo laterítico con polímero, se estableció que no existe una dosificación de polímero para la que se hayan encontrado efectos positivos en el suelo laterítico, y no se recomienda su implementación para la conformación de terraplenes y sub bases granulares.

Saldarriaga César y Saldarriaga Sebastián,¹²⁷ realizan la caracterización geotécnica de un suelo tropical ubicado en el municipio de Girardota, Antioquia, que se encuentra a 1.425 msnm y con temperatura promedio de 22°C, cuenta con una humedad relativa de 70% llegando a valores extremos de 40% en la época seca y 85% durante las lluvias y los promedios de lluvias anuales varían desde 1.400 mm hasta los 2.700 mm, para dar cumplimiento al objetivo, se efectuaron ensayos clásicos de mecánica de suelos como gravedad específica, contenido de humedad, límites de consistencia, granulometría y corte directo, y ensayos más adecuados para este tipo de suelos como lo es la clasificación MCT, análisis químicos, $\Delta\phi$, microscopía electrónica de barrido, difracción de rayos x, succión matricial, desagregación, colapso, entre otros, con el fin de definir la influencia que la laterización tiene en el comportamiento geotécnico del mismo.

Figura 63. Localización de la zona de estudio.



Tomado de: Caracterización geotécnica de un suelo tropical laterítico.

¹²⁷ SALDARRIAGA, S y SALDARRIAGA, C. Caracterización geotécnica de un suelo tropical laterítico. Medellín, Colombia. 2013.

Una vez realizados los diferentes ensayos de caracterización, se obtuvo un valor de G_s de 2.89 y como resultado de la clasificación por el sistema unificado se establece que el suelo corresponde a un limo de alta plasticidad (MH); también se realiza el ensayo MCT, del cual se observó que la muestra presentó una contracción diametral de 1,86 mm y una penetración de 0, lo que clasifica el suelo como arcilloso laterítico (LG'), para el caso de la determinación del pH se usaron dos soluciones, una en KCl y otra en H₂O; si la diferencia entre pH_{KCl} y pH_{H_2O} es positiva, indica la predominancia de oxi-hidróxidos de hierro y aluminio en el suelo y si es negativa, indica la predominancia de arcillominerales, como resultado se obtuvo un ΔpH de 0,17, lo que reveló la predominancia de oxi-hidróxidos de hierro y aluminio.

Tabla 51. Resultados de los ensayos físicos realizados.

w_{nat} (%)	G_s	e	Ll (%)	IP (%)	% Finos	USC	MCT	ΔpH
32	2,89	1,3	73	31	88	MH	LG'	0,17

Tomado de: Caracterización geotécnica de un suelo tropical laterítico.

Del ensayo de difracción de rayos x, se evidenció que como minerales principales están el cuarzo y la caolinita, así como moscovita, goetita y gibsita, también se estableció que el estado de meteorización no era tan profundo como para generar una estructura de macro y microporos típica de suelos tropicales lateríticos altamente meteorizados.

También se realizaron ensayos de corte directo de tipo consolidado drenado y el ensayo de consolidación se efectuó con el fin determinar el índice de colapso, este se realizó duplo-edómetro, en el cual se consolidan bajo las mismas cargas dos especímenes, uno con la humedad natural y el otro en estado saturado, el valor del índice de colapso puede verse en la Tabla 52, de la que se puede concluir que la muestra comienza a presentar colapso cuando es inundada y sometida a cargas superiores a 93 kPa.

Tabla 52. Clasificación para el índice de colapso.

Esfuerzo (kPa)	Índice colapso (%)	Gravedad del problema
0	0	Nulo
31	0	Nulo
93	2	Moderado
217	5	Problemático
464	10	Grave
959	13	Grave

Como conclusión a esta investigación, los resultados reflejaron la importancia de una adecuada caracterización de suelos tropicales lateríticos para determinar las propiedades altamente influyentes en la comprensión de problemas que ocurren en la ingeniería.

4. CONCLUSIONES

Se ha realizado una investigación extensa del estado del arte sobre el uso de suelos lateríticos en varios países tropicales, de la cual se pudo evidenciar que el estudio de su uso está bastante avanzado, principalmente en los métodos de caracterización y en los diferentes métodos de estabilización planteados en algunas regiones. No obstante, es necesario evaluar los límites de prueba y las especificaciones que se aplican actualmente a nivel internacional y lograr perfeccionarlos para su uso en Colombia.

Sobre la base de la revisión bibliográfica de una serie de especificaciones internacionales y regionales para el uso de lateritas en pavimentos, es claro que las especificaciones brasileñas permiten disminuciones considerables de los parámetros mecánicos en comparación con los rangos mínimos de los parámetros de las normas colombianas establecidas por el INVIAS, como es el caso del CBR, incluso para tráfico relativamente pesado, todo ello con el fin de poder utilizar estos materiales; por lo tanto, en vista del uso exitoso de la laterita en la construcción de carreteras de alto y bajo volumen en Brasil, es posible recomendar las especificaciones brasileñas como medida provisional de caracterización de suelos lateríticos para su uso como material en estructuras de pavimento hasta que se desarrollen las especificaciones locales relacionadas con el desempeño.

Los métodos brasileños pueden ser probablemente el primer enfoque como guía para la utilización de suelos lateríticos en Colombia, pero muchos de estos deberán modificarse para un uso más amplio; también serán necesarias pruebas comparativas de laboratorio de varios materiales encontrados en cada región donde se presentan para identificar los métodos de prueba y las técnicas de preparación de muestras más adecuados, así como establecer un conjunto de métodos estándar de prueba que podrían consistir en una combinación de métodos existentes, modificaciones o probablemente el desarrollo de nuevos métodos que permitan la correcta caracterización, clasificación y utilización de este material en estructuras de pavimento.

Es de importancia el manejo adecuado del material en la preparación de especímenes para la ejecución de ensayos de caracterización, ya que como se mencionó en el desarrollo del documento, esto repercute en los resultados de los ensayos desarrollados, conllevando a una caracterización incorrecta del material y por ende una utilización y trabajabilidad deficiente del suelo en la estructura en que fue empleado.

BIBLIOGRAFÍA

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Amostras de solo — Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. ABNT-NBR 6457:2016.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Solo-Analise granulométrica. ABNT-NBR 7181:1984.

AGINAM, C. H., CHIDOLUE, C. A y NWAKAIRE, C. Geotechnical Properties of Lateritic Soils from Northern Zone of Anambra State, Nigeria. Anambra, Nigeria. 2014.

BALBO, T. Pavimentação asfáltica materiais, projeto e restauração. São Paulo. 2007.

BERRY, P y REID, D. Capítulo 1: propiedades físicas y químicas de los suelos utilizados en ingeniería. Mecánica de suelos. McGRAW-HILL. 7-20 p.

BISWAL, D.R. Characterization of granular lateritic soils as pavement material. Odisha, India. 2015.

BOGADO, G y FRANCO, F. Propiedades geotécnicas de suelos residuales relevantes para su clasificación: estado actual de conocimiento. 1014.

BUJANG, B, TOLL, D y PRASAD, A. Handbook of Tropical Residual Soils Engineering. Taylor & Francis Group. 2013.

CONSORCIO GEOMINAS-GEMI. Estudios de cartografía geológica a escala 1.100.000 bloque 8 en el vichada. Medellín, 2014.

DAS, Braja.. Fundamentos de ingeniería geotécnica. California: Sacramento. p.1.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. Pavimentação – Base estabilizada granulometricamente - Especificação de serviço. 2010. p. 3.

DUQUE, G. Intemperismo o meteorización. Manual de geología para ingenieros. Manizales, Colombia. 2003.

Geological Society Professional Handbooks. Suelos residuales tropicales. London: The Geological Society. 1997.

GIDIGASU, M. Laterite soil engineering, Pedogenesis and engineering principles. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company, 1976.

IHS Markit. Methods of test for Soils for civil engineering purposes - Part 3: Chemical and electrochemical tests. British Standards Institution (BSI). 2018

INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE. Identificación, comportamiento y utilización de suelos residuales. Primera fase. QuerÉtaro, 1996. 9-20 p.

INVIAS. Especificaciones generales de construcción de carreteras y normas de ensayo para carreteras. Bogotá D.C., Colombia, 2013.

LYLE, Alexander y CADY, John. Genesis and hardening of laterite in soils. Washington: United States Department of Agriculture, 1962.

MAHALINGA, U y WILLIAMS, D. Properties and performance of lateritic soil in road pavements. Queensland, Australia, 1996.

MALAVAR, N y TAFUR, R. Lineamientos básicos para la clasificación de suelos lateríticos-tropicales en Colombia orientado a pavimentos. Bogotá. 2018.

MINMINAS. Explotación de materiales de construcción: Canteras y material de arrastre. Universidad Pedagógica y Tecnológica De Colombia. 2013.

MONTES, S. Determinación de la resistencia a la fatiga de material tipo laterita estabilizado con cemento mediante un montaje experimental tipo tensión-compresión. Bogotá D.C. 2015.

MT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. Norma Rodoviária. Solos compactados em equipamento miniatura – Mini-MCV. DNER-ME 258/94. p. 2-3.

MT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. Norma Rodoviária. Solos compactados em equipamento miniatura – Mini-CBR. DNER-ME 254/97. p. 2-4.

MT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. Norma Rodoviária. Solos compactados com equipamento miniatura – determinação da perda de massa por imersão DNER-ME 256/94. p. 2.

NETTERBERG, F. Review of Specifications for the Use of Laterite in Road Pavements. South Africa. 2014.

NOGAMI, J y VILLIBOR, D. Pavimentacao de Baixo Custo con Solos Lateriticos. Sao Paulo. Brasil. 1995.

OSORIO, Camila. Caracterización física y análisis del comportamiento mecánico de lateritas colombianas a nivel de partículas. Bogotá. 2016.

OMOTOSO, A.O, OJO, J.O y ADETOLAJU, E.T. Engineering Properties of Lateritic Soils around Dall Quarry in Sango. Ilorin, Nigeria. 2012.

PÉREZ, Gabriel. Influencia de la succión en la deformación cortante de suelos lateríticos. Bogotá. 2017. 22-30 p.

Portal de tecnología. Considerações sobre Solos Tropicais e Conceito de pavimentos de Baixo Custo. <http://www.portaldetecnologia.com.br/pavimentacao-obras/consideracoes-sobre-solos-tropicais-e-conceito-de-pavimentos-de-baixo-custo/>. 2009.

RIVEROS, S. La Orinoquia colombiana. Artículo del Boletín de la Sociedad geográfica de Colombia. 1983.

RODRÍGUEZ, P. Evaluación del potencial de suelos lateríticos (ripió) para obras de infraestructura vial en el vichada. Bogotá, Colombia. 2017.

SALDARRIAGA, S y SALDARRIAGA, C. Caracterización geotécnica de un suelo tropical laterítico. Medellín, Colombia. 2013.

SUÁREZ DÍAZ, Jaime. Capítulo 10: Suelos residuales. Deslizamientos. Tomo I: Análisis Geotécnico. Bucaramanga: Ingeniería de Suelos Ltda, 1998. 390-438 p.

TORRES, Carlos. Influencia de la microestructura en la rigidez máxima de un perfil de suelo residual, en condiciones edométricas. Bogotá. 2017. 38-46 p.

VILLIBOR, D y LANCAROVICI, D. Clasificacao de solos tropicais de granulacao fina e grossa. Rio de Janeiro. Revista Pavimentacao. Edicao 43. 2017.

WESLEY, Laurence. Geotechnical Engineering in residual soils. Canada: John Wiley & Sons. Inc, 2010

YOUNOUSSA, M, KARFA, T, RAGUILNABA, O, KALSIBIRI, K, PHILIPPE, B Y HUGUES, T. Geotechnical, mechanical, chemical and mineralogical characterization of a lateritic gravels of Sapouy (Burkina Faso) used in road construction. Burkina Faso. 2006.

ZONN, S. Experiencia sobre la clasificación de los suelos tropicales y subtropicales. Artículo del Boletín de la Sociedad geográfica de Colombia. 1971.