

DETERMINACIÓN Y EVALUACIÓN DEL EFECTO CLIMA SOBRE EL MODULO  
RESILIENTE (INFERIDO DE CBR) DE SUELOS DE SUBRASANTE, PARA EL  
DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES, EN CONDICIÓN DE SATURACIÓN  
PARCIAL PARA SUBRASANTES TÍPICAS DE CENIZAS VOLCÁNICAS EN  
POPAYÁN, CAUCA. FASE 1.

DIANA LORENA SALAZAR LEÓN

CÓDIGO: 100412021119

UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL  
DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA  
POPAYÁN

2017

DETERMINACIÓN Y EVALUACIÓN DEL EFECTO CLIMA SOBRE EL MODULO  
RESILIENTE (INFERIDO DE CBR) DE SUELOS DE SUBRASANTE, PARA EL  
DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES, EN CONDICIÓN DE SATURACIÓN  
PARCIAL PARA SUBRASANTES TÍPICAS DE CENIZAS VOLCÁNICAS EN  
POPAYÁN, CAUCA. FASE 1.

DIANA LORENA SALAZAR LEÓN

Trabajo de grado en la modalidad Investigación  
para optar al título de Ingeniero Civil

Director

Prof. Ph.D. Ing. LUCIO GERARDO CRUZ VELASCO

UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL  
DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA  
POPAYÁN

2017

Nota de aceptación

---

---

---

---

---

Firma del director

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

Popayán, 25 de Julio de 2017.

A mi madre, mi padre y mi hermana, por todo su amor, comprensión y apoyo. Y por ser la inspiración que me motiva cada día a superar todos mis miedos.

## AGRADECIMIENTOS

A Dios por regalarme la vida y por ser mi guía y fortaleza durante este proceso. A mi madre Rosaura Leon, mi padre Carlos Salazar y mi hermana Daniela Salazar, por confiar en mí, por recorrer conmigo este camino y apoyarme desde el primer día.

Al Doctor Lucio Cruz, docente de la facultad de ingeniería civil, por su orientación y apoyo continuo durante el desarrollo del proyecto. Gracias por confiar en mis cualidades y motivarme a entrar en el increíble mundo de la investigación.

A la Universidad del Cauca, principalmente a los docentes porque sin lugar a duda, el conocimiento y la pasión impartidos en clase son la base fundamental que encamina al estudiante a adentrarse dentro de uno de los tantos campos que abarca la ingeniera civil. Y a las personas que trabajan en el Laboratorio de Suelos y Pavimentos de la Facultad de Ingeniería Civil por el acompañamiento y guía durante la fase experimental de esta investigación.

A Harold Andrés Núñez Bustos, por su valiosa ayuda en la realización de los ensayos, a Stevens Perafán y Alejandro Orozco por su colaboración en la toma de muestra mensual, a mis compañeros y amigos, por ser mi apoyo emocional y a todas las demás personas que de alguna u otra forma aportaron a esta investigación.

## TABLA DE CONTENIDO

1	Introducción.....	1
1.1	Planteamiento del problema.....	3
1.2	Organización del trabajo de investigación.....	6
2	Marco teórico.....	8
2.1	Caracterización general de suelos de la zona de estudio.....	8
2.2	Conceptos generales sobre pavimentos.....	12
2.2.1	Definición de pavimento.....	12
2.2.2	Pavimento flexible.....	12
2.2.3	Capas del pavimento flexible y sus respectivas funciones.....	12
2.3	Módulo resiliente de materiales de subrasante (Mr).....	14
2.4	Suelos parcialmente saturados.....	17
2.4.1	Fases componentes de suelos parcialmente saturados.....	18
2.4.2	Estado de esfuerzos suelos parcialmente saturados.....	21

2.4.3	Curva de retención de agua del suelo o curva característica suelo- agua – soil water characteristic curve (swcc) .....	25
2.4.4	Guía para diseño empírico mecanicista de pavimentos, mechanistic-empirical pavement desing guide (MEPDG) - AASHTO 2008.....	38
2.5	Modelo Climático de la MEPDG.....	44
2.5.1	Estimación de la succión mensual en términos del índice de Thornthwaite	45
2.5.2	Modelo para la Determinación de la succión en función del índice de Thornthwaite en suelos de subrasante considerados como pasticos ((P200 $\geq$ 10% ó wPI $\geq$ 2.0))	55
2.5.3	Determinación de la SWCC, teniendo en cuenta el nivel de diseño según la guía de diseño de pavimentos empírico mecanicista (MEPDG) .....	57
2.6	Análisis del modelo para determinación del Mr. ....	64
2.6.1	Determinación del factor ambiental <b><i>Famb</i></b> .....	66
3	METODOLOGIA, TOMA DE MUESTRAS DE SUELOS Y ENSAYOS DE LABORATORIO. ....	67
3.1	Metodología general.....	67
3.2	Localización de los lugares de muestreo .....	67
3.3	Procedimientos de ensayos.....	74
3.3.1	Determinación en el laboratorio del contenido de agua (Humedad) de muestras de suelo, roca y mezclas de suelo-Agregado-INV-E-122-13.....	74

3.3.2	Determinación del límite líquido de los suelos – INV-E-125-13 .....	75
3.3.3	Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos- INV-E-126-13 .....	76
3.3.4	Determ. de los tamaños de las partículas de los suelos INV-E-123-13 .....	76
3.3.5	Determinación de la gravedad específica de las partículas sólidas de los suelos y del llenante mineral, empleando un picnómetro con agua INV-E-128-13.....	78
3.3.6	Relaciones Humedad- Peso unitario seco en los suelos (Ensayo normal de compactación)- INV-E-141-13.....	79
3.3.7	Relaciones Humedad- Peso unitario seco en los suelos (Ensayo modificado de compactación)- INV-E-142-13 .....	81
3.3.8	CBR de suelos compactados en el laboratorio y sobre muestra inalterada- INV-E-148-13 (CBR Optimo).....	81
3.3.9	Ensayo CBR inalterado.....	83
3.3.10	Compresión inconfiada en muestras de suelo -INV-E-152-13 .....	84
3.3.11	Determinación de la succión de un suelo usando papel filtro- INV-E-159-13	85
3.4	Tablas resúmenes de Resultado de ensayos de laboratorio.....	93
3.5	Análisis de resultados.....	96
3.5.1	Análisis de resultados de laboratorio .....	97
4	. Resultados del modelo de la mepdg .....	101
4.1	Precipitación y temperatura media mensual.....	101



4.2	. Índice climático -INDICE DE HUMEDAD THORNTHWAITE .....	105
4.2.1	Determinación de la evapotranspiración potencial “ETP”. .....	105
4.2.2	Determinación de almacenamiento, déficit o escorrentía mediante el Balance hídrico. ....	109
4.2.3	Determinación del TMI. ....	113
4.3	Estimación de la succión mensual en términos del ÍNDICE DE THORNTHWAITE, en suelos considerados como plásticos (( $P_{200} \geq 10\%$ ó $w_{PI} \geq 2.0$ ))	115
4.4	Determinación de la SWCC, teniendo en cuenta el nivel de diseño según la guía de diseño de pavimentos empírico mecanicista (MEPDG) .....	122
4.4.1	Determinación de SWCC para nivel 2.....	122
4.4.2	Determinación de SWCC para nivel 1.....	127
4.5	Determinación de Correlación para estimación del Módulo resiliente en función del CBR 133	
4.6	Módulo resiliente calculado con el modelo escogido TRL ( $CBR > 12$ ).....	137
4.7	Determinación del Módulo resiliente - Mr- Modelo MEPDG.....	139
4.7.1	Módulo resiliente Nivel 2 .....	139
4.7.2	Modulo resiliente Nivel 1 .....	157
5	Comparativa de resultados .....	174
6	. ANALISIS DE RESULTADOS.....	211

7	. CONCLUSIONES.....	215
8	Bibliografía.....	218

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Volcanes en el departamento del Cauca, obtenido de Google Maps. ....	8
Figura 2: Capas Típicas de un pavimento flexible .....	13
Figura 3: Mecanismo de deformación de la subrasante debido a la aplicación de carga cíclica, tomado de: (Secretaria de comunicaciones y transportes instituto Mexicano del transporte, 2001).....	15
Figura 4 Manifestación de fuerzas de tensión superficial en la interfaz aire-agua-sólido, tomado de: (Lu & Likos, 2004) .....	19
Figura 5: Fases continuas de un elemento de suelo parcialmente saturado, Tomado de: (Clifton , Wilson, & Barbour, 1999) .....	20
Figura 6: Clasificación de suelos parcialmente saturados (Carreira, 2013). ....	21
Figura 7: Estado de esfuerzo para partículas de suelo y membrana contráctil en suelo parcialmente saturado, Tomado de: (Clifton , Wilson, & Barbour, 1999). ....	24
Figura 8:Zonas típicas de la curva característica- Succión en función del grado de saturación, Tomado de: (García, 2008) .....	27
Figura 9:Curva característica suelo agua para suelo arenoso, Limoso y arcilloso, Tomado de: (Fredlund & Xiang, 1994) .....	28

Figura 10: Trayectorias de secado y humedecimiento-Succión en función del contenido volumétrico de agua, Tomado de: (Fredlund & Xiang, 1994) .....	29
Figura 11: Esquema de ensayo papel filtro - Succión matrica, Tomado de: (Lu & Likos, 2004).....	31
Figura 12: Esquema de ensayo papel filtro - Succión Total, Tomado de:(Lu & Likos, 2004) .....	31
Figura 13: Dibujo esquemático del tensiómetro de laboratorio de punta pequeña, Tomado de: (Lu & Likos, 2004) .....	32
Figura 14: Medición de succión matricial por el método de traslación de ejes-Esquema succión transversal de la interfase suelos no saturado-disco de cerámica (Lu & Likos, 2004) .....	33
Figura 15: Diagrama de flujo para la determinación del TMI.....	52
Figura 16: División de Colombia según índice Thornthwaite, Tomado de: (IDEAM, 2015) .....	54
Figura 17: Recuadro de dialogo de la función SOLVER .....	61
Figura 18: Ubicación de los lugares de toma de muestras.....	68
Figura 19: Fechas de toma de muestras .....	69
Figura 20: Equipo para muestreo.....	69
Figura 21: Cobertura vegetal - ingeniería civil.....	70
Figura 22: Inicio de toma de muestras ingeniería civil.....	70
Figura 23: Bloque tallado- Ingeniería civil.....	71
Figura 24: Bloque tallado- La ladrillera .....	71
Figura 25: CBR inalterado- la ladrillera .....	72

Figura 26: CBR inalterado- Ingeniería civil .....	72
Figura 27: Identificación de muestras en campo. ....	73
Figura 28: Ensayo de limite líquido y plástico. ....	75
Figura 29: Ensayo de granulometría por tamizado. ....	77
Figura 30: Ensayo proctor estándar-Método A.....	79
Figura 31: Montaje para ensayos CBR .....	83
Figura 32: Ensayo CBR inalterado .....	83
Figura 33: Ensayo de compresión inconfiada.....	84
Figura 34: Muestras talladas para ensayo de succión mátrica - Ingeniería civil .....	86
Figura 35: Muestras talladas para ensayo de succión mátrica– La ladrillera .....	86
Figura 36: Empacado de la muestra después del ciclo de secado.....	87
Figura 37: Proceso de secado de papeles filtro.....	88
Figura 38: Recipientes para ensayo de succión .....	88
Figura 39: Materiales para ensayo de succión .....	89
Figura 40: Colocación del papel filtro en la muestra.....	89
Figura 41: Bolsas plásticas para almacenamiento de papeles filtro.....	90
Figura 42: Determinación del peso de papeles filtro húmedos.....	91
Figura 43: Muestras para determinación de humedad .....	92
Figura 44: Secado de muestras en horno .....	92
Figura 45: Muestras secas.....	92
Figura 46: Variación de Precipitación, P, y evapotranspiración ETP, en el año-Estación meteorológica Universidad del Cauca.....	111

Figura 47: Variación de Precipitación, P, y evapotranspiración ETP, en el año-Serie histórica Estación meteorológica Aeropuerto Guillermo Leon Valencia.....	112
Figura 48: Variación de Precipitación, P, y evapotranspiración ETP, en el año-Promedio Series históricas .....	112
Figura 49: Variación del TMI en el año-Serie Histórica Estación meteorológica Universidad del Cauca.....	114
Figura 50: Variación del TMI en el año-Serie histórica Estación meteorológica Aeropuerto Guillermo Leon Valencia .....	114
Figura 51: Variación del TMI en el año-Promedio Series históricas .....	115
Figura 52: Succión Matricial mensual Muestra Ing. Civil -Serie histórica estación meteorológica Universidad del Cauca.....	117
Figura 53: Succión Matricial mensual Muestra La ladrillera -Serie histórica estación meteorológica Universidad del Cauca.....	118
Figura 54: Succión Matricial mensual Muestra Ing. Civil -Serie histórica estación meteorológica Aeropuerto Guillermo Leon Valencia .....	119
Figura 55: Succión Matricial mensual Muestra La Ladrillera -Serie histórica estación meteorológica Aeropuerto Guillermo Leon Valencia .....	119
Figura 56: Succión Matricial mensual Muestra de Ing. Civil - Promedio Series históricas .....	120
Figura 57: Succión Matricial mensual Muestra La Ladrillera -Promedio Series histórica .....	121
Figura 58: SWCC N2 - succión matricial Vs Contenido volumétrico de agua - Muestra ing. Civil.....	123

Figura 59: SWCC N2- succión matricial Vs grado de Saturación - Muestra ing. Civil	124
Figura 60: SWCC N2 - succión Vs contenido volumétrico de agua - Muestra de la ladrillera.....	125
Figura 61: SWCC N2 - Succión vs grado de Saturación - Muestra de la ladrillera .....	126
Figura 62:SWCC N1-Succión Vs grado de saturación - Muestra de Ing. Civil.....	130
Figura 63:SWCC N1-Succión Vs Contenido Volumétrico - Muestra de Ing. Civil.....	130
Figura 64: SWCC N1-Succión Vs grado de saturación - Muestra de la ladrillera .....	132
Figura 65: SWCC N1-Succión Vs Contenido Volumétrico - Muestra de la ladrillera..	133
Figura 66: Banda de la desviación estándar – Muestra de ing. Civil.....	135
Figura 67: Banda de la desviación estándar – Muestra de La Ladrillera.....	136
Figura 68: % de Saturación mensual Muestra de Ing. Civil N2-Serie Histórica Estación meteorológica Universidad de Cauca. ....	139
Figura 69: % de Saturación mensual Muestra de La Ladrillera N2-Serie Histórica Estación meteorológica Universidad de Cauca. ....	140
Figura 70: % de Saturación mensual Muestra de Ing. Civil N2-Serie Histórica Estación meteorológica Aeropuerto. ....	141
Figura 71: % de Saturación mensual Muestra de La Ladrillera N2-Serie Histórica Estación meteorológica Aeropuerto. ....	142
Figura 72: % de Saturación mensual Muestra de Ing. Civil N2-Promedio Series Históricas .....	143
Figura 73: % de Saturación mensual Muestra de La Ladrillera N2-Promedio Series Históricas.....	143

Figura 74: Mr Muestra Ing. Civil N2-Serie histórica Estación Meteorológica Universidad del Cauca .....	148
Figura 75: CBR Muestra Ing. Civil N2-Serie histórica Estación Meteorológica Universidad del Cauca.....	148
Figura 76: $F_{amb}$ Muestra Ing. Civil N2-Serie histórica Estación Meteorológica Universidad del Cauca .....	149
Figura 77: Mr Muestra Ing. Civil N2-Serie histórica Estación Meteorológica Aeropuerto Guillermo Leon Valencia .....	149
Figura 78: CBR Muestra Ing. Civil N2-Serie histórica Estación Meteorológica Aeropuerto Guillermo Leon Valencia .....	150
Figura 79: $F_{amb}$ Muestra Ing. Civil N2-Serie histórica Estación Meteorológica Aeropuerto Guillermo Leon Valencia .....	150
Figura 80: Mr Muestra Ing. Civil N2- Promedio Series Históricas.....	151
Figura 81: CBR Muestra Ing. Civil N2- Promedio Series Históricas.....	151
Figura 82: $F_{amb}$ Muestra Ing. Civil N1- Promedio Series Históricas.....	152
Figura 83: Mr Muestra de la ladrillera N2 - Serie histórica Estación Meteorológica Universidad del Cauca.....	152
Figura 84: CBR Muestra de la ladrillera N2 - Serie histórica Estación Meteorológica Universidad del Cauca.....	153
Figura 85: $F_{amb}$ Muestra de la ladrillera N2 - Serie histórica Estación Meteorológica Universidad del Cauca.....	153
Figura 86: Mr Muestra de la ladrillera N2 - Serie histórica Estación Meteorológica Aeropuerto Guillermo Leon Valencia .....	154



Figura 87: CBR Muestra de la ladrillera N2 - Serie histórica Estación Meteorológica Aeropuerto Guillermo Leon Valencia .....	154
Figura 88: Famb Muestra de la ladrillera N2 - Serie histórica Estación Meteorológica Aeropuerto Guillermo Leon Valencia .....	155
Figura 89: Mr Muestra de la ladrillera N2 – Promedio Series históricas .....	155
Figura 90: CBR Muestra de la ladrillera N2 – Promedio Series históricas .....	156
Figura 91: Famb Muestra de la ladrillera N2 – Promedio Series históricas .....	156
Figura 92: % de Saturación mensual Muestra de Ing. Civil N1-Serie Histórica Estación meteorológica Universidad de Cauca. ....	157
Figura 93: % de Saturación mensual Muestra de la ladrillera N1-Serie Histórica Estación meteorológica Universidad de Cauca. ....	158
Figura 94: % de Saturación mensual Muestra de Ing. Civil N1-Serie Histórica Estación meteorológica Aeropuerto Guillermo Leon Valencia. ....	159
Figura 95: % de Saturación mensual Muestra de la ladrillera N1-Serie Histórica Estación meteorológica Aeropuerto Guillermo Leon Valencia. ....	159
Figura 96: % de Saturación mensual Muestra de Ingeniería Civil N1-Promedio Series Históricas.....	160
Figura 97: % de Saturación mensual Muestra de La Ladrillera N1-Promedio Series Históricas.....	161
Figura 98: Mr Muestra Ing. Civil N1-Serie histórica Estación Meteorológica Universidad del Cauca .....	165
Figura 99: CBR Muestra Ing. Civil N1-Serie histórica Estación Meteorológica Universidad del Cauca.....	165

Figura 100: $F_{amb}$ Muestra Ing. Civil N1-Serie histórica Estación Meteorológica Universidad del Cauca.....	166
Figura 101: Mr Muestra Ing. Civil N1-Serie histórica Estación Meteorológica Aeropuerto Guillermo Leon Valencia .....	166
Figura 102: CBR Muestra Ing. Civil N1-Serie histórica Estación Meteorológica Aeropuerto Guillermo Leon Valencia .....	167
Figura 103: $F_{amb}$ Muestra Ing. Civil N1-Serie histórica Estación Meteorológica Aeropuerto Guillermo Leon Valencia .....	167
Figura 104: Mr Muestra Ing. Civil N1- Promedio Series Históricas.....	168
Figura 105: CBR Muestra Ing. Civil N1- Promedio Series Históricas.....	168
Figura 106: $F_{amb}$ Muestra Ing. Civil N1- Promedio Series Históricas.....	169
Figura 107: Mr Muestra de la ladrillera N1 - Serie histórica Estación Meteorológica Universidad del Cauca.....	169
Figura 108: CBR Muestra de la ladrillera N1 - Serie histórica Estación Meteorológica Universidad del Cauca.....	170
Figura 109: $F_{amb}$ Muestra de la ladrillera N1 - Serie histórica Estación Meteorológica Universidad del Cauca.....	170
Figura 110: Mr Muestra de la ladrillera N1 - Serie histórica Estación Meteorológica Aeropuerto Guillermo Leon Valencia .....	171
Figura 111: CBR Muestra de la ladrillera N1 - Serie histórica Estación Meteorológica Aeropuerto Guillermo Leon Valencia .....	171
Figura 112: $F_{amb}$ Muestra de la ladrillera N1 - Serie histórica Estación Meteorológica Aeropuerto Guillermo Leon Valencia .....	172

Figura 113: Mr Muestra de la ladrillera N1 – Promedio Series históricas .....	172
Figura 114: CBR Muestra de la ladrillera N1 – Promedio Series históricas .....	173
Figura 115: Famb Muestra de la ladrillera N1 – Promedio Series históricas .....	173
Figura 116: Temperatura media mensual [°C] - Series históricas [2007-2016] .....	174
Figura 117: Precipitación mensual [°C] - Series históricas [2007-2016] .....	175
Figura 118: TMI mensual y Anual- Series históricas [2007-2016] .....	175
Figura 119: Succión Matricial mensual Muestra de Ing. Civil .....	176
Figura 120 Succión Matricial mensual Muestra de la ladrillera .....	176
Figura 121: SWCC-N2: Muestra Ing. civil y Muestra de la ladrillera. ....	177
Figura 122: SWCC N1 Muestra Ing. Civil y Muestra de la ladrillera. ....	177
Figura 123: SWCC N1 y SWCC N2 Muestra de ing. Civil. ....	178
Figura 124: SWCC N1 y SWCC N2 Muestra de La Ladrillera.....	178
Figura 125: % de saturación N2 - Muestra de Ing. Civil.....	179
Figura 126: % de saturación N2 - Muestra de La Ladrillera .....	180
Figura 127: % de saturación N2 Serie Histórica Estación Meteorológica Universidad del Cauca. ....	180
Figura 128: % de saturación N2 Serie Histórica Estación Meteorológica Aeropuerto Guillermo Leon Valencia. ....	180
Figura 129: % de saturación N2 Promedio Series Históricas.....	181
Figura 130: % de saturación – N1 Muestra Ing. Civil.....	181
Figura 131: % de saturación – N1 Muestra de la Ladrillera.....	182
Figura 132: % de saturación N1 Serie Histórica Estación Meteorológica Universidad del Cauca. ....	182

Figura 133: % de saturación N1 Serie Histórica Estación Meteorológica Aeropuerto Guillermo Leon Valencia. ....	183
Figura 134: % de saturación N1 Promedio Series Históricas .....	183
Figura 135: % de saturación Muestras Ing. Civil. ....	184
Figura 136: % de saturación Muestra de la ladrillera. ....	185
Figura 137: Mr N2 – Muestra de Ing. Civil.....	186
Figura 138: Mr N2 – Muestra de La Ladrillera .....	186
Figura 139: Mr N1 – Muestra de Ing. Civil.....	187
Figura 140: Mr N1 – Muestra de La ladrillera.....	187
Figura 141: Mr modelo Climático MEPDG Muestra Ing. Civil.....	189
Figura 142: Mr modelo Climático MEPDG Muestra de a ladrillera .....	190
Figura 143: Comparativa Mr Modelo MEPDG y Mr en Función de CBR- Serie Histórica estación meteorológica Universidad del Cauca-Nivel 2-Muestra Ing. Civil.....	196
Figura 144: Comparativa Mr Modelo MEPDG y Mr en Función de CBR- Serie Histórica estación meteorológica Universidad del Cauca-Nivel 2-Muestra de la ladrillera. ....	197
Figura 145: Comparativa Mr Modelo MEPDG y Mr en Función de CBR- Promedio Series Históricas -Nivel 2-Muestra Ing. Civil. ....	200
Figura 146: Comparativa Mr Modelo MEPDG y Mr en Función de CBR- Promedio Series Históricas -Nivel 2-Muestra de la.....	201
Figura 147: Comparativa Mr Modelo MEPDG y Mr en Función de CBR- Serie Histórica estación meteorológica Universidad del Cauca-Nivel 1-Muestra Ing. Civil.....	205
Figura 148: Comparativa Mr Modelo MEPDG y Mr en Función de CBR- Serie Histórica estación meteorológica Universidad del Cauca-Nivel 1-Muestra de la ladrillera. ....	206

Figura 149: Comparativa Mr Modelo MEPDG y Mr en Función de CBR- Serie Histórica estación meteorológica Aeropuerto Guillermo Leon Valencia-Nivel 1-Muestra Ing. Civil .....	207
Figura 150: Comparativa Mr Modelo MEPDG y Mr en Función de CBR- Serie Histórica estación meteorológica Aeropuerto Guillermo Leon Valencia-Nivel 1-Muestra de la Ladrillera .....	208
Figura 151: Comparativa Mr Modelo MEPDG y Mr en Función de CBR- Promedio Series Históricas - Nivel 1-Muestra Ing Civil. ....	209
Figura 152: Comparativa Mr Modelo MEPDG y Mr en Función de CBR- Promedio Series Históricas - Nivel 1-Muestra de La Ladrillera.....	210

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Ecuaciones para la estimación del MR de la subrasante en función del CBR (Rondon, Fernández, & Hernández , 2013) & (Sánchez & Campagnoli, 2016).....	16
Tabla 2: Zonas de acuerdo a la ubicación del NF y sus características. (Soto, 2008).....	18
Tabla 3: Fases componentes en suelos parcialmente saturados (Soto, 2008).....	18
Tabla 4: Ecuaciones propuestas para la determinación de SWCC en (Matlan, Mukhlisin, & Taha, 2014).....	35
Tabla 5: Niveles jerárquicos para el ingreso e información en el MEPDG (Hernández, Garnica, & Solorio, 2017) .....	44
Tabla 6: Valores de N tabulados.....	50
Tabla 7: Clasificación según el índice de Thornthwaite.....	53
Tabla 8: Constantes de regresión para TMI-P <sub>200</sub> /WPIModel (NCHRP, 2004) .....	55
Tabla 9:Procedimiento para determinar SWCC, Nivel 1 MEPDG, (NCHRP, 2004) .....	59
Tabla 10: Parámetros de la SWCC a iterar .....	60
Tabla 11: Datos y Cálculos para ajuste de la SWCC.....	61
Tabla 12: Procedimiento para determinar SWCC, Nivel 2 MEPDG en (NCHRP, 2004) .....	63

Tabla 13: Valores de a, b y Km para materiales de grano grueso y materiales de grano fino (NCHRP, 2004) .....	65
Tabla 14: Ensayos por muestra y su periodicidad .....	67
Tabla 15: Serie de tamices para granulometría.....	77
Tabla 16:Métodos para realizar el ensayo normal de compactación .....	80
Tabla 17: Tabla resumen de resultados de ensayos de laboratorio única vez.....	93
Tabla 18: Tabla resumen de Ensayo CBR inalterado- Muestra ing. civil, realizado mensualmente. ....	93
Tabla 19: Tabla resumen de Ensayo CBR inalterado- Muestra de la ladrillera, realizado mensualmente. ....	93
Tabla 20: Tabla resumen de resultados de ensayos de succión matricial, realizado mensualmente y también utilizando muestras secadas al aire.....	95
Tabla 21: Clasificación de las muestras.....	96
Tabla 22. Serie histórica de Temperatura media mensual [2007-2016] - Estación meteorológica Universidad del cauca.....	102
Tabla 23:Serie histórica de precipitación mensual [2007-2016] - Estación meteorológica Universidad del cauca.....	102
Tabla 24: Serie histórica de Temperatura media mensual [2007-2015]- -Estación meteorológica del aeropuerto Guillermo Leon Valencia .....	103
Tabla 25: Serie histórica de precipitación mensual I [2007-2015]- Estación- Estación meteorológica del aeropuerto Guillermo Leon Valencia .....	103
Tabla 26: Valores promedio de precipitación mensual - Estación meteorológica Universidad del Cauca y aeropuerto Guillermo Leon Valencia.....	104

Tabla 27: Índice de calor mensual “i” y anual “I”-.....	105
Tabla 28: ETP <sub>sin corregir</sub> – Series históricas [2006-2017] .....	105
Tabla 29: Ubicación estaciones meteorológicas.....	106
Tabla 30: Valores de Número de horas de sol “N” - Tabulados.....	106
Tabla 31: ETP <sub>corregida</sub> mensual- Estación Meteorológica Universidad del cauca.....	107
Tabla 32: ETP <sub>corregida</sub> mensual- Estación Meteorológica Aeropuerto Guillermo Leon Valencia.....	107
Tabla 33: ETP <sub>corregida</sub> mensual- Promedio Estaciones Meteorológicas Universidad del Cauca y Aeropuerto Guillermo Leon Valencia .....	108
Tabla 34: Cuadro comparativo ETP <sub>corregida</sub> .....	108
Tabla 35: Datos iniciales para el balance hídrico. ....	109
Tabla 36: Balance hídrico inicial- Serie histórica Estación meteorológica Universidad del Cauca .....	109
Tabla 37: Balance hídrico 2- Serie histórica Estación meteorológica Universidad del Cauca .....	110
Tabla 38: Balance hídrico - Estación meteorológica Aeropuerto Guillermo Leon Valencia .....	110
Tabla 39: Balance hídrico – Promedio Estaciones meteorológica Universidad del Cauca y Aeropuerto Guillermo Leon Valencia .....	111
Tabla 40: Índice de humedad “Ih” e índice de Aridez “Ia”. ....	113
Tabla 41: Índice de Thornthwaite “TMI”. ....	113
Tabla 42: Constantes de regresión para TMI-P <sub>200</sub> /WPIModel. ....	115



Tabla 43: Iteración lineal Constantes de regresión para TMI-P <sub>200</sub> /WPIModelo de las Muestras .....	116
Tabla 44: Constantes de regresión para TMI-P <sub>200</sub> /WPIModel de las Muestras .....	116
Tabla 45: Succión Matricial Serie histórica estación meteorológica Universidad del Cauca .....	116
Tabla 46: Succión Matricial serie histórica Estación meteorológica Aeropuerto Guillermo Leon Valencia.....	118
Tabla 47: Succión Matricial Promedio series históricas Estación meteorológica Universidad del Cauca y Aeropuerto Guillermo Leon Valencia.....	120
Tabla 48: Parámetros de los materiales compactados [ $\theta_{sat}$ , $S_{opt}$ , $\theta_{sat}$ ].....	122
Tabla 49: Parámetros de curva Característica suelo-Agua “SWCC”-Nivel 2. ....	122
Tabla 50: Valores de Succión matricial y saturación Tabulados - Muestra de Ing. Civil .....	123
Tabla 51: Valores de Succión matricial y grado de saturación Tabulados - Muestra de la ladrillera.....	125
Tabla 52: Valores de succión Matricial obtenidos en el laboratorio mediante ensayos con papel filtro .....	127
Tabla 53:Parámetros SWCC-Nivel 1.....	128
Tabla 54: Datos para el Ajuste de la SWCC-Muestra de ing. Civil. ....	128
Tabla 55: Valores de succión y grado de Saturación Tabulados-Muestra de Ing. Civil. ....	129
Tabla 56: Datos para el Ajuste de la SWCC-Muestra de La ladrillera.....	131
Tabla 57:Valores de succión y Saturación Tabulados-Muestra de la ladrillera. ....	131

Tabla 58: Coeficientes A y B de correlaciones entre CBR y Mr [Mpa].....	134
Tabla 59: Mr óptimo Calculado a partir de correlaciones en Función de CBR.....	135
Tabla 60: Mr Óptimo promedio y determinación de la desviación estándar.....	135
Tabla 61: Mr calculado a partir de CBR Muestra de Ing. civil .....	137
Tabla 62: Mr real Muestra de la ladrillera .....	137
Tabla 63: % de saturación mensual Serie Histórica estación meteorológica Universidad del Cauca. ....	139
Tabla 64: % de saturación mensual Serie Histórica estación meteorológica Aeropuerto Guillermo león Valencia.....	141
Tabla 65: % de saturación mensual Promedio Series Históricas estación meteorológica Universidad del Cauca y Aeropuerto Guillermo león Valencia.....	142
Tabla 66: Mr Muestra de ing. Civil N2 - Serie histórica estación meteorológica universidad del Cauca.....	145
Tabla 67: Mr Muestra de ing. Civil-N2 - Serie histórica Estación meteorológica Aeropuerto Guillermo Leon Valencia .....	145
Tabla 68: Mr Muestra de ing. Civil N2 – Promedio Series históricas.....	146
Tabla 69: Mr Muestra de la ladrilleraN2 – Serie histórica Estación meteorológica Universidad del Cauca.....	146
Tabla 70: Mr Muestra de la ladrillera N2 – Serie histórica Estación meteorológica Aeropuerto Guillermo Leon Valencia. ....	147
Tabla 71: Mr Muestra de la ladrillera N2 – Promedio Series históricas.....	147
Tabla 72: % de saturación mensual Serie Histórica estación meteorológica Universidad del Cauca. ....	157

Tabla 73: % de saturación mensual Serie Histórica estación meteorológica Aeropuerto Guillermo león Valencia.....	158
Tabla 74: % de saturación mensual Promedio Series Históricas estación meteorológica Universidad del cauca y Aeropuerto Guillermo león Valencia.....	160
Tabla 75: Mr Muestra de ing. Civil N1 - Serie histórica estación meteorológica universidad del Cauca.....	162
Tabla 76: Mr Muestra de ing. Civil-N1 - Serie histórica Estación meteorológica Aeropuerto Guillermo Leon Valencia .....	162
Tabla 77: Mr Muestra de ing. Civil N1 – Promedio Series históricas.....	163
Tabla 78: Mr Muestra de la ladrillera N1 – Serie histórica Estación meteorológica Universidad del Cauca.....	163
Tabla 79: Mr Muestra de la ladrillera N1 – Serie histórica Estación meteorológica Aeropuerto Guillermo Leon Valencia. ....	164
Tabla 80: Mr Muestra de la ladrillera N1 – Promedio Series históricas.....	164
Tabla 81: Tabla Resumen Mr modelo MEPDG- Muestra de Ing. Civil.....	188
Tabla 82: Tabla Resumen Mr modelo MEPDG- Muestra de La ladrillera .....	188
Tabla 82: Mr óptimo inferido- Muestra de la Ing. Civil.....	191
Tabla 83: Mr óptimo inferido- Muestra de la Ladrillera .....	191
Tabla 84: % de Variación del Mr óptimo inferido con respecto al Mr óptimo real - Muestra de la Ing. Civil .....	192
Tabla 85: % de Variación del Mr óptimo inferido con respecto al Mr óptimo real - Muestra de la Ladrillera.....	192

Tabla 86: Comparativa Mr Modelo MEPDG y Mr en Función de CBR- Serie Histórica estación meteorológica Universidad del Cauca-Nivel 2-Muestra Ing. Civil.....	193
Tabla 87: Comparativa Mr Modelo MEPDG y Mr en Función de CBR- Serie Histórica estación meteorológica Universidad del Cauca-Nivel 2-Muestra de la ladrillera. ....	193
Tabla 88: Comparativa Mr Modelo MEPDG y Mr en Función de CBR- Serie Histórica estación meteorológica Aeropuerto Guillermo Leon Valencia-Nivel 2-Muestra Ing. Civil .....	193
Tabla 89: Comparativa Mr Modelo MEPDG y Mr en Función de CBR- Serie Histórica estación meteorológica Aeropuerto Guillermo Leon Valencia-Nivel 2-Muestra de la Ladrillera .....	194
Tabla 90: Comparativa Mr Modelo MEPDG y Mr en Función de CBR- Promedio Series Históricas - Nivel 2-Muestra Ing. Civil.....	195
Tabla 91: Comparativa Mr Modelo MEPDG y Mr en Función de CBR- Promedio Series Históricas - Nivel 2-Muestra de La ladrillera.....	195
Tabla 92: Comparativa Mr Modelo MEPDG y Mr en Función de CBR- Serie Histórica estación meteorológica Aeropuerto Guillermo Leon Valencia-Nivel 2-Muestra Ing. Civil .....	198
Tabla 93: Comparativa Mr Modelo MEPDG y Mr en Función de CBR- Serie Histórica estación meteorológica Aeropuerto Guillermo Leon Valencia-Nivel 2-Muestra de la Ladrillera. ....	199
Tabla 94: Comparativa Mr Modelo MEPDG y Mr en Función de CBR- Serie Histórica estación meteorológica Universidad del Cauca-Nivel 1-Muestra Ing. Civil.....	202

Tabla 95: Comparativa Mr Modelo MEPDG y Mr en Función de CBR- Serie Histórica estación meteorológica Universidad del Cauca-Nivel 1-Muestra de la ladrillera. ....	202
Tabla 96: Comparativa Mr Modelo MEPDG y Mr en Función de CBR- Serie Histórica estación meteorológica Aeropuerto Guillermo Leon Valencia-Nivel 1-Muestra Ing. Civil .....	202
Tabla 97: Comparativa Mr Modelo MEPDG y Mr en Función de CBR- Serie Histórica estación meteorológica Aeropuerto Guillermo Leon Valencia-Nivel 1-Muestra de la Ladrillera .....	203
Tabla 98: Comparativa Mr Modelo MEPDG y Mr en Función de CBR- Promedio Series Históricas - Nivel 1-Muestra Ing. Civil.....	204
Tabla 99: Comparativa Mr Modelo MEPDG y Mr en Función de CBR- Promedio Series Históricas - Nivel 1-Muestra de La ladrillera.....	204

## **1 INTRODUCCION**

El módulo resiliente de la subrasante ( $M_r$ ), es un insumo principal dentro del procedimiento de diseño de pavimentos flexibles; se usa como base para el cálculo del comportamiento mecánico de la estructura de pavimento. La magnitud de este parámetro de diseño depende de diferentes factores como; el tipo de suelo, magnitud y tipo de cargas y de las condiciones climáticas, etc.

La variable clima, hace que se presente un continuo cambio en la saturación, provocando también variaciones de succión en el tiempo, que finalmente se ven reflejados en cambios en el comportamiento mecánico del suelo.

En esta investigación se hizo una medición en laboratorio de las condiciones físicas y mecánicas de suelos de subrasante mes a mes y una evaluación de los modelos presentados por la guía de diseño empírico-mecanicista MEPDG (Mechanistic- empirical pavement design guide), para el cálculo del  $M_r$  de la subrasante, que tiene en cuenta los efectos ambientales sobre este parámetro. Para ello, se trabajó con suelos típicos de Popayán-Cauca, eligiendo dos sitios para su evaluación, los cuales fueron; a) Un suelo situado en la facultad de Ingeniería Civil de la Universidad del Cauca (de ahora en adelante muestra de “Ingeniería Civil”) y b) Un suelo ubicado en la vía para la salida al Huila, en un sitio conocido como La Ladrillera (de ahora en adelante muestra de “La Ladrillera”), el objetivo principal consistió en hacer una evaluación de la variación mensual del  $M_r$  de los dos suelos, considerando el efecto del clima.

Durante la primera parte de la investigación, se hizo el proceso de planeación para el desarrollo de las actividades prácticas e investigativas, continuando con una revisión

bibliográfica acerca de la MEPDG y más específicamente del modelo climático que ésta plantea, como también de los principios básicos de suelos parcialmente saturados, para comprender la fundamentación de la metodología.

El trabajo de laboratorio incluyo; toma, transporte, almacenamiento y evaluación de las muestras con un amplio programa de laboratorio (tesis de pregrado), los cuales se ejecutaron en el laboratorio de materiales, suelos y pavimentos de la Universidad del Cauca, teniendo como base los procedimientos establecidos por el INVIAS en las normas INV-E-13.

Finalmente, teniendo como insumos los parámetros obtenidos en los ensayos de laboratorio, se hizo la comparación contrastando los valores determinados mediante los modelos climáticos del MEPDG para el cálculo del módulo resiliente de la subrasante y valores reales obtenidos mediante correlaciones que basan el cálculo del Mr en función del CBR.

Cabe resaltar que la investigación es un comienzo a lo que es la evaluación del modelo de la MEPDG, debido a que la toma de muestras se realiza mensualmente, el programa de laboratorio es extenso y se está explorando un nuevo tipo de suelo que no es común en otras latitudes donde se desarrolló el modelo MEPDG, lo cual hace la investigación larga en el tiempo. Sin embargo, esta investigación corresponde a la puerta de entrada a este proceso de evaluación de este tipo de suelos como subrasante.

## 1.1 Planteamiento del problema

La deformabilidad de un pavimento se encuentra directamente relacionada con las características del suelo de fundación. Por ello La suposición básica de la metodología de diseño mecanística – empírica MEPDG, se fundamenta en que las respuestas estructurales tales como tensiones y deformaciones, debidas a la acción de cargas pueden utilizarse para predecir las fallas de un pavimento como ahuellamiento, grietas y fisuras. Los parámetros claves para el análisis deben ser los insumos que influyen en el cálculo de las respuestas estructurales y éstos son los módulos elásticos de los materiales, en el caso de la subrasante, su módulo resiliente ( $M_r$ ). Bajo estas consideraciones el  $M_r$  se ve directamente afectado por el efecto clima a lo largo del año, efecto que se quiere evaluar en suelos provenientes de cenizas volcánicas.

La MEPDG es una metodología planteada por la NCHRP, en Estados unidos, lo que significa que los modelos planteados por ésta, se determinaron a partir de los tipos de suelo de este lugar, con características muy diferentes a los de Colombia, por lo que su implementación en nuestro país requiere una evaluación, que permita determinar si se ajustan o no a suelos con características diferentes a los utilizados originalmente para su planteamiento, y esa es de cierta manera uno de los objetivos de la metodología, por ello se ha buscado hacer que los países hagan un esfuerzo para conseguir la implementación de la guía de diseño de pavimentos mecanicista- empírica MEPDG, llevándose a cabo la calibración de los modelos, sin embargo, el principal objetivo es lograr que se incremente la cantidad de profesionales que la conocen y la aplican. Los resultados obtenidos en una encuesta en la que se indago acerca del nivel conocimiento del método en Latinoamérica, realizada entre febrero y marzo de 2013, en 15 países latinoamericanos, con la participación



de 1000 profesionales, demostraron que su uso hasta el momento era limitado y que los países que han avanzado de mayor a menor grado en la implementación del MEPDG-AASTHO 2008 son: Argentina, Chile, Colombia, Costa Rica y Perú (Chang, C. M; Vidal, J.; Loria, L. G., 2013)

En el caso de la evaluación de los módulos elásticos de los materiales, la metodología MEPDG cuenta con un modelo calibrado para su país, que abarca la inclusión de la variable clima en su estimación, lo que implica la consideración de cambios de saturación debido a los cambios estacionales, principalmente teniendo en cuenta los fenómenos de precipitación y evapotranspiración. Esto quiere decir que la evaluación del modelo para características propias de nuestro país requiere de datos de estaciones meteorológicas y de propiedades del suelo medidas mensualmente, lo que implica un gran trabajo, que es necesario, si se desea conocer la efectividad del modelo.

Durante la investigación se estimó el Módulo resiliente mensual con la metodología de la MEPDG y este valor se comparó con el obtenido mediante correlaciones en función del CBR, y a pesar de que investigaciones realizadas en Reino Unido determinaron que éste no se relaciona estrechamente con las propiedades elásticas a esfuerzos relativamente bajos, ((NCHRP), 2006), Se realizó una evaluación de varias correlaciones buscando la determinación de las más adecuada.

Con lo anteriormente descrito, la investigación requiere de una evaluación mensual que debe incluir todos los meses del año, sin embargo, el siguiente proyecto intenta ser el comienzo de una investigación que pretende hacer una evaluación de la metodología en un periodo en el que sea posible obtener una cantidad de datos considerable con los que sea

posible determinar con mayor confiabilidad si el modelo es adecuado o no, y proponer uno nuevo si es el caso.

## 1.2 Organización del trabajo de investigación

El proyecto se divide en seis capítulos que abarcan desde la explicación del problema a tratarse en la investigación, hasta la descripción de los resultados obtenidos finalmente al realizar la comparativa entre valores de Mr arrojados por correlaciones en función de valores de CBR obtenidos a partir de ensayos de CBR inalterado, con los derivados a partir de correlaciones planteadas en la metodología empírico mecanicista de diseño de pavimentos (MEPDG) para la evaluación del módulo resiliente

El primer capítulo hace una introducción al proyecto presentando el problema de la investigación y la forma en cómo el trabajo se encuentra organizado. En el segundo capítulo se presenta la fundamentación teórica en donde se encuentra la definición de diferentes conceptos útiles en el desarrollo del proyecto, haciéndose una caracterización muy general de los suelos de la zona de estudio, definiendo el módulo resiliente de la subrasante, como también algunos conceptos sobre suelos parcialmente saturados, además de conceptos generales sobre pavimentos y de la metodologías de diseño de pavimentos flexibles de la MEPDG, presentando finalmente una descripción detallada del modelo climático empleado por esta metodología para el cálculo del módulo resiliente de la subrasante.

El tercer capítulo abarca la explicación de la metodología del proyecto en cuanto a la toma de muestras de suelo y ensayos de laboratorio, detallando los procedimientos presentados por el INVIAS, en la sección 100 de las Normas de Ensayo de materiales para carreteras.

El cuarto capítulo contiene los resultados obtenidos con el modelo de la MEPDG y los arrojados por correlaciones en función del CBR, organizados en tablas resúmenes y gráficos. Más adelante en el quinto capítulo, se desarrolla la comparativa de resultados, también con tablas y gráficas, presentado un contraste entre los valores de módulo resiliente obtenidos

para nivel 2 y nivel 1 del MEPDG, teniendo en cuenta que para los dos niveles, a partir de la curva de retención de agua (SWCC), se obtiene el porcentaje de saturación del suelo dependiendo del valor de succión mensual, calculado a partir del modelo, que hace uso del índice de Thornthwaite calculado para dos estaciones meteorológicas, cercanas a los lugares de toma de muestra (Estación meteorológica Universidad del Cauca y estación meteorológica del aeropuerto Guillermo León Valencia) y para el promedio de los datos de las dos series históricas. Parámetros que son el insumo del modelo para el cálculo del módulo resiliente.

En el capítulo seis se presenta un análisis de la comparativa de los resultados; Presentando finalmente en el capítulo siete las conclusiones obtenidas en el desarrollo de la investigación, que tiene como finalidad la determinación de la confiabilidad del modelo climático presentado por la MEPDG para suelos provenientes de cenizas volcánicas de Popayán y suelos con características similares a las estudiadas durante el desarrollo de la investigación.

## 2 MARCO TEÓRICO

### 2.1 Caracterización general de suelos de la zona de estudio

En el departamento del Cauca se encuentra ubicado el nudo cordillerano andino del Macizo Colombiano y Allí nacen las cordilleras central y occidental de Colombia. En este departamento existe un gran número de volcanes, (Figura 1), donde la actividad volcánica desarrollada durante siglos ha permitido la formación y deposición de grandes cantidades de cenizas volcánicas, generando importantes superficies de terreno derivados de este tipo de materiales. (Universidad de Nariño - IICA- OEA, 1972)

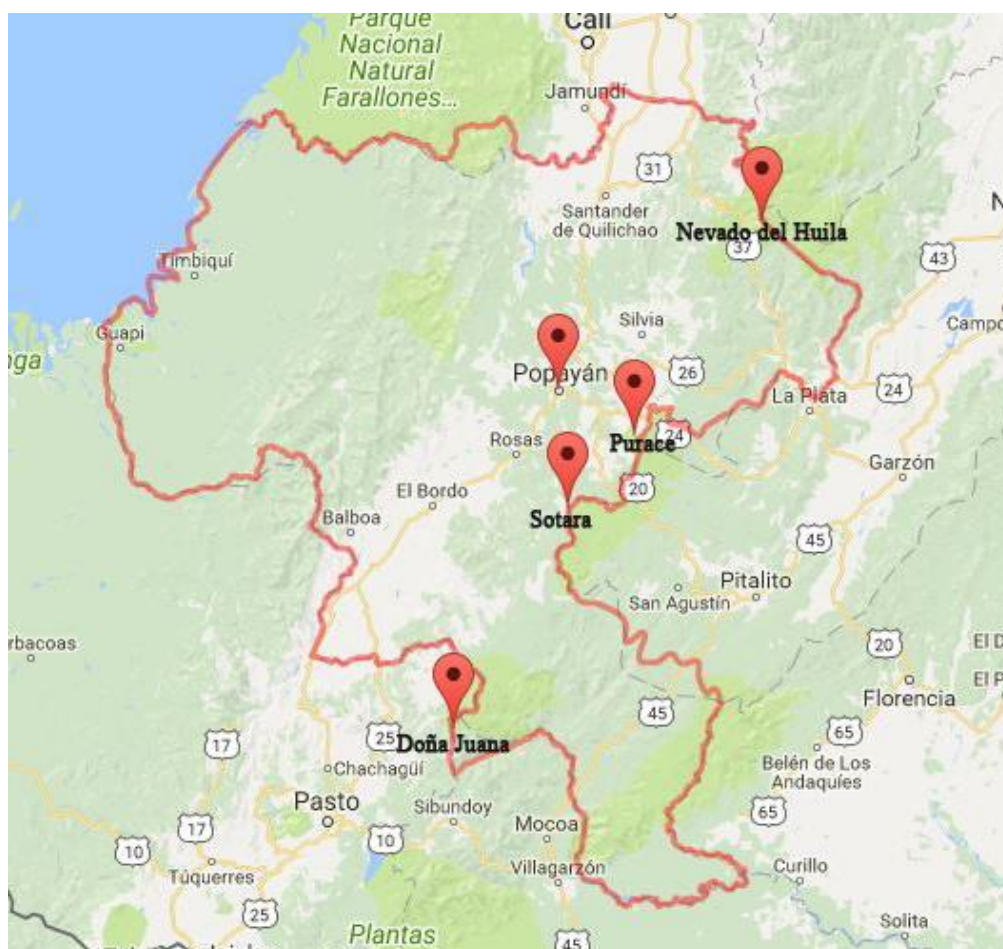


Figura 1: Volcanes en el departamento del Cauca, obtenido de Google Maps.

La región Caucana, en su mayor extensión, se encuentra recubierta de cenizas volcánicas de espesor variable y en diferentes estados de alteración, el espesor del material piroclástico depende de la topografía y ubicación geográfica en relación con la dirección favorable del viento (Universidad de Nariño - IICA- OEA, 1972)

### **Características físico químicas**

“Los suelos residuales derivados de las cenizas volcánicas se desarrollan a través de procesos de alteración física y química de los depósitos de cenizas volcánicas (disolución, lixiviación y precipitación de compuestos). Estos transforman los minerales, la forma y el tamaño de las partículas y la porosidad. Su influencia es controlada por las condiciones como precipitación, temperatura, humedad y viento, que determinan la presencia de fluidos disponibles para las reacciones químicas, la rapidez con la cual estas reacciones ocurren, la erosión, y otros procesos. Y por el tiempo que, por su parte, gobierna la secuencia para la síntesis de minerales secundarios y la distribución de tamaños de partículas”. (Lizcano, Herrera, & Santamarina, 2006)

La mineralogía de este tipo de suelos, tiene gran influencia sobre sus características y su comportamiento mecánico. Los minerales presentes en la fracción de arcilla como. alofana, imogolita y haloisita, derivados de la meteorización de las cenizas volcánicas, en particular del vidrio volcánico, que poseen propiedades como tamaño, forma, carga eléctrica, energía superficial, y otras que los hacen distinguibles de los minerales comúnmente encontrados en suelos sedimentarios y que determinan igualmente las propiedades índice del suelo y la manera cómo interactúan las partículas entre si, con fluidos y aire (Lizcano, Herrera, & Santamarina, 2006).

. En el departamento del Cauca, se ha encontrado que la mayor parte de las propiedades físico químicas se identifican con las de los Andosales y que la arcilla tiene como principal componente el alófono, las propiedades más importantes de este mineral están relacionadas con tamaño, estructura y tendencia a formar agregaciones, conduciendo a que los suelos tengan alta capacidad de retención de agua y elevada porosidad (Herrera , 2006).

“La presencia de alofana, imogolita y haloisita contribuye al desarrollo de las propiedades químicas y físicas únicas que estos suelos exhiben. Entre estas propiedades las más reconocidas son: baja densidad, alta plasticidad, alta capacidad de retención de agua, friabilidad y tendencia a agregarse” (Lizcano, Herrera, & Santamarina, 2006).

La composición mineralógica y la distribución y arreglo de partículas influyen sobre las propiedades de los suelos derivados de cenizas volcánicas, como relaciones de vacíos muy altas, entre 2 y 7, con pesos unitarios bajos y altos contenidos de agua (Herrera , 2006).

En campo, los suelos derivados de cenizas volcánicas pueden reconocerse a través de ciertas propiedades: alta pendiente de taludes naturales, apariencia limosa y alta plasticidad al remoldeo, perfiles estratigráficos en los que predominan materiales limo-arenosos en superficie y finos en profundidad.

### **Interacción de partículas derivadas de suelos volcánicos**

#### **Cementación:**

Los suelos derivados de cenizas volcánicas tienen una estructura cementada muy porosa, es decir que pueden organizarse en arreglos muy abiertos, conformados por agregaciones aleatoriamente distribuidas de tamaño limo y minerales de la fracción arcilla (Lizcano, Herrera, & Santamarina, 2006)

“La cementación es generalmente producida por minerales de arcilla tales como alofana, imogolita, haloisita y ferrihidrita, o compuestos de humus y Al/Fe y opalina silícea. La ocurrencia de uno de estos grupos de minerales depende de distintas condiciones ambientales. Estos minerales de arcilla son principalmente producidos por la alteración de vidrio volcánico, feldespatos, anfíbola y piroxena” (Lizcano, Herrera, & Santamarina, 2006).

La estabilidad química de la cementación es controlada por la composición química de los fluidos disponibles y su relación con la mineralogía del suelo. Mientras que los enlaces cementantes se mantengan la respuesta mecánica del suelo es muy diferente a la que se presenta un suelo sin cementación y con características muy similares (Herrera , 2006).

Las partículas de suelo se unen unas con otras a través de enlaces o agregaciones formadas como resultado de los procesos de floculación y cementación. La floculación ocurre por fenómenos electrocinéticos que pueden ser de dos tipos, el primero por el acercamiento de partículas cargadas negativamente a través de agentes floculadores tales como,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  y  $\text{Al}^{3+}$ , la atracción permanece estable mientras persista el agente floculante. El segundo fenómeno se da por la atracción electrostática entre los bordes positivos y las caras negativas de los minerales arcillosos, siendo este el más estable debido a su ocurrencia en suelos con pH ácidos que favorecen el incremento de cargas positivas (Herrera , 2006).

La cementación, se da después de la floculación y corresponde al enlace de las partículas ya floculadas, por acción de diferentes materiales coloidales o sustancias denominadas cementantes como materia orgánica, partículas de arcilla, coloides inorgánicos (Al y Fe), Carbonatos y óxidos. Investigaciones han demostrado que el cementante más frecuente es el carbonato de calcio, óxido de calcio e hidróxido de sílice y otros que incluyen partículas de limo y arcilla y óxidos de magnesio, aluminio y hierro (Herrera , 2006).



## **2.2 Conceptos generales sobre pavimentos**

### **2.2.1 Definición de pavimento**

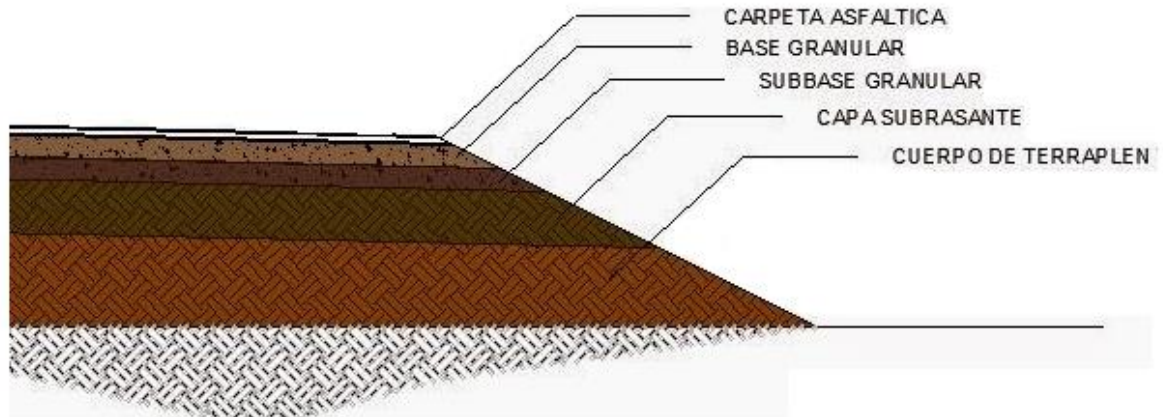
Estructura multicapa compuesta por materiales seleccionados que se soporta sobre una subrasante que tiene la función de resistir esfuerzos producidos por la circulación del tráfico y se diseña de tal forma que logre proporcionar comodidad, seguridad y durabilidad (Quintana & Lizcano, 2015).

### **2.2.2 Pavimento flexible**

Estructura compuesta por una capa de rodamiento bituminosa formada por una mezcla de agregado petero y un aglutinante asfaltico, compuesta además de una base, de material granular y una subbase, formada preferiblemente por materiales granulares, de menor calidad que los de la base, bajo la subbase se encuentra la subrasante que debe cumplir con menos exigencias que la capa de subbase (Del castillo, 2005)

### **2.2.3 Capas del pavimento flexible y sus respectivas funciones**

La estructura del pavimento flexible está compuesta por varias capas de material, como se observa en la Figura 2. Cada capa recibe las cargas provenientes de la capa inmediata superior, transfiriéndolas a la capa inmediata inferior. Debido a la disipación de energía entre capas, la capa superior posee mayor capacidad de carga que la que se coloca en la parte inferior de la estructura (Benavides, 2016)



**Figura 2: Capas Típicas de un pavimento flexible**

**Subrasante:** Es la parte de la corteza terrestre estabilizada y compactada que sirve como fundación a la estructura, Su función principal el servirle de apoyo al pavimento garantizando una resistencia estable, siendo capaz de resistir esfuerzos de compresión que se presenten durante el periodo de diseño y con variaciones bajas de volumen (Benavides, 2016).

**Subbase:** Sus principales características y funciones son: Servir como capa de transición entre la subrasante y las capas superiores, impidiendo que los materiales de la capa base penetren en la subrasante y evitando que los finos de esta contaminen la base, **Controlar deformaciones** absorbiendo los cambios volumétricos presentados en la subrasante, Servir como capa drenante, impidiendo el ascenso de agua por capilaridad y evitando el hinchamiento del pavimento por acción de la saturación (Benavides, 2016).

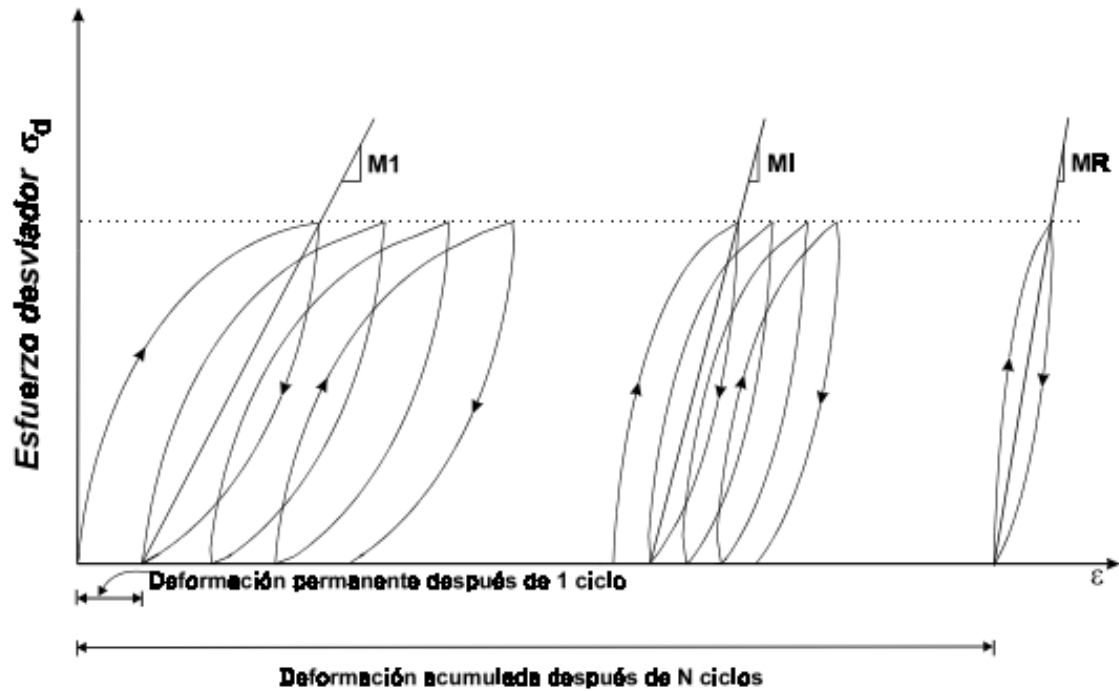
**Base:** Su función principal es proporcionar un elemento resistente que transmita a la subbase y a la subrasante los esfuerzos producidos por el tránsito en una intensidad apropiada.

**Carpeta asfáltica:** Sus principales funciones son: Resistir los esfuerzos de tensión, corte y flexión soportando las cargas por acción del tránsito y Proporcionar una superficie uniforme y estable (Benavides, 2016).

### **2.3 Módulo resiliente de materiales de subrasante (Mr).**

De acuerdo con el diseño estructural del pavimento, el tipo y la magnitud de las sollicitaciones, clima; el comportamiento esfuerzo- deformación de un suelo puede ser de dos tipos: resiliente y plástico, en donde se presentan dos tipos de deformación, que pueden ser deformaciones resilientes o elásticas que son de recuperación instantánea y deformaciones plásticas que son aquellas que permanecen en el pavimento después de cesar la causa deformadora que sería la carga (Secretaria de comunicaciones y transportes instituto Mexicano del transporte, 2001)

Con la aplicación de carga cíclica La muestra de suelo llega a un estado tal en que toda la deformación es recuperable, en ese momento ésta tiene un comportamiento resiliente y el módulo resiliente es igual al módulo secante, tal como muestra la Figura 3. En donde es posible observar como la deformación permanente se va acumulando y en los ciclos intermedios la deformación permanente para cada ciclo disminuye, hasta que prácticamente desaparece en los ciclos finales (Secretaria de comunicaciones y transportes instituto Mexicano del transporte, 2001).



**Figura 3: Mecanismo de deformación de la subrasante debido a la aplicación de carga cíclica, tomado de: (Secretaría de comunicaciones y transportes instituto Mexicano del transporte, 2001).**

Partiendo de la suposición de que la subrasante es un medio lineal elástico, debido a que en la práctica es difícil su determinación, el cálculo de esta variable de estado se puede correlacionar con el valor del CBR a través de relaciones empíricas, (Rondon, Fernández, & Hernández , 2013). Algunas de las ecuaciones que se han usado a lo largo de la historia se presentan en la Tabla 1.

**Tabla 1: Ecuaciones para la estimación del MR de la subrasante en función del CBR (Rondon, Fernández, & Hernández , 2013) & (Sánchez & Campagnoli, 2016)**

<b>AUTOR</b>	<b>ECUACIÓN</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES</b>
<b>Heukelom &amp; Klomp (1962)</b>	$Mr = 1500Cbr$	Psi	CBR < 10%
<b>Poulsen &amp; Stubstad (1980)</b>	$Mr = 10CBR^{0.73}$	Mpa	Caracterización de subrasantes en Dinamarca
<b>Uzan et al. (1977):</b>	$Mr = 14CBR$	Mpa	CBR < 10%
<b>Powell et al. (1984):</b>	$Mr = 17.6CBR^{0.61}$	Mpa	CBR < 12%
<b>Lister &amp; Powell (1987)</b>	$Mr = 2555xCBR^{0.64}$	Psi	CBR < 10% recomendada por la nueva metodología mecánico-empírica de diseño NCHRP (2004) y por el método de diseño INVIAS (2007a):
<b>Ayres (1997):</b>	$Mr = 21CBR^{0.65}$	Mpa	
<b>Reyes (2003)</b>	$Mr = 5CBR$	Mpa	ecuación recomendada para utilizar en el Método Racional para Bogotá D.C. del IDU y la Universidad de Los Andes (2002):
<b>TRL (MOP Chile) (2004)</b>	$Mr = 22.1CBR^{0.55}$	Mpa	12% < CBR < 80%
<b>TRL</b>	$Mr = 17.6CBR^{0.64}$	Mpa	12 < CBR
<b>Van Til et al</b>	$Mr = 12.7CBR^{0.714}$	Mpa	
<b>CSIR Sudáfrica</b>	$Mr = 20.7CBR^{0.65}$	Mpa	
<b>Sawanguriya &amp; Edil</b>	$Mr = 18.8CBR^{0.63}$	Mpa	
<b>Ohio DOT</b>	$Mr = 8.3CBR^1$	Mpa	

“Para el caso colombiano, donde existe variedad de composición y tipos de suelos, escoger arbitrariamente una ecuación empírica puede conducir a diseños de estructuras sub o sobredimensionadas” (Rondon, Fernández, & Hernández , 2013). Algo que resulta un gran problema, que involucra muchos procesos de investigación.

La utilización del CBR como base para estimar el módulo elástico ( $M_r$ ). no es confiable, “Esta conclusión se da debido a las relaciones no lineales de tensión-deformación implicadas y el hecho de que el CBR es, en el mejor de los casos, una medida de la resistencia al cizallamiento no drenada, que no se relaciona estrechamente con las propiedades elásticas a tensiones relativamente bajas, pero puede estar relacionada con la resistencia a la deformación permanente” ((NCHRP), 2006)

Lo anterior ya se había demostrado antes mediante la investigación hecha por (Brown, O'Reilly, M., & Loach, 1970) en donde experimentos con muestras de tres arcillas británicas comunes, ensayadas bajo condiciones apropiadas para subrasantes de pavimento, demostraron que El Módulo Resiliente depende de la succión del suelo, la magnitud del esfuerzo desviador aplicado y el tipo de suelo y que No existe una relación única entre el módulo resiliente y el CBR debido a la influencia del esfuerzo desviador.

#### **2.4 Suelos parcialmente saturados.**

De acuerdo a la posición del nivel freático la zona puede estar saturada o parcialmente saturada, en la Tabla 2 se presentan las características de cada zona.

**Tabla 2: Zonas de acuerdo a la ubicación del NF y sus características. (Soto, 2008)**

ZONA	CARACTERISTICAS
Encima del NF	Estado: Seco
	Zona intermedia Estado: Parcialmente saturado Poros ocupados por agua y aire Saturación: 20%-80% Presión de poro negativa debida a presión del agua en los poros uw y presión del aire en los poros ua
	Franja capilar Estado: saturado Presión negativa: presión de poros debida al agua uw
Debajo del NF	Estado: saturado Presión positiva: Presión de poros debida al agua uw

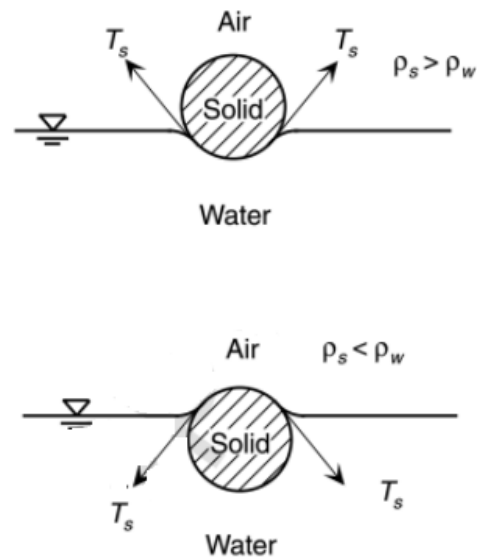
#### 2.4.1 Fases componentes de suelos parcialmente saturados

**Tabla 3: Fases componentes en suelos parcialmente saturados (Soto, 2008)**

<b>1. Fase sólida</b>	Partículas solidas
	Agua adsorbida
<b>2. Fase gaseosa</b>	Agua- Vapor
	Aire libre
<b>3. Fase líquida</b>	Agua libre
	Aire disuelto
	Sales disueltas

La Tabla 3 muestra las fases comúnmente referidas, sin embargo, se propone que un suelo parcialmente saturado consiste en realidad en cuatro fases, la otra fase se refiere a la interfase aire-agua que puede denominarse membrana contráctil, muchos autores consideran a ésta como una cuarta fase debido a que cuenta con propiedades diferentes a las de la fase

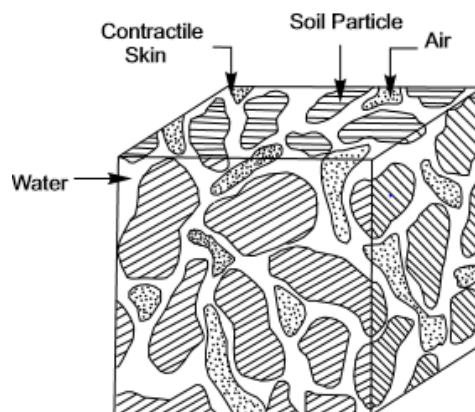
acuosa contigua y su principal característica es que tiene la capacidad para ejercer una tracción o también denominada tensión superficial(Figura 5). comportándose como una membrana elástica bajo tensión entretejida a lo largo de la estructura del suelo (Fredlund & Rahardjo, 1993), esto puede observarse cuando se seca un pequeño espécimen de suelo, en el proceso, las tensiones totales sobre éste permanecen inalteradas a cero, sin embargo, se observará que la muestra sufre una disminución en el volumen. La presión del agua porosa ira cada vez más negativa durante el proceso de secado, pero es la piel contráctil (o interfaz aire-agua) la cual actúa como una delgada membrana de caucho, manteniendo las partículas juntas. (Clifton , Wilson, & Barbour, 1999)



**Figura 4 Manifestación de fuerzas de tensión superficial en la interfaz aire-agua-sólido, tomado de: (Lu & Likos, 2004)**



La membrana contráctil entra a tomar importancia y considerarse como una fase independiente en el análisis de tensiones dentro de la masa de suelo, mas no en los procedimientos que establecen la relación entre volumen y masa, debido a que el volumen de la membrana contráctil es pequeño y su masa puede considerarse como parte de la masa de agua (Fredlund & Rahardjo, 1993).



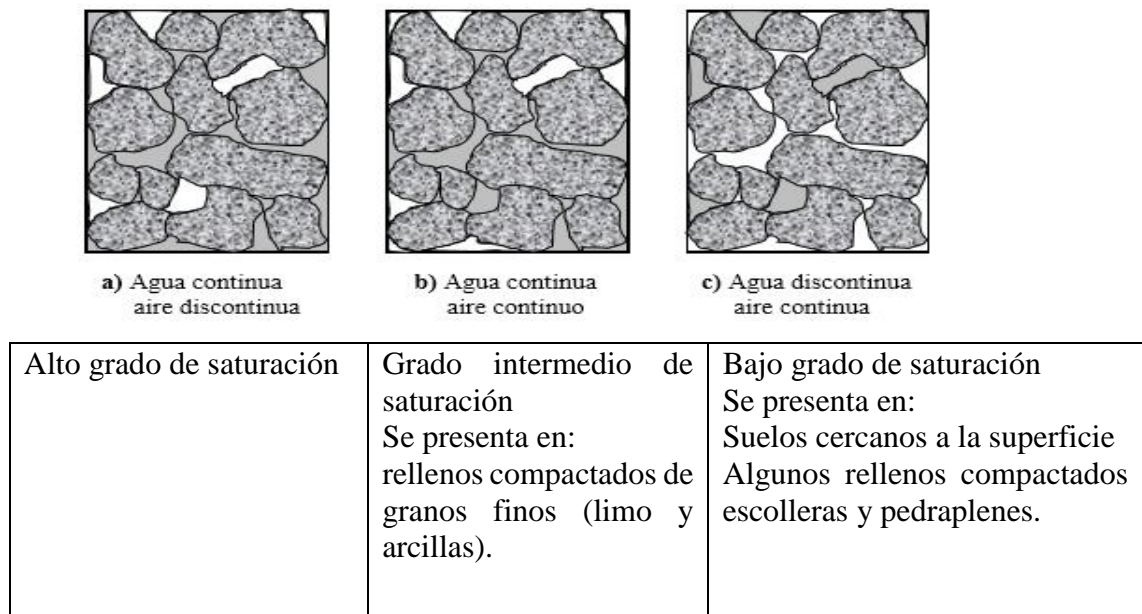
**Figura 5: Fases continuas de un elemento de suelo parcialmente saturado, Tomado de: (Clifton , Wilson, & Barbour, 1999)**

En pocas palabras un sistema de suelo insaturado resulta siendo un sistema de cuatro fases, compuesto por dos fases que se ponen en equilibrio bajo gradientes de tensión aplicados (partículas de suelo y piel contráctil) y dos fases que fluyen bajo gradientes de presión aplicados (fases de aire y agua) (Clifton , Wilson, & Barbour, 1999).

### **Clasificación de suelos parcialmente saturados**

Los suelos no saturados pueden clasificarse en tres categorías, como indica la Figura 6. La primera se trata de una fase aire continua y fase de agua discontinua, En esta categoría el aire se presenta en forma de canales y el agua está retenida, formando meniscos alrededor de los puntos de contacto de los granos

La segunda clasificación es la de la fase de aire y agua continua, que se produce para los con grado intermedio de saturación. La tercera es la fase de agua continua y la fase de aire discontinua, que ocurre en grados de saturación elevados. En ésta, la fase de aire pierde la continuidad y cuando finalmente el aire ya no está presente en los huecos se obtiene la saturación completa (Carreira, 2013).



**Figura 6: Clasificación de suelos parcialmente saturados (Carreira, 2013).**

#### **2.4.2 ESTADO DE ESFUERZOS SUELOS PARCIALMENTE SATURADOS**

El comportamiento mecánico de un suelo, se puede describir en términos de su estado de esfuerzos. El estado de tensión en un suelo consiste en ciertas combinaciones de variables de tensión y el número de variables de estado de tensión requeridas para su descripción depende principalmente del número de fases implicadas (Fredlund & Rahardjo, 1993).

El esfuerzo efectivo de Terzaghi, que es la variable de estado de tensión que se usa para describir el comportamiento de suelos saturados, siendo aplicable para cualquier tipo de

suelo, debido a que es independiente de sus propiedades; se convierte en ineficaz o inadecuado para describir completamente las distribuciones de esfuerzos o las condiciones de falla en el suelo parcialmente saturado. Las variables de estado de esfuerzos satisfactorias para un suelo no saturado han sido considerablemente más difíciles de establecer. Varios estudios han reconocido que las teorías para describir el estado de esfuerzos y falla, al contrario de los suelos saturados, si requieren considerar las propiedades termodinámicas del agua de los poros en términos de succión del suelo y propiedades de los materiales tales como el tamaño del grano y la distribución del tamaño, variables de estado tales como el porcentaje de saturación, y las fuerzas de las interpartículas tales como la tensión efectiva inducida por succión (Lu & Likos, 2004).

### **Concepto de esfuerzo efectivo en suelos parcialmente saturados**

Todos los planteamientos para describir el estado de esfuerzos, propuestos incluyen en sus ecuaciones los parámetros del suelo, sin embargo, se ha demostrado que las propiedades del suelo medidas no proporcionan una relación de valor único de esfuerzos, es decir, que la propiedad del suelo en la ecuación de esfuerzo efectivo propuesta, tiene diferentes magnitudes para diferentes problemas, diferentes trayectorias de esfuerzos y diferentes tipos de suelos (Fredlund & Rahardjo, 1993).

El comportamiento mecánico de los suelos es controlado por las mismas variables de tensión que controlan el equilibrio de la estructura del suelo. Por lo tanto, las variables de tensión requeridas para describir el equilibrio de la estructura del suelo se pueden tomar como las variables de estado de esfuerzo para el suelo. Éstas deben expresarse en términos de tensiones medibles, tales como: tensión total, presión de agua de poro y presión de aire de poro (Fredlund & Rahardjo, 1993).

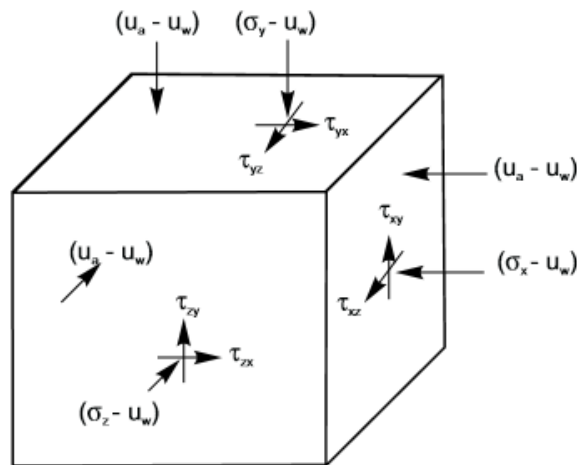
Después de años de estudios se logró determinar que el comportamiento de los suelos parcialmente saturados depende principalmente de dos tensiones significativas; Tensión neta referida a la succión del aire ( $\sigma - u_a$ ) y tensión referida a la succión del agua ( $U_a - u_w$ ) y además de los siguientes parámetros: Índice de poros ( $e = V_p/V_s$ ), Grado de saturación o porcentaje de poros que están lleno de agua ( $S = V_w/V_p$ ) (Ochoa, 2012).

Hay tres combinaciones posibles que pueden utilizarse como variables de estado de tensión para un suelo no saturado,  $(\sigma - U_a)$  y  $(U_a - U_w)$ ;  $(\sigma - U_w)$  y  $(U_a - U_w)$ ;  $(\sigma - U_a)$  y  $(\sigma - U_w)$ , después de haber encontrado que cualquier dos de las tres posibles variables de esfuerzos normales pueden utilizarse para describir el estado de esfuerzo de un suelo no saturado, el uso de variables independientes del estado de esfuerzos ha producido una descripción más significativa del comportamiento de suelos parcialmente saturados (Fredlund & Rahardjo, 1993).

### **Análisis de equilibrio para suelos no saturados**

Sobre un elemento pueden actuar dos tipos de fuerzas; Las fuerzas de cuerpo y las fuerzas superficiales, Las fuerzas de cuerpo o internas, actúan a través del centroide del elemento del suelo y se expresan como una fuerza por unidad de volumen. Las fuerzas gravitacionales y de interacción entre las fases son ejemplos de fuerzas de cuerpo. Las fuerzas superficiales; tales como cargas externas, actúan solamente sobre la superficie límite del elemento del suelo. El valor medio de una fuerza superficial por unidad de área tiende a un valor límite a medida que la superficie se aproxima a cero. Este valor límite se denomina vector de tensión o tracción superficial sobre una superficie dada y Los componentes de tensión paralelos a un plano se denominan tensiones de cizalla (Fredlund & Rahardjo, 1993)

Por un punto de una masa de suelo pasan infinitas superficies y el estado de tensión en ese punto puede analizarse considerando todas las tensiones que actúan sobre los planos que forman el elemento, además deben considerarse las fuerzas internas que actúan a través del centroide del elemento de suelo. “El estado de esfuerzos puede representarse por un elemento cúbico que está completamente encerrado por fronteras imaginarias e imparciales, proporcionando el diagrama de cuerpo libre convencional utilizado para un análisis de equilibrio de esfuerzos” (Fredlund & Rahardjo, 1993)



**Figura 7: Estado de esfuerzo para partículas de suelo y membrana contráctil en suelo parcialmente saturado, Tomado de: (Clifton, Wilson, & Barbour, 1999).**

La técnica experimental para verificar las variables de estado de esfuerzo teóricamente propuestas, tiene en cuenta la siguiente definición de estado de esfuerzos independientes: “Un conjunto adecuado de variables independientes de estado de tensiones son aquellas que no producen distorsión o cambio de volumen de un elemento cuando se modifican los componentes individuales de las variables de estado de esfuerzo, pero las variables de estado de esfuerzo se mantienen constantes. Por lo tanto, la variable de estado de tensión para cada

fase debe producir el equilibrio en esa fase cuando se considera un punto de tensión en el espacio” (Clifton , Wilson, & Barbour, 1999)

De acuerdo al anterior planteamiento, Se han realizado ensayos nulos en los que se variaron los componentes individuales de las variables de estado de tensión, mientras que las variables de estado de esfuerzo se mantienen constantes. La prueba requerida para verificar la tensión neta referida a la del agua, ( $\sigma - u_w$ ) como la variable de estado de tensión, requiere de un ensayo en el que el incremento de los esfuerzos;  $\Delta\sigma_x = \Delta\sigma_y = \Delta\sigma_z = \Delta u_w$ . Y la deformación de la estructura del suelo sea cero durante el ensayo, las tensiones totales en todas las direcciones se pueden aumentar o disminuir en una cantidad igual junto con un aumento o una disminución igual en la presión del agua, Sin embargo, el cambio en la presión del agua perturba el equilibrio de la matriz de la succión matrica ( $u_a - u_w$ ), razón por la cual, la presión del aire también debe ser aumentada o disminuida en una cantidad igual al agua y las presiones totales. (Clifton , Wilson, & Barbour, 1999).

### **2.4.3 Curva de retención de agua del suelo o curva característica suelo- agua – SOIL WATER CHARACTERISTIC CURVE (SWCC)**

Cuando un suelo se encuentra en condición no saturada, dentro de la matriz de suelo surge una presión isotrópica resultante de la interacción entre líquido y el gas en los poros del suelo, denominada succión, que a su vez se divide en matrica y total: la succión matrica está relacionada con la matriz del suelo, es decir, la combinación entre el tipo de partícula y el arreglo estructural, y la osmótica, debida a la concentración de sales en el agua del suelo (Carreira, 2013).

La succión del suelo es uno de los parámetros más importantes para entender el comportamiento de suelos no saturados, ya que influye en su resistencia y deformabilidad, la succión máxima es una cantidad energética que evalúa la capacidad del suelo de retener agua. Cuando el agua libre migra dentro del suelo no saturado, será adsorbida o retenida por él. Para desprender esa agua es necesaria la aplicación de una fuerza externa. El valor de la energía aplicada por unidad de volumen de agua es la succión. que también puede ser definida como la tensión requerida para remover una molécula de agua del suelo en la fase de vapor (Carreira, 2013)

“La SWCC o curva de retención se define como la variación de la capacidad de almacenamiento de agua dentro de los macro y micro poros de un suelo, con respecto a la succión” (Ochoa, 2012). Es decir que representa la relación entre succión y contenido de agua que puede ser volumétrico (relación entre el volumen de agua y el volumen de sólidos) o el grado de saturación (porcentaje de vacíos llenos de agua), Esta relación entre la succión que puede ser total, matricial u osmótica, juega un papel muy importante en la caracterización de los suelos parcialmente saturados, además se encuentra determinada por la granulometría y mineralogía del suelo, en forma más precisa resulta muy importante la forma geométrica de los poros y la composición mineralógica de la fracción fina (Soto, 2008).

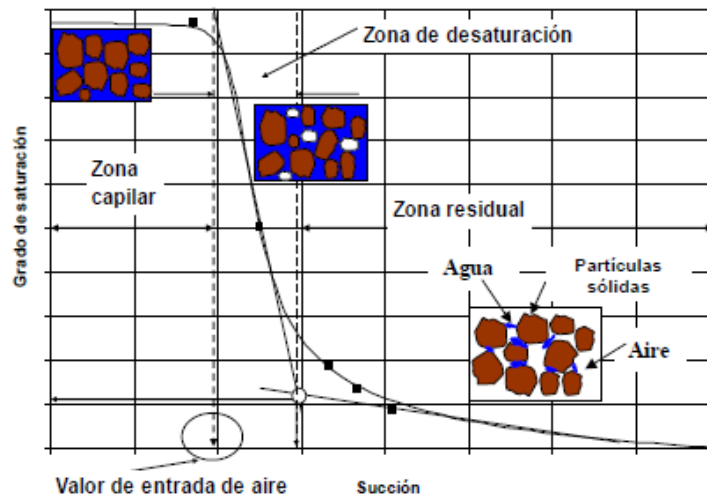
La curva de retención se puede presentar diferentes formas dependiendo de la estructura del suelo: unimodal, en forma de S que normalmente presentan los suelos compactados. y bimodal existente principalmente en los suelos tropicales y subtropicales, debido a una serie de particularidades derivadas de su origen y la interacción con los agentes atmosféricos. Los procesos de meteorización que intervienen en su formación producen una serie de compuestos discontinuos que contienen minerales originales en la roca hasta arcillo

minerales y en algunos casos particulares son pobres en sílice y presentan contenidos considerables de óxidos e hidróxidos de hierro y aluminio

### **Puntos característicos de la SWCC**

La curva característica está compuesta por tres zonas bien definidas como se observa en la Figura 8: la zona capilar, la zona de saturación y la zona residual.

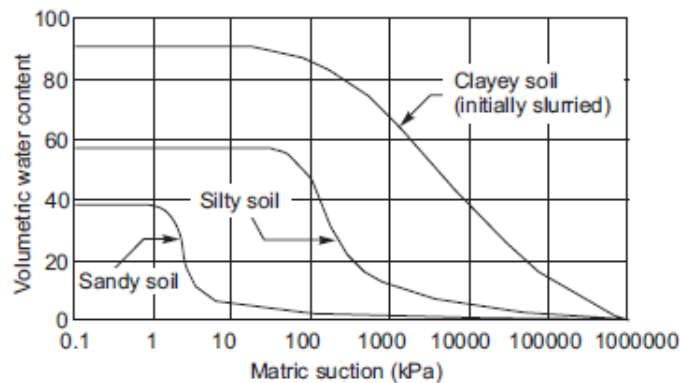
En la zona capilar el suelo se mantiene en un estado de saturación, esta zona termina en el valor de entrada de aire, el cual está definido como el valor que debe de exceder la succión mátrica, antes de que el aire empiece a entrar en los macroporos del suelo. En la zona de desaturación, el agua es desplazada por aire; por tanto, la fuerza con la que el agua se encuentra adherida a las partículas del suelo se incrementa a medida que el suelo pierde más agua. para la zona residual, un incremento de succión no produce un cambio importante en el contenido de agua, la cual es tan escasa que no fluye entre los poros y la remoción puede ser sólo por evaporación. (García, 2008)



**Figura 8: Zonas típicas de la curva característica- Succión en función del grado de saturación, Tomado de: (García, 2008)**



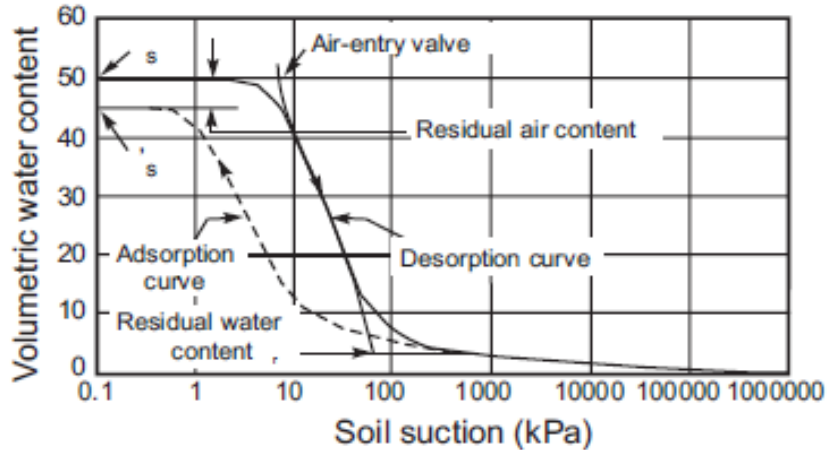
La naturaleza de la curva característica está directamente asociada a la composición granulométrica y estructura del suelo, por tanto, la relación puede variar para diferentes tipos de suelos, como se muestra en la Figura 9 , para el caso de suelos finos estos se desaturan en forma gradual; mientras que para suelos granulares, la pérdida de agua ocurre en forma muy rápida. (García, 2008).



**Figura 9: Curva característica suelo agua para suelo arenoso, Limoso y arcilloso, Tomado de: (Fredlund & Xiang, 1994)**

### Trayectorias de humedecimiento y secado

La SWCC no es única para un suelo, su forma y posición no son las mismas, para trayectorias de humedecimiento que, para trayectorias de secado del suelo, lo que es llamado como "histéresis". En la Figura 10 , se indican la trayectoria de humedecimiento (Adsorption curve) y la trayectoria de secado (Desorption curve).



**Figura 10: Trayectorias de secado y humedecimiento-Succión en función del contenido volumétrico de agua, Tomado de: (Fredlund & Xiang, 1994)**

Algo que es importante recalcar es que, dado el mismo nivel de tensión y succión, el  $M_r$  medida a lo largo de un trayecto de humectación es mayor que la medida a lo largo de una trayectoria de secado con bajo esfuerzo cíclico. La diferencia observada entre los dos trayectos se hace menos significativa con un aumento del estrés cíclico.

#### 2.4.3.1 Métodos para la determinación de la curva de retención

Para la obtención de la curva característica suelo agua se requiere de un método que permita la determinación de la succión, ya sea matricial o total y son muchos los procesos experimentales existentes para medir la succión del suelo, escoger el más adecuado está en función del rango de medición del método, y de otros factores como costo y complejidad.

La succión puede medirse en campo o en laboratorio y los métodos de laboratorio pueden ser directos si tienen la capacidad de dar directamente el valor succión e indirectos, si en el proceso se miden otras propiedades relacionadas con ésta, que mediante métodos de calibración permiten su obtención a partir de ellas.

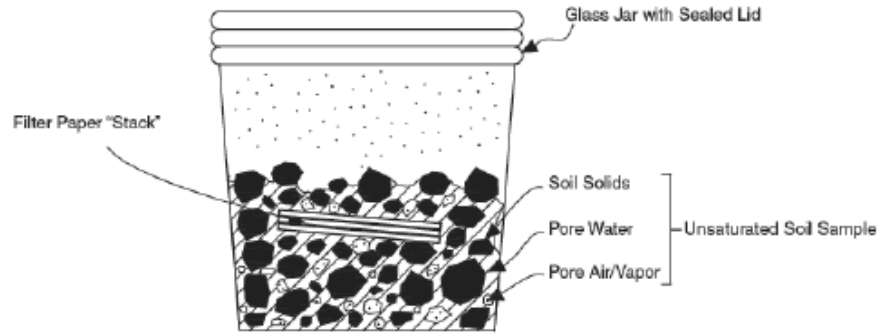
## **Especímenes para ensayos de succión**

Las muestras para ensayos de succión en laboratorio pueden ser inalteradas, o compactadas, dependiendo de las condiciones que se requieran evaluar, teniendo presente que la succión está relacionada con la capilaridad del suelo y ésta depende del acomodo de las partículas (Lu & Likos, 2004)

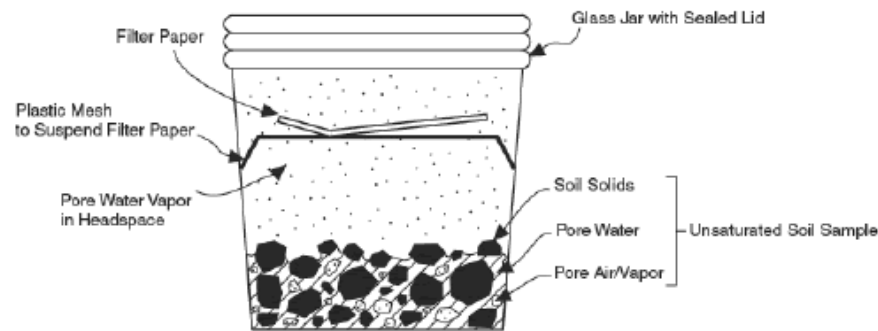
### **2.4.3.1.1 Método del papel filtro**

Se considera como método indirecto que se basa en la medición del contenido de agua en equilibrio de los papeles de filtro, con especímenes de suelo no saturado. Finalmente, se mide la cantidad de humedad transferida de una muestra de suelo no saturada a un papel de filtro inicialmente seco. el contenido de humedad del papel de filtro en equilibrio se mide gravimétricamente y se relaciona con la succión del suelo a través de una curva de calibración predeterminada para el tipo particular de papel usado (Lu & Likos, 2004).

El método del papel de filtro se basa en el supuesto de que un papel de filtro llegará al equilibrio Con respecto al flujo de humedad, con un suelo con una succión específica. El equilibrio puede alcanzarse mediante el intercambio de humedad del líquido o del vapor entre el suelo y el papel de filtro. Cuando se coloca un papel de filtro seco en contacto directo (Figura 11), se supone que el agua fluye del suelo al papel hasta que se alcanza el equilibrio. Cuando se suspende un papel de filtro seco sobre una muestra de suelo, es decir No existe contacto directo con el suelo (Tabla 11), se producirá flujo de vapor de agua desde el suelo hasta el papel de filtro hasta que se alcance el equilibrio. Una vez establecidas las condiciones de equilibrio, se mide el contenido de agua del papel de filtro (Lu & Likos, 2004). En Colombia la norma INV-E-159 indica como realizar este ensayo de laboratorio.



**Figura 11: Esquema de ensayo papel filtro - Succión matricia, Tomado de: (Lu & Likos, 2004)**



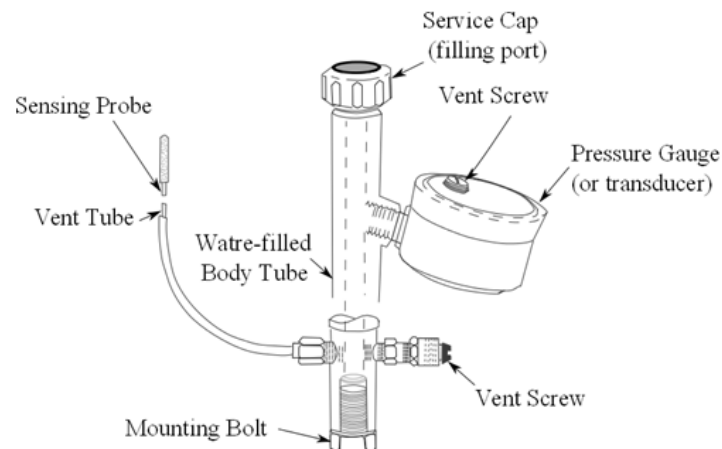
**Figura 12: Esquema de ensayo papel filtro - Succión Total, Tomado de: (Lu & Likos, 2004)**

#### 2.4.3.1.2 Tensiómetros

Los tensiómetros se usan para medir directamente la presión negativa del agua del poro. consisten en un vaso cerámico de entrada de aire elevado conectado a un dispositivo de medición de presión a través de un tubo de pequeño diámetro (Fredlund & Rahardjo, 1993).

Las mediciones de presión de poro se realizan mediante un intercambio directo de agua entre el sensor y el suelo. La presión negativa se transmite a través de los poros saturados de la punta de cerámica que el agua se retira del tensiómetro hasta que la presión interna en el

cuerpo del sensor es equivalente al potencial matricial del agua del suelo. Si el suelo se humedece posteriormente, el agua fluye en dirección opuesta desde el suelo hasta el sistema de medición hasta que se alcanza un nuevo equilibrio a una nueva presión. Debido a que la punta del sensor es permeable a los solutos disueltos, el potencial osmótico del agua porosa no tiene efecto sobre la medición de la presión. Por lo tanto, la medida se convierte en una medida directa de la succión matricial si se considera también el potencial gravitatorio (es decir, se corrige la diferencia de elevación entre la sonda del sensor y el manómetro). (Lu & Likos, 2004)

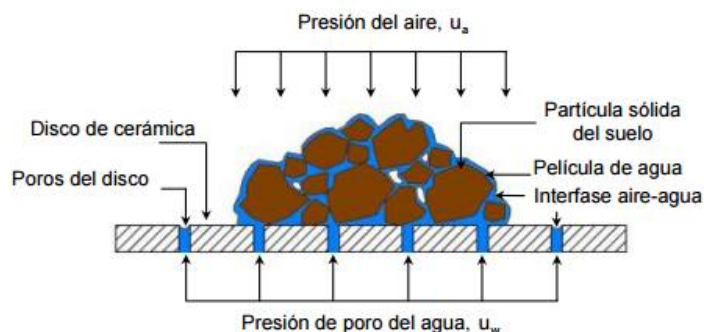


**Figura 13: Dibujo esquemático del tensiómetro de laboratorio de punta pequeña, Tomado de: (Lu & Likos, 2004)**

#### 2.4.3.1.3 Método de traslación de ejes

Esta técnica, se fundamenta en la técnica desarrollada por Hilf y se basa en controlar la diferencia entre la presión del aire de poros y la presión del agua porosa y medir el contenido de agua correspondiente del suelo en equilibrio con la succión matricial aplicada (Lu & Likos, 2004).

El procedimiento consiste en colocar una muestra de suelo insaturado en una cámara de presión cerrada. La sonda de medición de presión de agua de poro consiste en una aguja con una punta de cerámica saturada de entrada de aire elevado. La sonda se conecta a un sistema de medición de presión de tipo nulo a través de un tubo lleno de agua deshidratada, con un tapón de mercurio en el medio. Tan pronto como la sonda se inserta en la muestra, el agua en el tubo tiende a entrar en tensión y el indicador de Bourdon comienza a registrar una presión negativa. se alcanza una condición de equilibrio cuando el tapón de mercurio que es el indicador nulo permanece estacionario. La diferencia entre la presión de aire en la cámara y la presión de agua negativa medida en el equilibrio se toma como la succión matricial del suelo (Lu & Likos, 2004).



**Figura 14: Medición de succión matricial por el método de traslación de ejes- Esquema succión transversal de la interfase suelos no saturado-disco de cerámica (Lu & Likos, 2004)**

#### 2.4.3.1.4 Método de Los sensores de conductividad eléctrica o térmica.

A los que se hace referencia más generalmente son los sensores de bloque de yeso que se utilizan para relacionar indirectamente la succión matricial con la conductividad eléctrica o térmica del medio poroso embebido en una masa de suelo insaturado.

El método se fundamenta en que, si un medio poroso está incrustado en una masa de suelo parcialmente saturado y se deja alcanzar el equilibrio, cualquier cambio que sucede después de este procedimiento en la succión del suelo, da como resultado un cambio correspondiente en el contenido de agua del medio poroso, representado por una curva característica. Por ello, al medir la conductividad eléctrica o térmica del medio poroso, la succión matricial del suelo puede determinarse indirectamente por correlación con una curva de calibración predeterminada. Los sensores pueden ser dispositivos de piedra porosa, sintéticos de polímero, metal sinterizado o vidrio, o yeso. EL usado comúnmente en la práctica es el sensor de bloque de yeso (Lu & Likos, 2004).

#### **2.4.3.2 Planteamientos para la estimación de la SWCC**

Al día de hoy existen muchos métodos para la estimación de la SWCC, que cuentan con diferentes planteamientos, algunas de las ecuaciones se presentan en la Tabla 4.

**Tabla 4: Ecuaciones propuestas para la determinación de SWCC en (Matlan, Mukhlisin, & Taha, 2014)**

Referencia	Ecuación	Términos de la ecuación
Fredlund and Xing (1994)	$\theta_w = C(h) * \left[ \frac{\theta_s}{\left[ \ln \left[ \exp(1) + \left( \frac{h}{af} \right)^{bf} \right] \right]^{cf}} \right]$ $C(h) = \left[ 1 - \frac{\ln \left( 1 + \frac{h}{h_r} \right)}{\ln \left( 1 + \frac{1 * 10^6}{h_r} \right)} \right]$	<p><math>\theta_w</math>: Contenido volumétrico de agua  <math>h</math>: succión matrica del suelo kPa  <math>af</math>= Parámetro del suelo, que está relacionado con el valor de entrada de aire del suelo, en KPa.  <math>bf</math>= parámetro del suelo que es función de la tasa de extracción de agua del suelo(Pendiente de la curva), una vez superado el valor de entrada de aire.  <math>cf</math> = parámetro del suelo que es principalmente una función del contenido de agua residual.  <math>hr</math> = un parámetro del suelo que es principalmente una función de la succión a la que se produce el contenido de agua residual en kPa.</p>
van Genuchten (1980)	$\theta_w = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[ 1 + \left( \frac{h}{a} \right)^b \right]^c}$	<p><math>\theta_r</math> =Contenido volumétrico de agua residual.  <math>a</math> = Parámetro del suelo que es función del valor de entrada de aire del suelo en kPa  <math>b</math> = parámetro del suelo que es función de la tasa de extracción de agua del suelo, una vez superado el valor de entrada de aire.  <math>c</math> = parámetro del suelo que es principalmente una función del contenido de agua residual</p>
McKee and Bumb (1987)	$\theta_w = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{1 + \exp(1)^{\left[ \frac{h-a}{b} \right]}}$	<p><math>\theta_r</math> = Contenido volumétrico de agua residual.  <math>a</math> = parámetro de ajuste de la curva  <math>b</math> = parámetro de ajuste de la curva</p>



Referencia	Ecuación	Términos de la ecuación
van Genuchten and Mualem (1980)	$\theta_w = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + \left(\frac{h}{a}\right)^{bm}\right]^{\left[1 - \frac{1}{bm}\right]}}$	<p><math>\theta_r</math> = Contenido volumétrico de agua residual.  <math>a</math> = Parámetro del suelo que es función del valor de entrada de aire del suelo en kPa  <math>bm</math> = parámetro del suelo que controla la pendiente en el punto de inflexión de la curva característica suelo-agua.</p>
van Genuchten and Burdine (1980)	$\theta_w = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + \left(\frac{h}{a}\right)^b\right]^{\left[1 - \frac{2}{b}\right]}}$	<p><math>\theta_r</math> = Contenido volumétrico de agua residual.  <math>a</math> = Parámetro del suelo que es función del valor de entrada de aire del suelo en kPa  <math>b</math> = parámetro del suelo que es función de la tasa de extracción de agua del suelo, una vez superado el valor de entrada de aire.</p>
Gardner (1958)	$\theta_w = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{1 + \left(\frac{h}{a}\right)^b}$	<p><math>\theta_r</math> = Contenido volumétrico de agua residual.  <math>a</math> = Parámetro del suelo que es función del valor de entrada de aire del suelo en kPa  <math>b</math> = parámetro del suelo que es función de la tasa de extracción de agua del suelo, una vez superado el valor de entrada de aire.</p>
Brooks and Corey (1964e)	$\theta_w = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left(\frac{ab}{h}\right)^{bb}$	<p><math>\theta_r</math> = Contenido volumétrico de agua residual  <math>ab</math> = Presión de burbujeo en kPa.  <math>bb</math> = Índice de tamaño de poro.</p>
Williams et al. (1983)	$\ln(\theta_e) = A + B \ln(h)$	<p><math>A</math> = parámetro de ajuste  <math>B</math> = parámetro de ajuste</p>
Farrel and Larson (1972)	$h = (U_a - U_w)_b \exp[\alpha (\theta_s - \theta_w)]$	<p><math>\alpha</math> = Constante empírica  <math>(u_a - u_w)_b</math> = Valor de entrada de aire</p>

Referencia	Ecuación	Términos de la ecuación
Assouline et al. (1998)	$\theta_w = \theta_L + (\theta_s - \theta_L) \left[ 1 - \exp \left[ -\xi \left[ \frac{1}{\psi} - \frac{1}{\psi_L} \right]^n \right] \right]$	<p> <math>\Psi</math> = Cabeza capilar  <math>\Psi_L</math> = cabezal capilar que corresponde a un contenido de agua muy bajo, en el que la conductividad hidráulica es despreciable.  <math>\theta_L</math> = Contenido de agua volumétrico en la cabeza capilar <math>\Psi_L</math>.  <math>\eta</math> = Parámetro de ajuste  <math>\xi</math> = Parámetro de ajuste </p>

Se han realizado varios estudios, comparando las diferentes ecuaciones presentadas en el cuadro anterior y estos estudios han demostrado que generalmente resultan más convenientes las ecuaciones con tres y cuatro parámetros y dentro de estas se ha comprobado que la ecuación propuesta por Fredlund y Xing (1994), representa el SWCC bastante bien, si se cuenta con una cantidad de datos considerable, Esta ecuación en particular establece el valor de succión máximo (contenido de humedad cero) en 1.000.000 kPa, esto debido a que “Datos experimentales han demostrado previamente que la succión de un suelo alcanza un valor máximo de aproximadamente  $10^6$  kPa, dato que se incorpora en el modelo”. (Fredlund & Xiang, 1994), lo cual es muy conveniente cuando se incorpora al análisis numérico porque elimina la posibilidad de resultados indeterminados cuando el contenido de humedad se aproxima a cero (NCHRP, 2010).

#### **2.4.4 Guía para diseño empírico mecanicista de pavimentos, mechanistic-EMPIRICAL PAVEMENT DESIGN GUIDE (MEPDG) - AASHTO 2008**

Es una herramienta desarrollada en estados unidos por el National Cooperative Highway Research Program (Programa Cooperativo Nacional de Investigación de Carreteras - NCHRP), para el análisis y la predicción del desempeño de pavimentos flexibles y rígidos, teniendo como base principios empíricos-mecánicos, buscando suplir las limitaciones de las versiones del método de diseño AASHTO, fundamentadas principalmente en regresiones empíricas obtenidas de extensas pruebas de campo.

Esta metodología de diseño emplea conceptos mecanicistas para el cálculo de las respuestas estructurales del pavimento, incorporando estos procedimientos dentro de un software informático, que permite la realización de un proceso iterativo, volviendo más práctico el proceso de diseño, La clave está en la utilización de un modelo de análisis adecuado. Éste en el caso de pavimentos flexibles puede ser tan sencillo como las ecuaciones de Boussinesq para espacios semi-infinitos o para pavimentos de dos capas; podría recurrir a modelos como el de Burmister, o incluso, modelos más complejos como el Multicapa elástica, Viscoelasticidad Lineal o Elemento Finito (Loria, 2013)

Cuando el proceso mecanicista cumple la función de obtener las salidas de respuesta del pavimento, es decir, esfuerzos, deformaciones y deflexiones, se hace una verificación empírica del comportamiento de la estructura. Ésto consiste en hacer uso de las respuestas estructurales introducidas por las cargas y modelos de comportamiento, para analizar su desempeño, permitiendo predecir las fallas en el pavimento, presentadas en forma de fisuras, grietas, ahuellamiento, etc.

Los modelos de desempeño de pavimentos flexibles en los cuales se basa la metodología son: Fisuramiento longitudinal o falla en donde las fisuras aparecen en las huellas de neumáticos; fisuramiento piel de cocodrilo, considerada como falla por fatiga en donde las fisuras evolucionan de abajo hacia arriba y se manifiestan superficialmente en la zona por donde pasan los neumáticos, extendiéndose finalmente por todo el carril; fisuramiento transversal, debido al sometimiento de la estructura a bajas temperatura o a cambios bruscos del gradiente térmico; ahuellamiento o deformación permanente que puede presentarse en cualquiera de las ramas, e International Roughness index (IRI) , índice que representa la regularidad del perfil longitudinal del pavimento, usualmente medido en las huellas del

neumático y vinculado además con la comodidad del usuarios e influenciado por las fallas mencionadas anteriormente (Chang, C. M; Vidal, J.; Loria, L. G., 2013)

El MEPDG considera varios factores de entrada como el tráfico y el clima, y el procedimiento de diseño consiste en determinar las respuestas del pavimento en los puntos críticos para que sean utilizadas como insumos en los modelos de rendimiento para predecir el desgaste del pavimento, dividiendo el periodo de diseño a incrementos de análisis más cortos y los esfuerzos en todos los incrementos se suman determinando así la salida final al periodo de diseño (Orobio & Zaniewski, 2012).

#### **2.4.4.1 Variables que considera la MEPDG en el diseño de pavimentos.**

Considerar la mayor cantidad de variables que influyen en el comportamiento de la estructura del pavimento, es una de las tareas que con el pasar de los años se ha buscado implementar, sin embargo, modelar tales efectos tiene un alto grado de dificultad, donde además se hace necesarios trabajos de investigación que requieren inversión de tiempo y recursos.

Debido a que las metodologías mecanicistas no permiten el análisis total de las estructuras de pavimento porque requieren de estudios más completos con un alto grado de complejidad. Y en la búsqueda de procedimientos más prácticos se ha logrado la implementación de metodologías creadas a partir de la experiencia que complementan los modelos mecanicistas, entrando a hacer parte de los modelos de predicción de rendimiento o funciones de transferencia, que utilizan como entradas los esfuerzos y deformaciones obtenidas de los modelos analíticos, (Castillo, 2014).

Teniendo en cuenta que la vida útil de un pavimento se ve influenciada principalmente por las cargas de tránsito, el clima, las propiedades y características de los materiales que

conforman la estructura, fenómenos y propiedades que deben ser consideradas en el diseño, con el fin de evaluar si la estructura tiene la capacidad de resistir las cargas y además cumplir con los niveles de servicio exigidos. La Implementación de la tecnología en el diseño de pavimentos, ha permitido una cuantificación más adecuada de estas variables, tal como se demuestra en la MEPDG.

#### **2.4.4.1.1 Variable tránsito**

La carga de tráfico juega un papel importante en el diseño de pavimentos y esta respuesta está influenciada por factores tales como el estado de esfuerzos, la temperatura, la humedad, el tiempo y la tasa de carga, estudios realizados con respecto a la sensibilidad de la MEPDG, demostraron que de las fallas que pueden presentarse en el pavimento, el ahuellamiento, es más sensible hacia el nivel del tráfico.

#### **2.4.4.1.2 Variable clima**

La guía de diseño empírico mecanicista, es una muestra de la preocupación por incluir en el diseño una modelación más real de las condiciones a las cuales se encuentran expuesta la estructura de un pavimento, y esto se observa principalmente en la inclusión de la variable clima en el diseño, mediante el modelo climático integrado mejorado (EICM), además de la caracterización más precisa de los materiales que conforman cada una de sus capas, partiendo del hecho de que el rendimiento o la efectividad del modelo depende principalmente de los parámetros de entrada que caracterizan el pavimento.

#### **Modelo climático implementado por la MEPDG**

Los efectos del clima sobre las estructuras de pavimentos se ven reflejados en fallas tales como fisuras o deformaciones que afectan las capas que la conforman, debido a que las

propiedades de los materiales de cada una de éstas cambian con el tiempo por la influencia de factores como precipitación, temperatura, velocidad del viento. etc.

Se considera que las variables más importantes sobre el comportamiento, desempeño y daño de la estructura de pavimento son la humedad y la temperatura; La humedad porque se encuentra inversamente relacionada con el módulo resiliente de los materiales y la temperatura porque ocasiona cambios en la rigidez.

A continuación, se definen algunas de las variables climáticas que se tienen en cuenta para evaluación de la afectación sobre la estructura de pavimento.

**Precipitación:** Condensación del vapor de agua atmosférico que cae a la superficie. Ocurre cuando la atmosfera se satura con el vapor de agua haciendo que el agua condense alcanzando la superficie de la tierra como lluvia, nieve y granizo. (Gonzales, 2008)

**Temperatura:** Medida de la diferencia de intensidad de calor entre dos cuerpos (Gonzales, 2008) .

**Viento:** Aire en movimiento que se produce en dirección horizontal, que depende directamente de la distribución de las presiones, tendiendo a soplar desde regiones de altas presiones hacia lugares de presiones más bajas, con velocidades bajas cerca del suelo, aumentando rápidamente con la altura (EcuRed, 2017).

**Brillo solar:** El total de horas de brillo solar de un lugar es uno de los factores que determinan el clima de esa localidad y corresponde al tiempo en el cual la luz solar incide de manera directa (EcuRed, 2017).

**Humedad:** Contenido de vapor de agua presente en la atmosfera, éste se comporta como un gas y es el resultado de la evaporación del agua (Gonzales, 2008).

**Vapor de saturación:** Máxima cantidad de vapor de agua que el aire puede contener a una temperatura dada (Gonzales, 2008).

**Humedad relativa:** Relación entre el vapor de agua presente en la atmosfera y el vapor de agua de saturación (Gonzales, 2008).

Como se verá más adelante la Consideración en el diseño de los cambios de humedad se hará mediante modelos que incluyen factores climáticos que influyen en los cambios de variables que influyen en el comportamiento mecánico de suelos parcialmente saturados tales como succión y saturación

#### **2.4.4.1.3 Caracterización de los materiales**

La caracterización de los materiales se refiere a la determinación de las propiedades características de cada uno de los materiales que conforman la estructura y con las cuales es posible describir de cierta manera su comportamiento para determinado análisis.

Dentro del modelo de la MEPDG, se ha clasificado los proyectos en tres niveles de diseño que indican como se deberá realizar la caracterización del material.

##### **Niveles de diseño según el MEPDG**

Basándose en la criticidad del proyecto, el tipo de vía y la información y recursos disponibles, es posible clasificar un diseño en los niveles que se indican en la Tabla 5. De esto dependerá la forma de evaluación de los materiales, exigiéndose mayor rigurosidad en algunos proyectos más que otros.



**Tabla 5: Niveles jerárquicos para el ingreso e información en el MEPDG  
(Hernández, Garnica, & Solorio, 2017)**

NIVEL	GRADO DE PRECISIÓN	CARACTERÍSTICAS
1	Alto	Requiere trabajo de campo y laboratorio, lo que implica mayor cantidad de recursos, dinero y tiempo para obtenerlos.
2	Intermedio	Los parámetros de entrada se estiman mediante relaciones o mediante ecuaciones de regresión. Posiblemente obtenidos de bases de datos.
3	Bajo	Los parámetros de entrada son valores globales o regionales. Puede ser usado en diseños donde existan mínimas consecuencias de deterioro inicial.

## 2.5 Modelo Climático de la MEPDG

El modelo climático creado por la MEPDG tiene en cuenta el efecto de la humedad y la temperatura, como variables climáticas en el comportamiento de la estructura de pavimento. El procedimiento comienza con la búsqueda de la información climatológica de entrada (temperatura y precipitación), esta información debe corresponder a registros de como mínimo los 5 últimos años, aunque es recomendable de los 10 últimos años, sin embargo, En el caso que a criterio y responsabilidad del diseñador se cuantifique la variable clima con los dos últimos dos años de información, está también es aceptada. Con esta información proporcionada por la estación meteorológica de influencia, se calcula el exceso mensual (EXCi) y déficit mensual (DFEi) en mm del periodo del mes de análisis, y a continuación se realiza El cálculo del índice de Thornthwaite (TMI), que se encuentra directamente relacionado con la determinación del valor de la evapotranspiración (ETP), con este resultado y mediante un modelo propuesto por Witzak en el año 2006 , se calcula el valor de la succión

matricial, continuando con el cálculo del cambio de saturación mediante la succión matricial y la curva característica del suelo y finalmente, con este valor de saturación y mediante un modelo matemático se obtiene el factor ambiental mensual, para finalmente determinar la variación mensual del módulo resiliente mediante el planteamiento matemático de la NCHRP.

## **2.5.1 Estimación de la succión mensual en términos del índice de Thornthwaite**

### **2.5.1.1 Índice climático -INDICE DE HUMEDAD THORNTHWAITE**

El índice de Thornthwaite, es un parámetro climático ampliamente utilizado en la ingeniería geotécnica y de pavimentos para evaluar los cambios en las condiciones de humedad en suelos cercanos a la superficie en la zona no saturada (Yue, Bulut, & ASCE, 2014).

El modelo desarrollado originalmente por Thornthwaite en 1948, está determinado por el excedente anual de agua, la deficiencia de agua y la necesidad de agua. El excedente y la deficiencia de agua se determinan usando el almacenamiento máximo de agua del suelo realizando un cálculo del balance hídrico (Yue, Bulut, & ASCE, 2014).

El método se basa principalmente en la proporcionalidad de la evapotranspiración a la temperatura media afectada por un coeficiente exponencial (Almoroax, 2001). se calcula considerando el balance de humedad realizado a partir de los valores mensuales de precipitación, temperatura del aire y evapotranspiración potencial, El excedente y la deficiencia de agua se determinan usando el almacenamiento máximo de agua del suelo realizando un cálculo del balance hídrico.

El método de Thornthwaite parte para su cálculo, de los siguientes supuestos (Montaner & Almohalla , 1988)

- La temperatura y la precipitación se aplican como valores medios mensuales. Al utilizar valores medios mensuales, las zonas climáticas áridas o con tendencia a la aridez, proporcionan resultados a una temperatura media normalmente elevada cuyo efecto es considerar evapotranspirables cantidades de agua que ya se han infiltrado en los que se dejan de considerar valores de temperatura mínimos y máximos con precipitaciones irregulares

A continuación, se definen algunos términos que se consideran importantes para el entendimiento del proceso de cálculo del índice de Thornthwaite.

**Evapotranspiración potencial:** Evaporación y la transpiración total que ocurrirían desde la superficie del suelo si el almacenamiento fuera ilimitado. Es una función de variables tales como Temperatura, humedad relativa, velocidad del viento, radiación solar, tipo de suelo y vegetación. (NCHRP, 2004), en otras palabras, corresponde Cantidad de agua que perderá una superficie completamente cubierta de vegetación si en todo momento hay en el suelo agua suficiente para el crecimiento activo de las plantas.

**Evapotranspiración real:** Es la pérdida de agua por los procesos de evaporación y transpiración en condiciones reales de vegetación, estado del tiempo, radiación solar. En términos más específicos corresponde a la Suma de la evaporación directa de agua desde la superficie el terreno y/o desde los poros y grietas del mismo más la transpiración de las plantas.

**Balance hídrico:** Balance del agua en el suelo a lo largo de un tiempo, partiendo de las precipitaciones medias mensuales y de la evapotranspiración de referencia mensual estimada, es decir estimación de la cantidad de agua que infiltra en el suelo y la que se pierde por el proceso de evapotranspiración, conociendo de esta manera si existe exceso o déficit de ésta.

Resulta conveniente iniciar e balance en un mes en que ocurra la máxima deficiencia de agua (Gonzales, 2008).

**Déficit o falta de agua:** Cantidad de agua que falta para cubrir las necesidades potenciales de agua por evapotranspiración, se calcula como la diferencia entre la evapotranspiración potencial y real (Gonzales, 2008).

**Exceso o reserva del suelo:** Cantidad de agua que quedará en el suelo cuando se producen más entradas que salidas, es decir precipitación mayor a evapotranspiración en un periodo de tiempo determinado (Gonzales, 2008).

**Reserva máxima:** Cantidad de agua por unidad de superficie que el suelo es capaz de almacenar en su perfil. Se toma un valor de 10cm/m<sup>2</sup> o 100L/m<sup>2</sup> como referencia climática, para realizar comparaciones en distintas zonas, independientemente del suelo y la vegetación. Si se quiere modelizar la realidad, se calcula la reserva como la diferencia entre el contenido de agua de capacidad de campo y el punto de marchitamiento. Considerando también la profundidad del sistema radicular de la vegetación y la reserva máxima será la capacidad del suelo para retener agua hasta esa profundidad (Gonzales, 2008).

#### **2.5.1.2 Determinación de la evapotranspiración potencial (PE).**

- **Cálculo del índice de calor mensual**

$$i = (0.2t_i)^{1.514}$$

Donde:

**i:** Índice de calor mensual del mes i

**ti:** Temperatura media mensual en °C del mes i

- **Cálculo del índice de calor anual**

$$I = \sum_{i=1}^{12} ij$$

Donde:

**I:** Índice de calor anual

**ij:** Índice de calor mensual

- **Calculo de la evapotranspiración potencial no ajustada para el mes i**

$$ETP_{\text{sin corregir}} = 16 \left( \frac{10t_i}{I} \right)^a$$

$$a = 6.75 \times 10^{-7} x I^3 - 7.71 \times 10^{-5} x I^2 + 0.017921 x I + 0.49239$$

Donde:

**ETP<sub>sin corregir</sub>:** Evapotranspiración potencial en cm de agua por mes durante un mes de 30 días de 12 horas diarias, éste se ajusta dependiendo de la latitud y el mes del año [mm/mes]

**a:** Coeficiente experimental de ajuste

- **Calculo de la evapotranspiración potencial ajustada**

$$ETP_i = ETP_{\text{sin corregir}} \times \frac{N}{12} \times \frac{d}{30}$$

Donde:

**ETP<sub>i</sub>:** Evapotranspiración potencial Ajustada del mes i [mm/mes]

**N:** Número máximo de horas de sol, dependiendo del mes y de la latitud [horas].

**d:** Número de días al mes i[días]

**Tabla 6: Valores de N tabulados**

Latitud	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Latitud	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	
0.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	0.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	
2.0	11.9	11.9	12.0	12.0	12.1	12.1	12.1	12.1	12.0	12.0	11.9	11.9	-2.0	12.1	12.1	12.0	12.0	11.9	11.9	11.9	11.9	12.0	12.0	12.1	12.1	
4.0	11.8	11.9	12.0	12.1	12.2	12.2	12.2	12.1	12.0	11.9	11.8	11.8	-4.0	12.2	12.1	12.0	11.9	11.8	11.8	11.8	11.8	11.9	12.0	12.1	12.2	12.2
6.0	11.7	11.8	12.0	12.1	12.3	12.3	12.3	12.2	12.0	11.9	11.7	11.7	-6.0	12.3	12.2	12.0	11.9	11.7	11.7	11.7	11.8	12.0	12.1	12.3	12.3	
8.0	11.6	11.8	12.0	12.2	12.4	12.5	12.4	12.3	12.0	11.8	11.6	11.5	-8.0	12.4	12.2	12.0	11.8	11.6	11.5	11.6	11.7	12.0	12.2	12.4	12.5	
10.0	11.5	11.7	11.9	12.2	12.5	12.6	12.5	12.3	12.0	11.8	11.5	11.4	-10.0	12.5	12.3	12.1	11.8	11.5	11.4	11.5	11.7	12.0	12.2	12.5	12.6	
12.0	11.4	11.6	11.9	12.3	12.6	12.7	12.6	12.4	12.0	11.7	11.4	11.3	-12.0	12.6	12.4	12.1	11.7	11.4	11.3	11.4	11.6	12.0	12.3	12.6	12.7	
14.0	11.3	11.6	11.9	12.3	12.7	12.8	12.7	12.5	12.1	11.7	11.3	11.2	-14.0	12.7	12.4	12.1	11.7	11.3	11.2	11.3	11.5	11.9	12.3	12.7	12.8	
16.0	11.2	11.5	11.9	12.4	12.8	12.9	12.9	12.5	12.1	11.6	11.2	11.1	-16.0	12.8	12.5	12.1	11.6	11.2	11.1	11.1	11.5	11.9	12.4	12.8	12.9	
18.0	11.0	11.4	11.9	12.4	12.9	13.1	13.0	12.6	12.1	11.6	11.1	10.9	-18.0	13.0	12.6	12.1	11.6	11.1	10.9	11.0	11.4	11.9	12.4	12.9	13.1	
20.0	10.9	11.4	11.9	12.5	13.0	13.2	13.1	12.7	12.1	11.5	11.0	0.8	-20.0	13.1	12.6	12.1	11.5	11.0	10.8	10.9	11.3	11.9	12.5	13.0	13.2	
22.0	10.8	11.3	11.9	12.5	13.1	13.3	13.2	12.7	12.1	11.5	10.9	10.7	-22.0	13.2	12.7	12.1	11.5	10.9	10.7	10.8	11.3	11.9	12.5	13.1	13.3	
24.0	10.7	11.2	11.9	12.6	13.2	13.5	13.3	12.8	12.1	11.4	10.8	10.5	-24.0	13.3	12.8	12.1	11.4	10.8	10.5	10.7	11.2	11.9	12.6	13.2	13.5	
26.0	10.6	11.1	11.8	12.6	13.3	13.6	13.5	12.9	12.1	11.3	10.7	10.4	-26.0	13.4	12.9	12.2	11.4	10.7	10.4	10.5	11.1	11.9	12.7	13.3	13.6	
28.0	10.4	11.1	11.8	12.7	13.4	13.8	13.6	13.0	12.1	11.3	10.6	10.2	-28.0	13.6	12.9	12.2	11.3	10.6	10.2	10.4	11.0	11.9	12.7	13.4	13.8	
30.0	10.3	11.0	11.8	12.6	13.5	13.9	13.7	13.1	12.1	11.2	10.4	10.1	-30.0	13.7	13.0	12.2	11.2	10.5	10.1	10.3	10.9	11.9	12.8	13.6	13.9	
32.0	10.1	10.9	11.8	12.8	13.7	14.1	13.9	13.1	12.1	11.2	10.3	9.9	-32.0	13.9	13.1	12.2	11.2	10.3	9.9	10.1	10.9	11.9	12.8	13.7	14.1	
34.0	10.0	10.8	11.8	12.9	13.8	14.3	14.0	13.2	12.2	11.1	10.2	9.7	-34.0	14.0	13.2	12.2	11.1	10.2	9.7	10.0	10.8	11.8	12.9	13.8	14.3	
36.0	9.8	10.7	11.8	13.0	13.9	14.4	14.2	13.3	12.2	11.0	10.0	9.6	-36.0	14.2	13.3	12.2	11.0	10.1	9.6	9.8	10.7	11.8	13.0	14.0	14.4	
38.0	9.7	10.6	11.8	13.0	14.1	14.6	14.4	13.4	12.2	10.9	9.9	9.4	-38.0	14.3	13.4	12.2	11.0	9.9	9.4	9.6	10.6	11.8	13.1	14.1	14.6	
40.0	9.5	10.5	11.7	13.1	14.2	14.8	14.5	13.5	12.2	10.9	9.7	9.2	-40.0	14.5	13.5	12.3	10.9	9.8	9.2	9.5	10.5	11.8	13.1	14.3	14.8	
42.0	9.3	10.4	11.7	13.2	14.4	15.0	14.7	13.6	12.2	10.8	9.5	8.9	-42.0	14.7	13.6	12.3	10.8	9.6	9.0	9.3	10.4	11.8	13.2	14.5	15.1	
44.0	9.1	10.3	11.7	13.3	14.6	15.3	14.9	13.8	12.2	10.7	9.3	8.7	-44.0	14.9	13.7	12.3	10.7	9.4	8.7	9.1	10.2	11.8	13.3	14.7	15.3	
46.0	8.9	10.2	11.7	13.4	14.8	15.5	15.2	13.9	12.2	10.6	9.1	8.5	-46.0	15.1	13.8	12.3	10.6	9.2	8.5	8.8	10.1	11.8	13.4	14.9	15.5	
48.0	8.6	10.0	11.7	13.5	15.0	15.8	15.4	14.0	12.3	10.5	8.9	8.2	-48.0	15.4	14.0	12.3	10.5	9.0	8.2	8.6	10.0	11.7	13.5	15.1	15.8	
50.0	8.4	9.9	11.6	13.6	15.2	16.1	15.7	14.2	12.3	10.4	8.7	7.9	-50.0	15.6	14.1	12.4	10.4	8.8	7.9	8.3	9.8	11.7	13.6	15.3	16.1	
52.0	8.1	9.7	11.6	13.7	15.5	16.5	16.0	14.4	12.3	10.3	8.4	7.5	-52.0	15.9	14.3	12.4	10.3	8.5	7.5	8.0	9.6	11.7	13.7	15.6	16.5	
54.0	7.7	9.6	11.6	13.8	15.8	16.9	16.3	14.5	12.3	10.1	8.1	7.1	-54.0	16.3	14.4	12.4	10.2	8.2	7.1	7.7	9.5	11.7	13.9	15.9	16.9	
56.0	7.4	9.4	11.5	14.0	16.1	17.3	16.7	14.7	12.3	10.0	7.8	6.7	-56.0	16.6	14.6	12.5	10.0	7.9	6.7	7.3	9.3	11.7	14.0	16.2	17.3	
58.0	6.9	9.1	11.5	14.2	16.5	17.8	17.1	15.0	12.4	9.8	7.4	6.2	-58.0	17.1	14.9	12.5	9.8	7.5	6.2	6.9	9.0	11.6	14.2	16.6	17.8	
60.0	6.4	8.9	11.5	14.3	16.9	18.5	17.0	15.2	12.4	9.6	7.0	5.5	-60.0	17.6	15.1	12.5	9.7	7.1	5.5	6.3	8.8	11.6	14.4	17.0	18.5	
62.0	5.8	8.6	11.4	14.5	17.4	19.2	18.3	15.5	12.4	9.4	6.5	4.8	-62.0	18.2	15.4	12.6	9.5	6.6	4.8	5.7	8.5	11.6	14.6	17.5	19.2	
64.0	5.1	8.0	11.4	14.8	18.0	20.3	19.1	15.9	12.5	9.2	5.8	3.7	-64.0	18.9	15.7	12.6	9.2	6.0	3.7	4.9	8.1	11.5	14.8	18.2	20.3	
66.0	4.0	7.9	11.3	15.1	18.8	22.1	20.1	16.3	12.5	8.9	5.0	1.9	-66.0	20.0	16.1	12.7	8.9	5.2	1.9	3.9	7.7	11.5	15.1	19.0	22.1	
68.0	2.4	7.4	11.2	15.4	19.8	24.0	22.0	16.8	12.6	8.5	3.9	0.0	-68.0	21.6	16.6	12.8	8.6	4.2	0.0	2.0	7.2	11.4	15.5	20.1	24.0	
70.0	0.0	6.8	11.1	15.8	21.6	24.0	24.0	17.4	12.6	8.1	1.9	0.0	-70.0	24.0	17.2	12.9	8.2	2.4	0.0	0.0	6.6	11.4	15.9	22.1	24.0	

**2.5.1.3 Cálculo del balance de humedad para determinar la asignación de agua al almacenamiento, déficit o escorrentía.**

- Extraer la precipitación mensual ( $P_i$ ) de los registros climáticos.
- Estimar el almacenamiento inicial y máximo de agua correspondiente al perfil del suelo en la región.
- Para cada mes, realizar el balance de humedad mensual para obtener exceso y déficit.

Tenemos que:

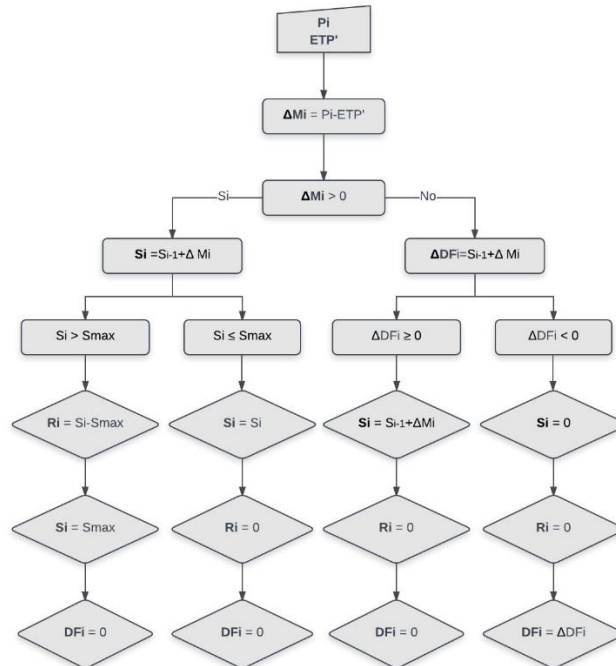
$P_i$ : Precipitación mensual [mm]

$S_o$ : Almacenamiento inicial

$S_{max}$ : Almacenamiento máximo

$DF_i$ : Deficit

$R$ : Reserva





### Figura 15: Diagrama de flujo para la determinación del TMI

#### 2.5.1.4 Cálculo de las sumas anuales que se utilizan para determinar el valor del índice.

Mediante el balance hídrico se obtienen excedentes y déficits mensuales, con los que es posible la obtención de la disponibilidad hídrica, que se puede expresar en índices como el índice de humedad de Thornthwaite. Este índice es una combinación del índice de humedad y del índice de aridez (IDEAM, 2016)

$$I_h = \frac{EXC}{ETP} * 100 \quad (1)$$

Índice de Aridez

$$I_a = \frac{DEF}{ETP} * 100 \quad (2)$$

Índice de Thornthwaite

$$ITM = I_h - 0.6 * I_a \quad (3)$$

Donde:

*EXC* = Exceso de agua anual (mm)

*DEF* = Déficit de agua anual (mm)

*ETP* = Evapotranspiración potencial anual (mm)

De acuerdo al valor de TMI obtenido finalmente, una zona se puede clasificar como indica la Tabla 7.

**Tabla 7: Clasificación según el índice de Thornthwaite**

<b>TMI</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Tipo climático</b>
>100	A	Excesivamente Húmedo
80 a 100	B4	Muy Húmedo
60 a 80	B3	Húmedo
40 a 60	B2	Moderadamente Húmedo
20 a 40	B1	Ligeramente Húmedo
0 a 20	C2	Subhúmedo- Húmedo
-20 a 0	C1	Subhúmedo-seco
-40 a -20	D	Semiárido
< -40	E	Árido

El IDEAM presenta para Colombia la división Zonal en función del Índice de Thornthwaite correspondiente al periodo de 1981-2010 como se indica en la Figura 16.

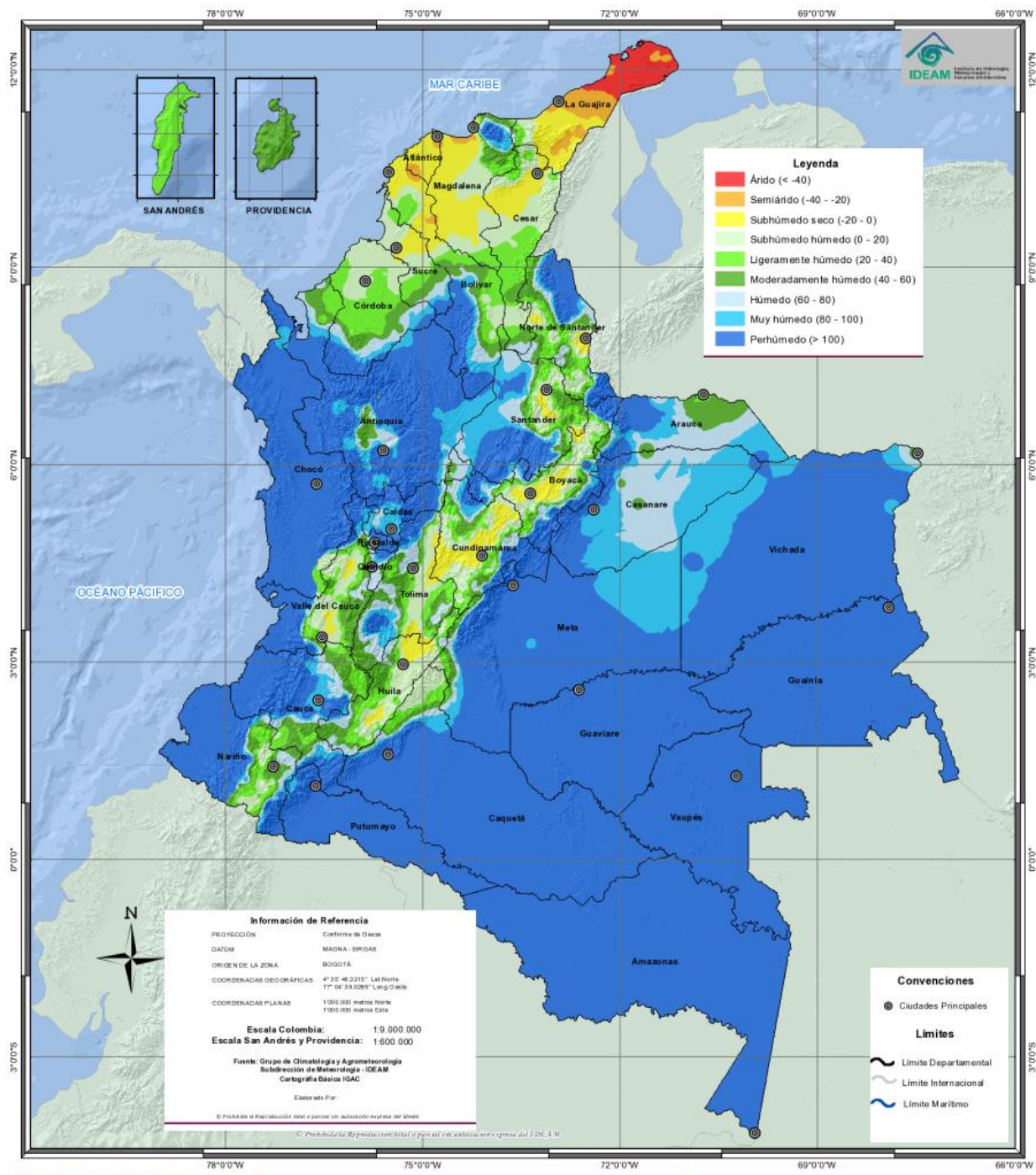


Figura 16: División de Colombia según índice Thornthwaite, Tomado de: (IDEAM, 2015)

Cabe resaltar que la Figura 16 solo representa una guía acerca de los valores del ITM para las regiones de Colombia, mas no una herramienta para la utilización en el diseño.

### 2.5.2 Modelo para la Determinación de la succión en función del índice de Thornthwaite en suelos de subrasante considerados como pasticos ((P<sub>200</sub> ≥ 10% ó wPI ≥ 2.0))

Una vez determinado el Índice de Thornthwaite se procede a la estimación de la succión matricial mensual con la ecuación propuesta por Witczak en el año 2006 y considerada en la MEPDG.

$$h = \alpha \left[ e^{\left[ \frac{\beta}{TMI + \gamma} \right]} + \delta \right]$$

Donde:

$h$  = Succión mátrica (KPa)

$TMI$  = Índice de Thornthwaite mensual o anual.

$\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$  = Constante de regresión TMI-P200/Wpi y los valores son como se muestra en la Tabla 8.

$WPI$ : Índice de plasticidad ponderado que corresponde a la multiplicación de  $\frac{P_{200}}{100}$  por el índice de plasticidad.

$$Wpi = \frac{P_{200}}{100}$$

**Tabla 8: Constantes de regresión para TMI-P<sub>200</sub>/WPIModel (NCHRP, 2004)**

P <sub>200</sub> O WPI	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\delta$	$R^2$
<b>P<sub>200</sub> =10</b>	0.300	419.07	133.45	15	>0.99
<b>P<sub>200</sub> =50/ Wpi= 0.5 o menos</b>	0.300	521.50	137.30	16	>0.99
<b>wPI=5</b>	0.300	663.50	142.50	17.5	>0.99
<b>wPI=10</b>	0.300	801.00	147.60	25	>0.99
<b>wPI=20</b>	0.300	975.00	152.50	32	>0.99

<b>wPI=50</b>	0.300	1171.20	157.50	27.8	>0.99
---------------	-------	---------	--------	------	-------

En el modelo TMI-P200/wPI, la curva P200 = 50 (wPI=0) y wPI = 0.5 o menos son las mismas.

Para usar el modelo TMI-P200/wPI es necesario considerar que:

- Si el valor wPI es inferior a 0.5, se asume por defecto el valor de wPI = 0.5.
- Si wPI = 0, comprobar P200 y continuar con el siguiente numeral
- Si P200 para la subrasante es mayor o igual al 50%, es posible usar por defecto la curva P200 = 50.
- Si P200 es menos de 10%, la succión debe ser calculada usando el modelo de TMI-P200. A partir de la siguiente ecuación

$$h_m = \alpha + e^{[\beta + \gamma(TMI + 101)]}$$

Donde:

hm : Succión matricial, [kPa]

$\alpha$  : Constante de regresión función del P200 [-]

$\beta$  : Constante de regresión función del P200, [-]

$\gamma$  : Constante de regresión función del P200, [-]

TMI : Índice de Thornthwaite calculado, [-]

## 2.5.3 Determinación de la SWCC, teniendo en cuenta el nivel de diseño según la guía de diseño de pavimentos empírico mecanicista (MEPDG)

### 2.5.3.1 Determinación de SWCC para nivel 1 y 2.

Teniendo en cuenta los criterios mencionados anteriormente acerca de los niveles jerárquicos de diseño, se presentan diferentes procedimientos para la determinación de la curva característica del suelo, como se muestra la Tabla 9, partiendo del planteamiento de que esta se obtendrá mediante el modelo planteado por Fredlund and Xing (1994).

Aunque es conocido que la SWCC Obtenida mediante un proceso de secado es diferente de la obtenida mediante humedecimiento, debido al fenómeno conocido como histéresis de la SWCC, si ésta diferencia no es muy importante se puede tomar una sola curva que describa la SWCC en ambos casos, sin embargo es importante tener en cuenta que “Dado el mismo nivel de tensión y succión, el Mr medida a lo largo de un trayecto de humectación es mayor que el medida a lo largo de una trayectoria de secado con bajo esfuerzo cíclico y La diferencia observada entre los dos trayectos se hace menos significativa con un aumento del esfuerzo cíclico” (Ng, Zhou, Yuan, & Xu, 2013).

Para la estimación de la SWCC es necesario la estimación de los parámetros de los materiales compactados, que son los siguientes:

#### Contenido de humedad óptimo volumétrico

$$\theta_{opt} = \frac{w_{opt} \rho_{d,max}}{\rho_w}$$

Donde:

$\theta_{opt}$ : Contenido de humedad óptimo volumétrico, adimensional [-]

$\rho_w$ : Densidad ó masa unitaria del agua (aproximadamente 1000 kg /m<sup>3</sup>)

$w_{opt}$ : Contenido de humedad óptimo, adimensional [-]

$\rho_{d,max}$ : Densidad ó masa unitaria máxima seca, [kg/m<sup>3</sup>]

### **Saturación optima**

$$S_{opt} = \frac{\theta_{opt}}{1 - \frac{\rho_{d,max}}{\rho_w * G_s}}$$

**Donde:**

$S_{opt}$ : Saturación óptima, adimensional [-]

$G_s$ : Gravedad específica, adimensional [-]

### **Contenido volumétrico en condiciones saturadas**

$$\theta_{sat} = \frac{\theta_{opt}}{S_{opt}}$$

el contenido de humedad volumétrico en condiciones saturadas, adimensional [-], podrá ser expresado

Los contenidos de humedad volumétricos son relaciones volumen a volumen, en general se puede entender estas relaciones definiendo el contenido de humedad volumétrico. también en términos porcentuales si se multiplica por 100.

$$\theta_w = \frac{V_w}{V_T}$$

Donde:

$V_w$ : Es volumen de agua en los vacios.

$V_T$ : Es volumen total de la muestra.

### **Grado de saturación en función del contenido volumétrico**

$$S = \frac{\theta_w}{\theta_s}$$

**Donde:**

S: Grado de saturación mensual, adimensional [-].

$\theta_w$ : Contenido de humedad volumétrico [%]

$\theta_{sat}$ : Contenido de humedad volumétrico en condiciones saturadas [%]

**Tabla 9: Procedimiento para determinar SWCC, Nivel 1 MEPDG, (NCHRP, 2004)**

Nivel 1 MEPDG	Procedimiento para determinar SWCC	Requerimientos y Ecuaciones
1	Medición directa de succión matricial (h) y del contenido volumétrico de agua ( $\theta_w$ )	Ensayos de Papel Filtro INV-E-159-13.
2	Medición directa de la densidad seca máxima ( $\gamma_{dmax}$ ) para la humedad óptima ( $w_{opt}$ )	Ensayo Proctor INV-E-141-13 o INV-E-142-13
3	Medición directa de la Gravedad Específica ( $G_s$ ).	Ensayo de Gravedad Especifica INV-E-222-13
4	Calculo del contenido de agua volumétrico para la condición óptima ( $\theta_{opt}$ )	$\theta_{opt} = \frac{w_{opt} \rho_{d,max}}{\rho_w}$
5	Calculo del grado de saturación para la condición óptima ( $S_{opt}$ )	$S_{opt} = \frac{\theta_{opt}}{1 - \frac{\rho_{d,max}}{\rho_w * G_s}}$
6	Calculo del contenido de agua volumétrico para la condición saturada ( $\theta_{sat}$ )	$\theta_{sat} = \frac{\theta_{opt}}{S_{opt}}$
7	Calculo de los parámetros del modelo SWCC ( $af$ , $bf$ , $cf$ , $h_r$ ) usando la ecuación propuesta por Fredlund & Xing, con los valores de succión (h) y contenido de humedad volumétrica ( $\theta_w$ ) de los ensayos de Papel Filtro.	$\theta_w = C(h)$ $* \left[ \frac{\theta_{sat}}{\left[ \ln \left[ EXP(1) + \left( \frac{h}{af} \right)^{bf} \right] \right]^{cf}} \right]$ $C(h) = \left[ 1 - \frac{\ln \left( 1 + \frac{h}{h_r} \right)}{\ln \left( 1 + \frac{1 * 10^6}{h_r} \right)} \right]$



### **Procedimiento de ajuste de la Curva SWCC Para nivel 1.**

El procedimiento consiste en hacer un ajuste en los valores de succión y saturación del modelo de la SWCC, propuesto por Fredlund and Xing, con el fin de lograr que estos, ajusten de a los obtenidos mediante los ensayos de laboratorio.

Para lograr este objetivo se usa la herramienta “SOLVER” de Microsoft Excel Que permite resolver y optimizar ecuaciones mediante el uso de técnicas numéricas.

Los datos de entrada del ajuste son los los que se muestran en Tabla 11, que corresponden a resultados de laboratorio, el objetivo es encontrar los parámetros de la curva de retención, para que la curva del modelo presente valores similares. El procedimiento largo consistiría en darle valores a los parámetros de ajuste de la curva, sin embargo, esto limitaría la precisión y requeriría de mucho más tiempo.

Una vez que se introducen los datos de laboratorio y los valores iniciales de los parámetros del modelo que en este caso corresponderán los parámetros obtenidos para la SWCC en el análisis para nivel 2, se tabulan valores de succión y saturación, amarrando cada una de las ecuaciones del modelo a las celdas donde se encuentren los valores de af, bf, cf y hr.

A continuación, se calcula el valor absoluto de la diferencia entre saturación real y saturación del modelo, éstos valoren se eleva al cuadrado y se calcula la sumatoria de todos los cuadrados de la diferencia.

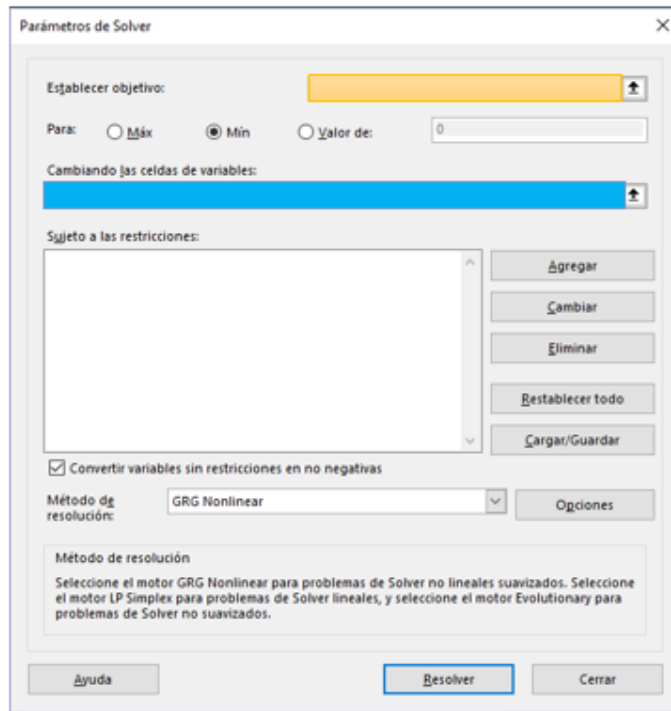
**Tabla 10: Parámetros de la SWCC a iterar**

<b>af</b>	
<b>bf</b>	
<b>cf</b>	
<b>hr</b>	
<b><math>\Theta</math> sat calculado</b>	<b>Conocido</b>

**Tabla 11: Datos y Cálculos para ajuste de la SWCC**

Valores de Laboratorio		Valores del modelo	Ajuste	
hm [Kpa]	S real [-]	S modelo [-]	S real-S modelo	$(S \text{ real}-S \text{ modelo})^2$
			objetivo	$\sum_1^n (S \text{ real} - S \text{ modelo})^2$

En el menú datos de Excel se encuentra la herramienta SOLVER, de la cual se desprende el cuadro de dialogo de La Figura 17.



**Figura 17: Recuadro de dialogo de la función SOLVER**

El “elemento objetivo”, corresponderá a la celda en la que se encuentre la sumatoria de los cuadrados de la diferencia entre  $R_{\text{cal}}$  y  $S_{\text{modelo}}$ , en la parte de “cambiando celdas de variables” se seleccionan aquellas en las que estén los parámetros af, bf, cf y hr. Indicadas con el mismo color en la Tabla 10, Tabla 11 y la Figura 17.

Una vez seleccionado los datos y las celdas a modificar durante el proceso de iteración, se selecciona el método de solución, Excel presenta tres métodos que son: el GRG no lineal, que como prácticamente todos los algoritmos de optimización no lineales, puede encontrar una solución localmente óptima para un modelo no convexo bien escalado, El otro método es el método Simplex LP, que está diseñado para objetivos con limitaciones que correspondan a funciones lineales, o también denominados problema de optimización convexa (ya que todas las funciones lineales son convexas y el ultimo método el método evolutivo, que presenta soluciones optimas a funciones no suaves (No admiten derivadas de cualquier orden) y además que sean convexas.

Después de seleccionar el método de solución se selecciona resolver y se verifican los resultados.

Con los parámetros de la ecuación ya es posible obtención de la curva que corresponderá a la SWCC para nivel 1.

**Tabla 12: Procedimiento para determinar SWCC, Nivel 2 MEPDG en (NCHRP, 2004)**

Nivel 2 MEPDG	Procedimiento para determinar SWCC	Requerimientos y Ecuaciones
1	Medición directa de la densidad seca máxima ( $\gamma_{dmax}$ ) para la humedad optima ( $w_{opt}$ )	Ensayo Proctor INV-E-141-13 o INV-E-142-13
2	Medición directa de la Gravedad Especifica ( $G_s$ ).	Ensayo de Gravedad Especifica INV-E-222-13
3	Medición directa de la granulometría y el índice de plasticidad de los suelos ( $P_{200}$ , $D_{60}$ y IP)	Ensayo de Granulometría. INV-E-123-13 Ensayo de Limite Liquido INV-E-125-13 Ensayo de Limite Plástico e Índice de Plasticidad INV-E-126-13
4	Calculo del contenido de agua volumétrico para la condición optima ( $\theta_{opt}$ )	$\theta_{opt} = \frac{w_{opt} \rho_{d,max}}{\rho_w}$
5	Calculo del grado de saturación para la condición optima ( $S_{opt}$ )	$S_{opt} = \frac{\theta_{opt}}{1 - \frac{\rho_{d,max}}{\rho_w * G_s}}$
6	Calculo del contenido de agua volumétrico para la condición saturada ( $\theta_{sat}$ )	$\theta_{sat} = \frac{\theta_{opt}}{S_{opt}}$
7	Calculo de los parámetros del modelo SWCC ( $a_f$ , $b_f$ , $c_f$ , $h_r$ ) usando la ecuación propuesta por Fredlund & Xing y las correlaciones empleadas por MEPDG.	Si $P_{200} * IP > 0$ Entonces:  $a_f = 32.835 * \ln(WPI) + 32.438$ $b_f = 1.421 * (wPI)^{-0.3185}$ $c_f = -0.2154 * \ln(wPI) + 0.7145$ $h_r = 500$ Si $a_f < 5$ entonces $a_f = 5$ Si $c_f < 0.01$ , entonces $c_f = 0.03$
8	Construcción de la curva de retención.	$\theta_w = C(h) * \left[ \frac{\theta_{sat}}{\left[ \ln \left[ EXP(1) + \left( \frac{h}{a_f} \right)^{b_f} \right] \right]^{c_f}} \right]$ $C(h) = \left[ 1 - \frac{\ln \left( 1 + \frac{h}{h_r} \right)}{\ln \left( 1 + \frac{1 * 10^6}{h_r} \right)} \right]$

## 2.6 Análisis del modelo para determinación del Mr.

La implementación de la nueva Guía Empírico-Mecanística para el Diseño de Pavimentos (MEPDG) de AASHTO en 2011, ha demostrado la influencia que tienen los factores climáticos en el desempeño del pavimento, y en particular, los efectos del contenido de humedad. Ésto ha llevado a la implementación de investigaciones encaminadas a determinar los efectos que las variaciones en el contenido de humedad producen en el MR de los materiales sueltos a lo largo de la vida útil del pavimento. A pesar del gran avance que se ha dado en el campo de la mecánica de suelos parcialmente saturados, la implementación de estos estudios sigue siendo compleja, y en la búsqueda de una implementación en la práctica al día de hoy existen varios modelos que incorporan los efectos que las variaciones en el contenido de humedad tienen sobre la respuesta resiliente de los suelos. (Cary & Zapata, 2012)

El procedimiento consiste en Calcular el módulo resiliente mensual de la subrasante a partir del modelo que representa la variación estacional del módulo, mediante la ecuación presentada por (NCHRP, 2000)

$$\log \frac{M_r \text{ inalterado}}{M_r \text{ opt}} = a + \frac{b-a}{1+e^{(\ln \frac{-b}{a} + k_m * (S \text{ inalterado} - S_{opt}))}} \quad (4)$$

Donde:

$M_r \text{ inalterado}$ : Modulo resiliente en el periodo de diseño.

$M_r \text{ opt}$  = Modulo resiliente en condiciones óptimas.

$S \text{ inalterado}$ : = Saturación a la cual se requiere calcular el módulo resiliente.

$S_{opt}$  = Saturación para la condición óptima.

S: Saturación en el periodo de diseño

a = Parámetro del modelo. Mínimo log (Mr/Mr opt), Ver Tabla 13

b = Parámetro del modelo. Máximo log (Mr/Mr opt), Ver Tabla 13

km = Parámetro del modelo. Parámetro de Regresión, Ver Tabla 13

El  $M_{ropt}$ , es el valor obtenido en condiciones de densidad seca máxima y contenido de humedad óptimo o condiciones cercanas a éstas. La ecuación NO asume los **cambios** que ocurren dentro del estado de esfuerzos del suelo, por tal razón el valor de  $M_{ropt}$  se considera constante y se calcula en función del CBR.

La ecuación de módulo resiliente, se aproxima a una línea para grados de saturación que se encuentren en el rango entre +/-30% del  $S_{opt}$ , pero se aplana para grados de saturación inferiores al 30% por debajo del óptimo. (NCHRP, 2000)

Utilizando los datos disponibles de la literatura y una relación de módulo máximo de 2,5 para el material de grano fino y 2 para los materiales de grano grueso, se dan en la

Tabla 13 los valores de a, b, Km para materiales de grano grueso y grano fino.

**Tabla 13: Valores de a, b y Km para materiales de grano grueso y materiales de grano fino (NCHRP, 2004)**

Parámetro	Materiales de grano grueso	Materiales de grano fino	Observaciones
A	-0.3123	-0.5934	Parámetro de regresión
B	0.3	0.4	Parámetro de regresión Asumido conservadoramente, que corresponde a relaciones de módulo de 2 y 2,5, respectivamente.
Km	6.8157	6.1324	Parámetro de regresión.

### 2.6.1 Determinación del factor ambiental $F_{amb}$

El factor ambiental ( $F_{amb}$ ), es un factor que multiplica al módulo resiliente óptimo o cercano a las condiciones óptimas, de cada capa no ligada del pavimento para obtener el módulo resiliente en cada una de éstas y puntos de la estructura del pavimento. El módulo resiliente ( $M_r$ ) en cada una de las capas, toma en cuenta la variación de las características mecánicas por las condiciones climáticas, durante el periodo de diseño

$$M_r = F_{amb}M_{r,opt}$$

$M_r$ : Módulo resiliente de la subrasante para un mes dado afectado por el factor ambiental.

$F_{amb}$ : Factor ambiental para el mes correspondiente.

$M_{r,opt}$ : Modulo resiliente en condiciones óptimas.

El factor ambiental se determina mediante la siguiente expresión

$$F_{amb} = \frac{M}{M_{r,opt}} = 10^{\left[ a + \frac{b-a}{1 + e^{\left( \ln \frac{-b}{a} + Km(s - S_{opt}) \right)}} \right]}$$

### 3 METODOLOGIA, TOMA DE MUESTRAS DE SUELOS Y ENSAYOS DE LABORATORIO.

#### 3.1 Metodología general

Mensualmente se hizo toma de muestra alterada e inalterada, de dos tipos de suelos, Ubicados en Popayán (Cauca) para la ejecución de los ensayos que se describen en la Tabla 14, basándose en los procedimientos establecidos en las normas del INVIAS, en la sección 100, correspondiente a Suelos y a los parámetros de entrada que requieren los modelos de la MEPDG.

**Tabla 14: Ensayos por muestra y su periodicidad**

N°	Ensayo	Norma	Periodicidad
1	Limite Liquido Limite Plástico e Índice de Plasticidad	INV-E-125-13 INV-E-126-13	Única vez.
2	Granulometría.	INV-E-123-13	Única vez.
3	Gravedad Especifica	INV-E-222-13	Única vez.
4	Proctor Estándar	INV-E-141-13	Única vez.
5	Proctor modificado	INV-E-142-13	Única vez.
6	CBR opt	INV-E-148-13	Única vez.
7	Contenido de agua o Humedad	INV-E-122-13	Cada mes.
8	Succión con Papel Filtro	INV-E-159-13	Cada mes, buscando construir una única curva característica.
9	CBR inalterado	INV-E-148-13	Cada mes
10	Compresión inconfina	INV-E-152-13	Cada mes si es posible.

#### 3.2 Localización de los lugares de muestreo

El proyecto de investigación se realizó con dos tipos de suelo ubicados en el casco urbano de Popayán, considerando su cercanía a la estación meteorológica de la Universidad del Cauca. Localizados tal y como se muestra en la Figura 18.

Las muestras se han etiquetado como: Muestra de ingenieros civil y muestra de la ladrillera





**Figura 18: Ubicación de los lugares de toma de muestras**

### **Toma de muestras**

Mensualmente se tomaron en cada lugar seleccionado tres muestras de suelo, algunos kilos de material suelto, una muestra para CBR inalterado y un bloque de suelo tallado, según lo establecido en la Norma INV E 104 “Toma de muestras inalteradas de suelo en superficie”

La toma mensual se muestra se hizo de acuerdo al cronograma de la Figura 19.

● Muestra ingeniería civil

¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..

● Muestra de la ladrillera

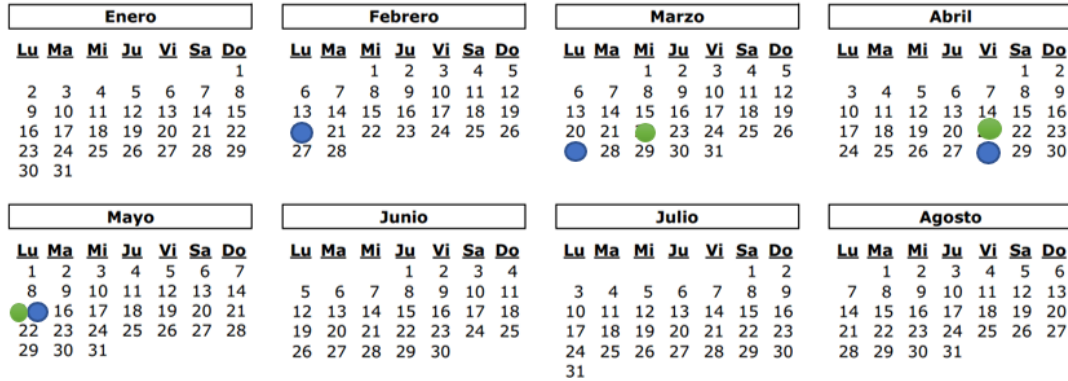


Figura 19: Fechas de toma de muestras



Figura 20: Equipo para muestreo



**Figura 21: Cobertura vegetal - ingeniería civil**



**Figura 22: Inicio de toma de muestras ingeniería civil**



**Figura 23: Bloque tallado- Ingeniería civil**



**Figura 24: Bloque tallado- La ladrillera**



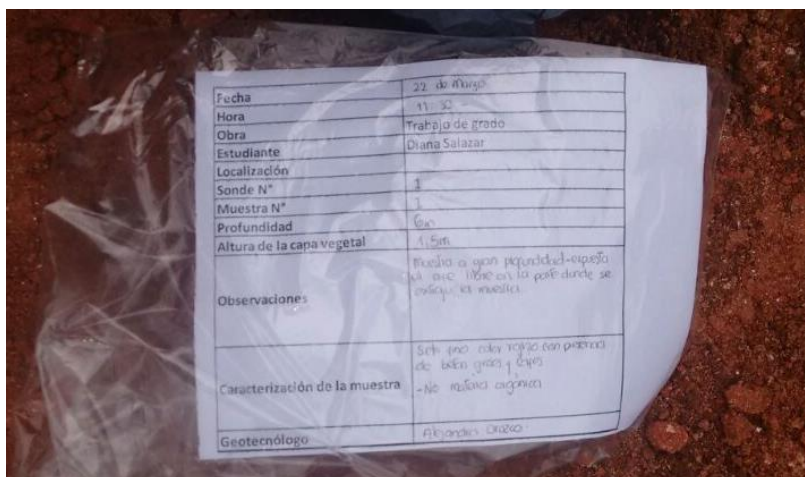
**Figura 25: CBR inalterado- la ladrillera**



**Figura 26: CBR inalterado- Ingeniería civil**

## Identificación de las muestras

Una vez tomadas las muestras, estas se llenan en bolsas negras, se identifican como se muestra en la Figura 27, siguiendo lo establecido por la norma INV E-103-13 “Conservación y transporte de muestras de suelo” y finalmente se sellan.



Fecha	22 de Agosto
Hora	11:32
Obra	Trabajo de grado
Estudiante	Diana Salazar
Localización	
Sonde N°	1
Muestra N°	1
Profundidad	6cm
Altura de la capa vegetal	1.5m
Observaciones	Muestra a gran profundidad-respecto a una obra en la cual donde se realizó la muestra.
Caracterización de la muestra	Solo fino color rojo con presencia de bloques grises y blancos. -No muestra coque.
Geotecnólogo	Alexander Orozco

**Figura 27: Identificación de muestras en campo.**

## Transporte

Basándose en la norma INV E -103 -2013 “Conservación y transporte de muestras de suelo”, las muestras pertenecen a los grupos B correspondiente a muestras alteradas y D a muestras inalteradas considerándose la fragilidad de los dos tipos de muestra. Las del grupo B son las requeridas para los ensayos de: contenido de humedad, clasificación, compactación CBR y las del grupo D para los ensayos de Ensayo CBR inalterado, peso unitario y succión.

Las muestras obtenidas en el talud de la facultad de ingeniería civil se trasladaron directamente desde el lugar de la toma hasta el laboratorio, La muestra de la ladrillera se llevó al laboratorio usando un medio de transporte, existiendo siempre supervisión en los procedimientos de cargue, transporte y descargue. En los dos casos se usó bolsas plásticas y cinta adhesiva para la conservación de las muestras.

En el caso de los bloques tallados, se supervisó que durante el proceso de transporte al laboratorio, la muestra se manejara manteniendo la orientación con la que fue muestreada, basándose en la marca realizada en la muestra una vez terminado el tallado de ésta.

### **Almacenamiento**

En el laboratorio las muestras se guardaron en el cuarto húmedo, hasta el momento de la realización de los ensayos. con el fin de preservar las condiciones de humedad iniciales, representativas del momento en el que se hizo la toma de la muestra.

## **3.3 Procedimientos de ensayos**

Los ensayos que se ejecutaron en el laboratorio se presentan en la Tabla 14 junto con su protocolo de ensayo (normas INVIAS) para los cuales fue necesario tanto muestra alterada como inalterada.

### **3.3.1 Determinación en el laboratorio del contenido de agua (Humedad) de muestras de suelo, roca y mezclas de suelo-Agregado-INV-E-122-13**

El ensayo consistió en llevar una muestra de material húmedo de aproximadamente 100 gramos al horno a  $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ , hasta masa constante, que normalmente se alcanza después de 16 horas. En el proceso, se tomó una porción de muestra que se consideró representativa y se pesó en un recipiente al cual se le determinó el peso con anterioridad, después de 16 horas se retiró del horno y se obtuvo el peso de la muestra seca más el recipiente y el porcentaje de humedad correspondería a la relación entre el peso del agua y el peso de sólidos.

### 3.3.2 Determinación del límite líquido de los suelos – INV-E-125-13



**Figura 28: Ensayo de limite líquido y plástico.**

El ensayo se realiza con una porción representativa de cada muestra, pasante del tamiz N°40 de aproximadamente 200 gramos, Una vez lista la muestra, se procedió a espátular con el fin de disgregar partículas de mayor tamaño y conseguir mediante este proceso una pasta sin grumos, la cual se remezcla completamente ajustando el contenido de agua hasta conseguir una consistencia para la que sean necesarios entre 25 y 35 golpes para cerrar la ranura que se forma en el suelo. Se puso una porción de la muestra sobre la cazuela de Casagrande, comprimiendo, expandiendo y nivelando con la espátula, a continuación, se dividió la muestra con un ranurador con una línea que va desde el punto más alto hasta el borde, en seguida, se golpeó la cazuela girando la manija a una velocidad de 1.9 a 2.1 revoluciones por minuto, hasta que 13mm de las dos mitades de la pasta hagan contacto en



el fondo y finalmente si la cantidad de golpes requerida se encontraba en uno de estos tres rangos, 25-35, 20-30 y 15-25, se hacia la toma de un testigo de humedad correspondiente a la mezcla del fondo en la cual se unieron las dos partes y el Limite liquido correspondería a la humedad necesaria para que se requieran 25 golpes para cerrar la ranura de 13mm.

### **3.3.3 Limite plástico e índice de plasticidad de los suelos- INV-E-126-13**

De la muestra preparada para el ensayo de limite plástico, se sacó una porción correspondiente a mínimo 20 gramos y se puso a secar hasta el momento en el que fue posible realizar rollitos de un diámetro de 3.2mm, teniendo en cuenta que en este momento, el espécimen no se debe dejar adelgazar más, dividiéndose en varios trozos, una vez se la muestra llego a este estado, se tomó un testigo de humedad y la humedad de horno obtenida correspondería al límite plástico de la muestra.

### **3.3.4 Determ. de los tamaños de las partículas de los suelos INV-E-123-13**



### Figura 29: Ensayo de granulometría por tamizado.

Teniendo en cuenta que el objetivo del ensayo es la determinación del porcentaje pasa N° 200, la granulometría se determinó teniendo como base La INV-E- 213 para la determinación de la granulometría por tamizado y La INV-E-214 para la determinación del material que pasa el tamiz N 200,

Como primer procedimiento se pesó aproximadamente 300 gramos de material, a continuación, se lavó la muestra con agua pura hasta que al pasar por el tamiz N° 200, el agua salga limpia, a continuación, la muestra se llevó al horno y se prepara para el proceso de tamizado.

Una vez lavado el material, La determinación cuantitativa de la distribución de los tamaños superiores incluye los tamices que se presentan en la Tabla 15, con el fin de obtener una curva con separación uniforme.

**Tabla 15: Serie de tamices para granulometría.**

3"	75mm
1 1/2 "	37.5mm
3/4"	19mm
3/8"	9.5mm
N° 4	4.75mm
N° 8	2.36mm
N° 16	1.10mm
N° 30	600 $\mu m$
N° 50	300 $\mu m$
N° 100	150 $\mu m$
N° 200	75 $\mu m$

### **3.3.5 Determinación de la gravedad específica de las partículas sólidas de los suelos y del llenante mineral, empleando un picnómetro con agua INV-E-128-13.**

Para el ensayo se utilizaron de de 70 a 80 g de muestra, teniendo en cuenta que finalmente se debían obtener de 40 a 60 g de peso de sólidos, A la cantidad inicial de muestra se le agregó agua para disgregar los grumos, en primer lugar de forma manual y a continuación usando un dispersador mecánico, con el fin de garantizar la separación de partículas, en seguida, se pasó el contenido a un matraz de 500ml, se midió la temperatura y se llevó a la bomba de vacíos, en el momento en que se consideró que la muestra no contenía vacíos se saco de la bomba, se llenó con agua destilada hasta la línea de nivel de aforo, se determinó el peso y se midió nuevamente la temperatura, finalmente, se sacó el material del matraz, recuperando todo el contenido y se llevó al horno hasta obtener peso constante

### 3.3.6 Relaciones Humedad- Peso unitario seco en los suelos (Ensayo normal de compactación)- INV-E-141-13



**Figura 30: Ensayo proctor estándar-Método A**

El ensayo consistió en compactar una muestra de suelo seca pasante del tamiz N°4, 3/8 o 3/4, dependiendo del método, a una humedad que se considere adecuada, teniendo como base el límite plástico del material y acondicionada en tres capas en un molde metálico y cilíndrico sobre un soporte uniforme y estable, con un número de golpes determinado en cada una de las capas, con un martillo de 5.5 libras y una altura de caída de 12 pulgadas.

En la norma se establecen tres métodos como se presenta en la Tabla 16

**Tabla 16: Métodos para realizar el ensayo normal de compactación**

Método	Molde		Martillo		capas	N° de golpes
	diámetro pulg	Volumen cm <sup>3</sup>	Peso lb	Altura de caída pulg		
A	4	943 ± 14	5.5	12	3	25
B	4	943 ± 14				25
C	6	2124 ± 25				56

La determinación del método a usar se basa en la granulometría del material, si el porcentaje retenido en el tamiz N° 4 es menor o igual al 25% se puede usar el método A, si el porcentaje retenido en el tamiz de 3/8", es menor o igual al 25% se debe usar el método B y el método C, se usa cuando el 30% o menos queda retenido en el tamiz de 3/4".

Para el caso de muestras de suelo fino, como las de las muestras estudiadas fue factible la utilización del método A.

En primer lugar, se tamizaron las muestras eliminando los grumos más grandes conformados por material seco el cual era difícil de disgregar y se pusieron a secar, considerando que su humedad era relativamente alta, este procedimiento duro aproximadamente 15 días, siendo necesario mas tiempo para la muestra del talud de ing civil

Una vez lista la muestras, se prepararon con diferentes contenidos de humedad y se compactaron, Los contenidos de humedad óptimos obtenidos fueron bastante altos, hecho que llevo a que el ensayo se hiciera más largo debido a que se comenzaron los ensayos con porcentajes de humedad mucho mas bajos.

### 3.3.7 Relaciones Humedad- Peso unitario seco en los suelos (Ensayo modificado de compactación)- INV-E-142-13

El ensayo consistió en compactar una muestra de suelo en 5 capas en un molde que puede ser de 4" o 6", con un numero de golpes igual a 25 o 56 respectivamente en cada una de las capas y con un martillo de 10lb que cae desde una altura de 18".

Método	Molde		Martillo		capas	N° de golpes
	Diámetro pulg	Volumen cm <sup>3</sup>	Peso lb	Altura de caída pulg		
A	4	943 ± 14	10	18	5	25
B	4	943 ± 14				25
C	6	2124 ± 25				56

El método utilizado Para el ensayo con las dos muestras de suelo fue el A, debió a que el material era pasante del tamiz N° 4 y con la granulometría fue posible determinar que en este tamiz queda retenido menos del 25%. De la masa del material.

Al igual que el ensayo de proctor estándar, las muestras se secaron, se prepararon a diferentes contenidos de humedad y se compactaron, hasta obtener la densidad seca máxima.

### 3.3.8 CBR de suelos compactados en el laboratorio y sobre muestra inalterada- INV-E-148-13 (CBR Optimo)

Existen dos posibilidades para realizar este ensayo; la primera consiste en preparar un molde con un único contenido de agua, que correspondería al porcentaje de agua optimo, compactado con una única energía, sin embargo, considerando el hecho de que el ensayo proctor se hizo en los moldes de 4" y no en el de 6", que corresponde al molde para CBR, el hacer el ensayo con un único molde no garantizaría el obtener la densidad seca máxima del proctor estándar. Por tal razón, se utilizó el segundo procedimiento presentado por la norma,

para el que fue necesario compactar 3 moldes con una humedad correspondiente a la humedad óptima, aplicando un número diferente de golpes por capa (56, 25 y 10), obteniendo valores de densidad seca por encima y por debajo del valor de densidad seca máxima obtenida en el proctor estándar. Finalmente, se realizó la penetración sobre los moldes compactados, colocando la sobrecarga que en el caso fue de 10 Kg.

A continuación, se montó el espécimen sobre el equipo de carga como se muestra en la Figura 31, y se midieron esfuerzos aplicadas a deformaciones establecidas. Con esto se calculó la presión aplicada por el pistón y se dibujó la curva de esfuerzos penetración, encontrando el valor de CBR correspondiente a la relación entre el esfuerzo requerido para penetrar 0.1” y 0.2” y el esfuerzo requerido por una muestra patrón. Teniendo en cuenta que el CBR de la muestra debería ser el correspondiente a la penetración de 0.1”, en los ensayos resulto mayor el esfuerzo a la lectura a 0.2”, por ello se calculó un tercer valor de CBR, a otra penetración y el CBR final se tomó como la tendencia.

De cada uno de los moldes, con humedad óptima y densidad determinada, se obtuvo un valor de CBR. Para determinar el valor de CBR óptimo, se generó la curva CBR vs Densidad seca y cortando la gráfica con la densidad seca máxima del proctor estándar se obtuvo el CBR que corresponde a la densidad máxima y con la humedad óptima.

Algo que cabe resaltar es que una vez compactados los especímenes, éstos se penetraron sin realizar el proceso de inmersión, debido a que el parámetro sensibilizado es la humedad y los resultados de CBR obtenidos debían corresponder a los obtenidos cuando un espécimen se encuentra con el contenido de humedad óptimo o cercano a éste.



**Figura 31: Montaje para ensayos CBR**

### **3.3.9 Ensayo CBR inalterado**



**Figura 32: Ensayo CBR inalterado**

El ensayo comenzó con la limpieza de la superficie, haciendo que el área quede uniforme y horizontal, a continuación, al molde de 6" de diámetro y sin collar se le puso un anillo cortador, se ubicó sobre la superficie y se comenzó a hincarlo, una vez éste penetro la profundidad necesaria, se sacó el molde con muestra, la muestra se etiqueto, se guardó en



bolsas plásticas y se trasladó al laboratorio, aquí la muestra se almacena en el cuarto húmedo hasta el día del ensayo. El proceso de penetración de la muestra se ejecutó tal y como se describe en el ensayo de determinación del CBR óptimo, obteniendo finalmente una muestra del punto de penetración para determinación de humedad y densidad.

Este ensayo se realizó mes a mes, en el sitio elegido para la toma de muestra, la separación entre la muestra de un mes y otro es mínima e igualmente se trató de que la profundidad a la que se tomara la muestra fuera la misma.

### 3.3.10 Compresión inconfiada en muestras de suelo -INV-E-152-13



**Figura 33: Ensayo de compresión inconfiada.**

La determinación de la resistencia a la compresión no confinada de suelos cohesivos mediante aplicación de carga axial se hizo con una muestra cilíndrica tallada obtenida a partir de un bloque tallado, teniendo en cuenta que su diámetro mínimo debe ser 30mm y la relación

altura/diámetro debe estar entre 2 y 2.5, una vez listo el espécimen, éste se midió y se peso. En seguida se puso en el aparato de carga quedando centrado sobre la platina inferior, se ajustó el anillo y se procedió a lograr el primer contacto, a partir del cual se comienza a marcar la deformación. Se continuo con la aplicación de carga a una velocidad que de ½ a 2.5% de la altura por minuto, debido a la fragilidad de las muestras estas se ensayaron con velocidades de deformación bajas, teniendo claro que la velocidad se debe escoger de manera que el tiempo necesario para la falla sea menor que 15 minutos. Se registraron los valores de carga y deformación, en este caso se controló deformación y se registró esfuerzos a deformaciones determinadas.

El objetivo principal del ensayo fue conocer mes a mes la resistencia del suelo, sin embargo, debido a que en algunos meses fue imposible su realización debido a la dificultad para el tallado de la muestra, se tomó la decisión de no realizarlos.

### **3.3.11 Determinación de la succión de un suelo usando papel filtro- INV-E-159-**

#### **13**

- **Tallado de muestras para el ensayo:** De un bloque se tallaron muestras con dimensiones acordes a las del recipiente utilizados para el ensayo, con un peso entre 200 y 400gramos, tal como se muestra en la Figura 34 y en la Figura 35.



**Figura 34: Muestras talladas para ensayo de succión mátrica - Ingeniería civil**



**Figura 35: Muestras talladas para ensayo de succión mátrica- La ladrillera**

- **Toma de testigos de humedad:** Con el fin de conocer la humedad de las muestras preparadas para succión, se tomó parte de estas muestras húmedas para ser llevadas al horno y obtener su respectiva humedad, esta humedad se determinó únicamente para tener una idea del valor inicial de humedad y observar los efectos del procedimiento de secado
- **Proceso de secado de muestras:** Las muestras se secaron en un ambiente cerrado y con variaciones de temperatura no muy altas y la metodología consistió en que, a partir de la primera muestra, la siguiente se dejaría secar cuatro días más que la

anterior. Una vez la muestra completaba el ciclo de secado, se tomó testigo de humedad y ésta era envuelta en papel film, como se muestra en la Figura 36 y almacenada en una nevera de Icopor en el cuarto húmedo hasta el día del ensayo.



**Figura 36: Empacado de la muestra después del ciclo de secado.**

- **Preparación de papeles filtro:** Para el ensayo se utilizó el papel filtro Whatman N°42 de 5cm de diámetro, antes de su utilización se llevó al horno durante aproximadamente 16 horas, en los recipientes que muestra la Figura 37. Después de esto, se almacenaron en el desecador hasta el momento de su uso.





**Figura 37: Proceso de secado de papeles filtro**

- **Proceso de ensayo:** Las muestras se pusieron en los recipientes de la Figura 38.



**Figura 38: Recipientes para ensayo de succión**



**Figura 39: Materiales para ensayo de succión**

A continuación, se colocó el papel filtro dentro del recipiente con muestra como se ve en la siguiente imagen.



**Figura 40: Colocación del papel filtro en la muestra**

El proceso de la colocación del papel filtro se hizo en el menor tiempo posible evitando la contaminación y humedecimiento de éste debido a factores externos.

Con el papel filtro en la muestra, el siguiente paso consistió en cerrar los recipientes garantizando un sello hermético y la ubicación en un ambiente donde la temperatura varié

menos de 3°C, para ello se utilizó una nevera de icopor, la cual se almacenó en el cuarto húmedo durante 7 días.

- **Medición de la succión total:** Se ubica la muestra de suelo dentro del recipiente y mediante el uso de un separador se ubican dos papeles filtro de tal forma que no estén en contacto con el espécimen de suelo.
- **Medición de la succión matricia:** Se retiran del desecador tres papeles filtro y se coloca uno sobre la muestra de suelo, el papel del centro de menor diámetro que los otros dos, es el que se utiliza para el análisis de la succión matricial.
- **Recipientes para papel filtro:** Se utilizan una vez se remueva el papel de filtro de la muestra luego de haber alcanzado la succión de equilibrio, en el caso se usaron las bolsas plásticas de la Figura 41. las cuales se pesaron inmediatamente antes de ser utilizadas para el almacenamiento del papel filtro húmedo.



**Figura 41: Bolsas plásticas para almacenamiento de papeles filtro**

- **Retiro de los papeles filtro:** pasado los 7 días, se retiraron los papeles filtro poniéndose dentro de la bolsa plástica y a en seguida en el desecador continuando con el proceso de pesado.



**Figura 42: Determinación del peso de papeles filtro húmedos**

- **Secado de papeles filtro:** Los papeles filtro húmedos se llevan al horno a  $110 \pm 5^\circ\text{C}$ , una vez secos se vuelven a colocar en la bolsa plástica y se pesan, terminado esto, se pesa nuevamente la bolsa plástica y se culmina el ensayo.
- **Determinación de la humedad de las muestras:** Las muestras de suelo húmedas se sacan de los recipientes de succión y se pasan a otros para ser pesadas y llevadas al horno, después de aproximadamente 16 horas se sacan de éste obteniendo su peso seco.





**Figura 43: Muestras para determinación de humedad**



**Figura 44: Secado de muestras en horno**



**Figura 45: Muestras secas**

### 3.4 Tablas resúmenes de Resultado de ensayos de laboratorio

**Tabla 17: Tabla resumen de resultados de ensayos de laboratorio única vez.**

Ensayo		Norma INV-E	Muestra de ingeniería civil	Muestra de la ladrillera
Limite Líquido	%W	125-13	97	71
Limite Plástico	%W	126-13	41	42
Índice de Plasticidad	%W	126-13	56	29
Granulometría	% pasa N° 200	213-13	88	46
Gravedad Específica		222-13	2.756	2.698
Proctor Estándar	$\gamma_{d_{max}}$	141-13	1.12	1.138
	%W <sub>óptimo</sub>		48.5	40
Proctor modificado	$\gamma_{d_{max}}$	142-13	1.315	1.371
	%W <sub>óptimo</sub>		38.5	28
Masa unitaria natural	Yd		1.017	0.88
CBR Óptimo	%	148-13	22	10

**Tabla 18: Tabla resumen de Ensayo CBR inalterado- Muestra ing. civil, realizado mensualmente.**

	Febrero	Marzo	Abril	Mayo
<b>Humedad (%)</b>	52.60	53.54	55.39	<b>63.09</b>
<b>Yd</b>	1.065	0.850	1.188	<b>0.962</b>
<b>CBR (%)</b>	34	24	39	<b>8</b>

**Tabla 19: Tabla resumen de Ensayo CBR inalterado- Muestra de la ladrillera, realizado mensualmente.**

	Marzo	Abril	Mayo
<b>Humedad (%)</b>	52.49	55.39	<b>51.05</b>
<b>Yd</b>	1.095	0.857	<b>1.004</b>
<b>CBR (%)</b>	41	39	<b>3</b>

Los resultados señalados con rojo no se tienen en cuenta en el análisis del modelo, debido a que presentan una variación muy alta, mostrando incoherencia con los resultados obtenidos para los meses anteriores. La obtención de valores de CBR tan bajos se debe a que la toma de muestras se hizo en una semana en la que se presentaron fuertes lluvias, agregando a esto

la alteración de la muestra de la ladrillera, debida a la circulación de volquetas en el lugar de estudio.



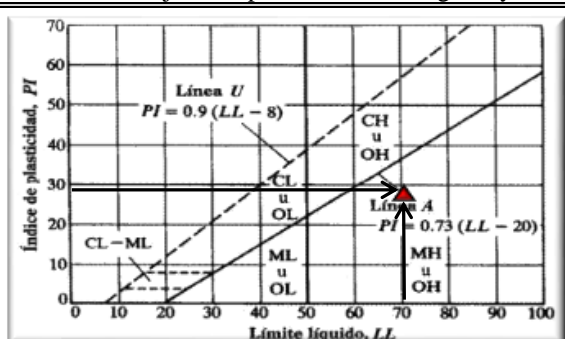
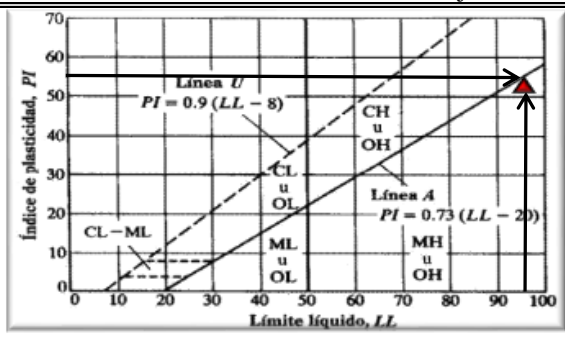
**Tabla 20: Tabla resumen de resultados de ensayos de succión matricial, realizado mensualmente y también utilizando muestras secadas al aire.**

		Muestra de ing Civil		Muestra de la ladrillera	
		Succión [Kpa]	Saturación [%]	Succión [Kpa]	Saturación [%]
<b>Ensayos mensuales</b>	<b>Febrero</b>	9.40	98		
	<b>Marzo</b>	1198.46	92	23.66	69
	<b>Abril</b>	1.99	81	5.65	71
	<b>Mayo</b>	20.15	95	41.10	68
<b>Ensayos Adicionales</b>	<b>1</b>	6958.40	72	471.63	55
	<b>2</b>	34708.31	56	2570.06	40
	<b>2</b>	42207.89	51	7963.65	32
	<b>3</b>	55842.96	44	49379.98	14

En el Anexo del documento se encuentra los formatos y registros de ensayos de laboratorio en toda su extensión.

### 3.5 Análisis de resultados

Tabla 21: Clasificación de las muestras

Muestra de la ladrillera	Muestra de ingeniería civil
	
<b>Clasificación SUCS</b>	
Suelo Color rojizo con presencia de betas grises y cafés	Suelo color café amarillento con betas rojizas
	
<b>SM</b>	<b>MH</b>
<b>Clasificación AASTHO</b>	
% Pasa N°200= 46	% Pasa N°200= 88
% W LL=71	% w LL= 97
% W IP=29	% W IP=56
IG	IG
10	59
Pasa N° 200>35%	
LL>41 Y Lp>11	
IP< LL-30	
<b>A-7-5</b>	<b>A-7-5</b>

### **3.5.1 Análisis de resultados de laboratorio**

#### **3.5.1.1 Muestra de ing. Civil.**

- Color del suelo: Tendiendo en cuenta que el color del suelo es producto de los componentes de este, en este caso el suelo presenta un color amarillento muy oscuro, que podría indicar la presencia de óxidos e hidróxidos de hierro como Goethita( $\text{FeO}(\text{OH})$ )
- Textura: Corresponde a un suelo con partículas muy finas, que, al aglomerarse, debido a su alto grado de cohesión permiten la formación de una matriz de suelo muy dura, difícil de desintegrar a humedades no muy altas.
- Estructura: Se logra identificar un suelo liviano, caracterizado por presentar una elevada retención de agua, que además requiere de los largos periodos para llevarse a cabo el procedimiento de secado.
- Plasticidad: Un IP de 56, indica que corresponde a un suelo de alta plasticidad, algo evidenciado durante los meses en los que se realizó el muestreo debido a que se obtuvieron muestras con porcentajes de humedad relativamente altos, notándose un comportamiento muy plástico una vez esta remodelada. Algo importante es que el índice de flujo (Pendiente de la curva de flujo) indica que presenta una baja sensibilidad al cambio de la consistencia con la variación del contenido de agua.
- Resistencia en estado seco: Correlacionado el valor del IP con este parámetro, se tiene que este suelo tiene una resistencia en estado seco muy alta.

- Resistencia al esfuerzo cortante: Los valores de CBR mensuales, de muestras inalteradas, muestran valores muy altos, con referencia a los valores típicos de suelos clasificados como MH, que se encuentran alrededor de 8%, por lo que es posible decir que el suelo presenta una resistencia alta a esfuerzos cortante. Este resultado es muy importante dentro del estudio, debido a que, por las características de los suelos, estos corresponden a suelos derivados de cenizas volcánicas, lo que sería la evidencia del aporte de la cementación al esfuerzo cortante. Tema que se desarrollara más adelante, en la discusión de los resultados de la comparativa del modelo.

### **3.5.1.2 Muestra de la ladrillera**

- Color del suelo: Su color rojizo indica que es un suelo rico en óxidos de hierro, principalmente minerales como la hematita ( $Fe_2O_3$ ).
- Textura: Suelo suelto y con presencia de partículas no muy finas, y algunas partículas brillantes. como matriz aglomerada presenta una cohesión baja y muy fácil de desintegrar en estados de humedad no muy altos.
- Estructura: Durante el proceso fue posible o inferir que corresponde a un suelo con escasa retención de agua, que además requiere de tiempos no muy largos para lograr su secado.
- Plasticidad: Plasticidad: Un IP de 29, indica que corresponde a un suelo con plasticidad medianamente alta y el índice de flujo indica que presenta alta sensibilidad al cambio de la consistencia con la variación del contenido de agua.
- Resistencia en estado seco: Correlacionado el valor del IP con este parámetro, se tiene que este suelo tiene una resistencia en estado seco mediana

- Resistencia al esfuerzo Cortante: Los valores de CBR son bastante altos, sin embargo, se encuentran cercanos al rango de CBR típicos para suelos clasificados como SM, que está entre 10-40%.

### **3.5.1.3 ANALISIS GENERAL**

- Teniendo en cuenta que Popayán, se encuentra en una zona donde es factible la formación de suelos derivados de cenizas volcánicas y observando las características de las muestras analizadas, se puede afirmar que los suelos en estudio, corresponden a este tipo de suelos y por lo tanto, cuentan con propiedades muy particulares, debido a que cuentan con un nuevo componente denominado cementación, que influye enormemente en el comportamiento mecánico de éstos.
- Los porcentajes de saturación mensuales de las muestras son muy altas, por lo que podría deducirse que existe una posibilidad muy mínima de que su alta resistencia sea producto del aporte de la succión, por lo que se considera que, para los suelos en estudio, que se consideran como derivados de cenizas volcánicas, el aporte de la cementación a la resistencia al cortante es bastante alto.
- Los pesos unitarios secos de las muestras se encuentran entre  $9.98\text{KN/m}^3$  para la muestra de Ing. civil y  $8.63\text{KN/m}^3$ , para la muestra de la ladrillera, considerados relativamente bajos con relaciones de vacíos de 1.7 y 2.1, que se consideran altas. De igual forma los pesos unitarios secos máximos del ensayo proctor estándar son bajos, con valores de  $11,1\text{KN/m}^3$  para la muestra de Ing. civil y  $10.98\text{KN/m}^3$  para la muestra de la ladrillera, con contenidos de humedad de 48.5 % y 40% respectivamente. características propias de suelos derivados de cenizas volcánicas



- Los resultados del ensayo de CBR óptimo muestran que, con el incremento del número de golpes, el incremento de la resistencia es muy bajo y esto podría deberse principalmente a la pérdida gradual y deterioro de la estructura cementada, lo que podría ser un indicativo de que con un número de golpes mayor la resistencia podría disminuir.
- Las características de los suelos, y en especial, su plasticidad, indican que posiblemente la muestra de ingeniería civil presenta un estado más avanzado de meteorización, lo que indica que el aporte de la cementación en la resistencia deberá ser mayor al compararse con la muestra de la ladrillera.
- En los ensayos de compactación los dos tipos de suelo presentan una tendencia de compactación típica, un indicativo de que mediante el proceso de remoldeo y compactación, la estructura cementada deja de afectar de forma significativa y después de este proceso, los suelos analizados pierden la estructura cementada y cambian su comportamiento mecánico que finalmente llega a ser como el de un suelo con características similares y sin cementación.

## **4 . Resultados del modelo de la MEPDG**

### **4.1 Precipitación y temperatura media mensual**

Como se explica en el numeral, 2.5.1.1. Para el cálculo del índice, son necesarios los datos de precipitación mensual y temperatura media mensual del lugar de estudio. Para este caso, se trabajó con datos de dos estaciones meteorológicas; a) Estación ubicada en la facultad de ingeniería civil de la Universidad del Cauca (estación administrada por el Departamento de Hidráulica) y b) estación del IDEAM ubicada en el aeropuerto Guillermo Leon Valencia, además se incluye un análisis con el resultado de c) promedio de los datos de las dos estaciones.

**Tabla 22. Serie histórica de Temperatura media mensual [2007-2016] - Estación meteorológica Universidad del cauca.**

Valores mensuales de temperatura [°C]												
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2007	19.40	18.85	18.50	18.290	18.42	18.60	18.81	18.42	19.08	17.46	17.98	17.45
2008	17.87	17.63	17.57	18.05	17.99	18.06	17.96	17.86	18.48	17.61	17.75	17.68
2009	17.88	18.27	18.36	18.84	18.76	18.78	19.55	19.58	20.24	19.8	18.7	18.63
2010	19.36	19.64	19.81	19	19.45	18.38	17.99	18.67	18.01	18.06	17.3	17.3
2011	18.03	17.92	17.88	17.92	18.82	18.66	18.47	18.99	18.91	17.56	18.48	17.75
2012	17.78	17.79	18.55	18.17	18.63	19.26	19.59	23.79	20.85	18.29	18.34	18.13
2013	19.18	18.26	18.93	19	17.96	18.88	18.9	18.83	19.06	18.36	17.82	18.18
2014	18.429	18.454	18.453	19.107	18.619	19.183	20.086	19.241	19.064	18.721	18.193	18.425
2015	19.130	19.662	18.688	19.172	19.640	19.938	20.060	20.786	20.567	19.462	18.955	20.524
2016	19.752	20.430	19.672	19.466	19.526	19.206	19.187	20.269	19.175	18.603	18.456	17.856
Valores medios	18.681	18.691	18.641	18.702	18.782	18.895	19.060	19.644	19.344	18.393	18.197	18.192
Valores mínimos	19.752	20.430	19.810	19.466	19.640	19.938	20.086	23.790	20.850	19.800	18.955	20.524
Valores máximos	17.780	17.630	17.570	17.920	17.960	18.060	17.960	17.860	18.010	17.460	17.300	17.300

**Tabla 23: Serie histórica de precipitación mensual [2007-2016] - Estación meteorológica Universidad del cauca.**

Valores mensuales de Precipitación [mm]												
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2007	106.14	113.77	151.24	311.09	260.93	34.50	88.36	31.19	33.51	53.39	130.01	351.66
2008	345.58	216.58	192.14	182.49	219.06	119.28	97.73	150.02	106.85	299.60	461.37	320.66
2009	258.45	76.13	247.78	132.27	179.23	50.76	26.9	20.29	31.48	205.94	241.43	240.21
2010	32.73	65.18	3.53	126.61	136.27	122.33	128.92	72.1	86.32	230.27	328.71	192.36
2011	137.56	262.74	226.61	211.44	185.55	69.01	89.38	38.58	37.03	278.78	239.7	373.44
2012	324.16	172.09	101.78	238.88	52.01	38.33	1.26	1.01	7.62	245.98	255.93	134.53
2013	108.67	85.01	123.38	111.7	164.71	37.8	19.78	48.98	98.53	145.45	321.21	313.6
2014	223.9	259.77	303.15	111.66	159.49	44.62	3.56	13.43	80.73	210.22	436.97	317.38
2015	86.57	105.14	200.32	153.11	52.03	14.7	17.5	0.51	18.77	107.38	113.63	16
2016	178.27	85.54	124.4	235.37	193.96	28.91	23.61	5.07	110.72	313.36	200.08	258.69
Valores medios	180.203	144.195	167.433	181.462	160.324	56.024	49.700	38.118	61.156	209.037	272.904	251.853
Valores mínimos	345.580	262.740	303.150	311.090	260.930	122.330	128.920	150.020	110.720	313.360	461.370	373.440
Valores máximos	32.730	65.180	3.530	111.660	52.010	14.700	1.260	0.510	7.620	53.390	113.630	16.000

**Tabla 24: Serie histórica de Temperatura media mensual [2007-2015]- -Estación meteorológica del aeropuerto Guillermo Leon Valencia**

Valores mensuales de temperatura [°C]												
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2007	20.47	19.59	19.58	19.15	19.28	19.87	9.85	15.39	20.01	18.3	18.91	18.3
2008	18.96	18.73	18.8	18.92	19.12	18.93	18.63	18.74	19.34	18.26	18.68	18.77
2009		18.72	19.24	19.49	19.49	19.59	20.07	20.09	20.84	20.03	19.8	19.46
2010	20.21	20	20.58	19.45	20.23	19.07	18.55	19.07	18.58	18.62	18.04	18.12
2011	18.89	18.19	18.76	18.63	19.5	19.29	19.34	19.62	19.56	18.34	18.79	18.69
2012	18.69	18.66	19.38	19.08	19.52	19.99	20.11	20.24	20.36	19.17	19.21	19.01
2013	20.38	18.36	18.6	20.04	18.8	19.87	20.12			19.34	18.84	19.24
2014	19.5	18.58	19.48	20.1	19.46	19.97	20.89	19.91	19.69	19.62	19.24	19.57
2015	19.57	19.65	19.37	19.37	20.02	20.26						
<b>Valores medios</b>	19.584	18.942	19.310	19.359	19.491	19.649	18.445	19.009	19.769	18.960	18.939	18.895
<b>Valores mínimos</b>	20.470	20.000	20.580	20.100	20.230	20.260	20.890	20.240	20.840	20.030	19.800	19.570
<b>Valores máximos</b>	18.690	18.190	18.600	18.630	18.800	18.930	9.850	15.390	18.580	18.260	18.040	18.120

**Tabla 25: Serie histórica de precipitación mensual I [2007-2015]- Estación- Estación meteorológica del aeropuerto Guillermo Leon Valencia**

Valores mensuales de Precipitación [mm]												
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2007	107.4	151.4	183.1	300.3	290.5	34.7	26.2	43	35.6	431.6	402.5	374.2
2008	385.5	219.9	221.9	204.1	210.3	129.1	79.5	206.5	101.9	421.4	454.6	298.7
2009	17.5	94	260.1	122.5	230.8	80.2	35.7	29.1	50.4	241.6	241.6	391.4
2010	42.8	150.7	25.5	227.7	138.6	144.9	145.5	80.8	105.3	338.9	299.5	224.9
2011	191.8	419.5	381.6	235.4	239.5	84.1	0	0	0	309.1	483.8	397.1
2012	372.1	200.8	128.3	250.2	79.9	56.9	4.7	43.2	9.1	360.3	314.5	178
2013	187.9	114.2	147.6	136.3	233.4	46.4	28.4	50.8	110.3	172.2	315.1	372.7
2014	262.2	329.1	410.8	146.6	175.8	43.8	8.2	19.8	95.8	276.6	362.2	340.4
2015	111.3	242	220.1	171.2	102.9							
<b>Valores medios</b>	186.500	213.511	219.889	199.367	189.078	77.513	41.025	59.150	63.550	318.963	359.225	322.175
<b>Valores mínimos</b>	385.500	419.500	410.800	300.300	290.500	144.900	145.500	206.500	110.300	431.600	483.800	397.100
<b>Valores máximos</b>	17.500	94.000	25.500	122.500	79.900	34.700	0.000	0.000	0.000	172.200	241.600	178.000

**meteorológica Universidad del Cauca y aeropuerto Guillermo Leon Valencia**

	Temperatura [°C]											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
<b>Universidad del Cauca</b>	18.681	18.691	18.641	18.702	18.782	18.895	19.060	19.644	19.344	18.393	18.197	18.192
<b>Aeropuerto GLV</b>	19.584	18.942	19.310	19.359	19.491	19.649	18.445	19.009	19.769	18.960	18.939	18.895
<b>Promedio</b>	19.132	18.816	18.976	19.030	19.136	19.272	18.753	19.326	19.556	18.676	18.568	18.544

**Tabla 26: Valores promedio de precipitación mensual - Estación meteorológica Universidad del Cauca y aeropuerto Guillermo Leon Valencia**

	Precipitación [mm]											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
<b>Universidad del Cauca</b>	180.203	144.195	167.433	181.462	160.324	56.024	49.700	38.118	61.156	209.037	272.904	251.853
<b>Aeropuerto GLV</b>	186.500	213.511	219.889	199.367	189.078	77.513	41.025	59.150	63.550	318.963	359.225	322.175
<b>Promedio</b>	183.352	178.853	193.661	190.414	174.701	66.768	45.363	48.634	62.353	264.000	316.065	287.014

## 4.2 . Índice climático -INDICE DE HUMEDAD THORNTHWAITE

### 4.2.1 Determinación de la evapotranspiración potencial “ETP”.

**Tabla 27: Índice de calor mensual “i” y anual “I”-**

Mes	Serie histórica Universidad del Cauca		Serie histórica Aeropuerto Guillermo Leon Valencia		Promedio Series Históricas	
	T [°C]	i mensual	T [°C]	i mensual	T [°C]	i mensual
Enero	18.681	7.356	19.584	7.901	19.132	7.627
Febrero	18.691	7.362	18.942	7.513	18.816	7.437
Marzo	18.641	7.333	19.310	7.735	18.976	7.533
Abril	18.702	7.369	19.359	7.764	19.030	7.565
Mayo	18.782	7.416	19.491	7.845	19.136	7.629
Junio	18.895	7.484	19.649	7.941	19.272	7.711
Julio	19.060	7.584	18.445	7.216	18.753	7.399
Agosto	19.644	7.938	19.009	7.552	19.326	7.744
Septiembre	19.344	7.755	19.769	8.014	19.556	7.884
Octubre	18.393	7.185	18.960	7.523	18.676	7.353
Noviembre	18.197	7.070	18.939	7.511	18.568	7.289
Diciembre	18.192	7.067	18.895	7.484	18.544	7.275
<b>I</b>	$\sum$	88.918	$\sum$	91.999	$\sum$	90.448

**Tabla 28: ETP sin corregir – Series históricas [2006-2017]**

Mes	Serie histórica Universidad del Cauca		Serie histórica Aeropuerto Guillermo Leon Valencia		Promedio Series Históricas	
	T [°C]	ETP sin corregir [mm/mes]	T [°C]	ETP sin corregir [mm/mes]	T [°C]	ETP sin corregir [mm/mes]
Enero	18.681	68.092	19.584	73.280	19.132	70.634
Febrero	18.691	68.159	18.942	68.525	18.816	68.340
Marzo	18.641	67.809	19.310	71.231	18.976	69.491
Abril	18.702	68.237	19.359	71.595	19.030	69.888
Mayo	18.782	68.808	19.491	72.584	19.136	70.663
Junio	18.895	69.619	19.649	73.772	19.272	71.657
Julio	19.060	70.815	18.445	64.951	18.753	67.882
Agosto	19.644	75.104	19.009	69.010	19.326	72.058
Septiembre	19.344	72.882	19.769	74.680	19.556	73.768
Octubre	18.393	66.055	18.960	68.655	18.676	67.335
Noviembre	18.197	64.695	18.939	68.500	18.568	66.564
Diciembre	18.192	64.661	18.895	68.182	18.544	66.392
<b>I</b>						
<b>a</b>		1.951		2.014		1.982

**Tabla 29: Ubicación estaciones meteorológicas.**

	<b>E. meteorológica Universidad del Cauca</b>	<b>E. meteorológica Aeropuerto Guillermo Leon Valencia</b>
<b>LATITUD</b>	2° 26' 49" N	2° 27' 10.4004" N
<b>LONGITUD:</b>	76° 35' 49" W	76° 36' 31.5" W
<b>ALTITUD:</b>	1750 msnm	1752msnm

**Tabla 30: Valores de Número de horas de sol "N" - Tabulados**

<b>Mes</b>	<b>E. meteorológica Universidad del Cauca</b>	<b>E. meteorológica Aeropuerto Guillermo Leon Valencia</b>	<b>Promedio</b>
<b>Ene</b>	11.878	11.877	11.878
<b>Feb</b>	11.900	11.900	11.900
<b>Mar</b>	12.000	12.000	12.000
<b>Abr</b>	12.022	12.023	12.022
<b>May</b>	12.122	12.123	12.122
<b>Jun</b>	12.122	12.123	12.122
<b>Jul</b>	12.122	12.123	12.122
<b>Ago</b>	12.100	12.100	12.100
<b>Sep</b>	12.000	12.000	12.000
<b>Oct</b>	11.978	11.977	11.978
<b>Nov</b>	11.878	11.877	11.878
<b>Dic</b>	11.878	11.877	11.878

**Tabla 31: ETP corregida mensual- Estación Meteorológica Universidad del Cauca**

Mes	ETP sin corregir [mm/mes]	Nº Horas de luz	Días del mes	ETP corregida [mm/mes]
<b>Enero</b>	68.092	11.878	31	69.644
<b>Febrero</b>	68.159	11.900	28	63.085
<b>Marzo</b>	67.809	12.000	31	70.070
<b>Abril</b>	68.237	12.022	30	68.364
<b>Mayo</b>	68.808	12.122	31	71.827
<b>Junio</b>	69.619	12.122	30	70.329
<b>Julio</b>	70.815	12.122	31	73.921
<b>Agosto</b>	75.104	12.100	31	78.254
<b>Septiembre</b>	72.882	12.000	30	72.882
<b>Octubre</b>	66.055	11.978	31	68.130
<b>Noviembre</b>	64.695	11.878	30	64.035
<b>Diciembre</b>	64.661	11.878	31	66.135
			<b>ETP Corregida Anual</b>	836.678

**Tabla 32: ETP corregida mensual- Estación Meteorológica Aeropuerto Guillermo Leon Valencia**

Mes	ETP sin corregir [mm/mes]	Nº Horas de luz	Días del mes	ETP corregida [mm/mes]
<b>Enero</b>	73.280	11.877	31	74.949
<b>Febrero</b>	68.525	11.900	28	63.424
<b>Marzo</b>	71.231	12.000	31	73.606
<b>Abril</b>	71.595	12.023	30	71.730
<b>Mayo</b>	72.584	12.123	31	75.770
<b>Junio</b>	73.772	12.123	30	74.526
<b>Julio</b>	64.951	12.123	31	67.802
<b>Agosto</b>	69.010	12.100	31	71.904
<b>Septiembre</b>	74.680	12.000	30	74.680
<b>Octubre</b>	68.655	11.977	31	70.810
<b>Noviembre</b>	68.500	11.877	30	67.800
<b>Diciembre</b>	68.182	11.877	31	69.734
			<b>ETP Corregida Anual</b>	856.734



**Tabla 33: ETP corregida mensual- Promedio Estaciones Meteorológicas Universidad del Cauca y Aeropuerto Guillermo Leon Valencia**

Mes	ETP sin corregir [mm/mes]	N° Horas de luz	Días del mes	ETP corregida [mm/mes]
<b>Enero</b>	70.634	11.878	31	72.243
<b>Febrero</b>	68.340	11.900	28	63.253
<b>Marzo</b>	69.491	12.000	31	71.808
<b>Abril</b>	69.888	12.022	30	70.019
<b>Mayo</b>	70.663	12.122	31	73.763
<b>Junio</b>	71.657	12.122	30	72.389
<b>Julio</b>	67.882	12.122	31	70.861
<b>Agosto</b>	72.058	12.100	31	75.081
<b>Septiembre</b>	73.768	12.000	30	73.768
<b>Octubre</b>	67.335	11.978	31	69.449
<b>Noviembre</b>	66.564	11.878	30	65.885
<b>Diciembre</b>	66.392	11.878	31	67.904
			<b>ETP Corregida Anual</b>	846.423

**Tabla 34: Cuadro comparativo ETP corregida.**

	E. meteorológica Universidad del Cauca	E. meteorológica Aeropuerto Guillermo Leon Valencia	Promedio
Mes	ETP corregida [mm/mes]		
<b>Ene</b>	69.644	74.949	72.243
<b>Feb</b>	63.085	63.424	63.253
<b>Mar</b>	70.070	73.606	71.808
<b>Abr</b>	68.364	71.730	70.019
<b>May</b>	71.827	75.770	73.763
<b>Jun</b>	70.329	74.526	72.389
<b>Jul</b>	73.921	67.802	70.861
<b>Ago</b>	78.254	71.904	75.081
<b>Sep</b>	72.882	74.680	73.768
<b>Oct</b>	68.130	70.810	69.449
<b>Nov</b>	64.035	67.800	65.885
<b>Dic</b>	66.135	69.734	67.904
<b>ETP Corregida Anual</b>	836.678	856.734	846.423

#### 4.2.2 Determinación de almacenamiento, déficit o escorrentía mediante el Balance hídrico.

Teniendo en cuenta que se desconoce el almacenamiento inicial del suelo, este se obtiene mediante un proceso de iteración y Como suposición inicial se consideran los datos que se presentan en la Tabla 35, “ El almacenamiento máximo se toma como 100mm (100L/m<sup>2</sup>), como referencia climática, y de esta forma el balance hídrico sirve para comparaciones en distintas zonas independientemente del suelo y la vegetación” (Gonzales, 2008)

**Tabla 35: Datos iniciales para el balance hídrico.**

<b>Almacenamiento inicial (Ai-1)</b>	0	mm
<b>Almacenamiento inicial (Amax)</b>	100	mm

**Tabla 36: Balance hídrico inicial- Serie histórica Estación meteorológica Universidad del Cauca**

Mes	ETP corregida [mm/mes]	Precipitación mensual [mm/mes]	Almacenamiento [mm/mes]	Exceso [mm/mes]	Déficit [mm/mes]
<b>Ai-1 (Semilla)</b>			0		
<b>Ene</b>	69.644	180.203	100	10.559	0
<b>Feb</b>	63.085	144.195	100	81.110	0
<b>Mar</b>	70.070	167.433	100	97.363	0
<b>Abr</b>	68.364	181.462	100	113.098	0
<b>May</b>	71.827	160.324	100	88.497	0
<b>Jun</b>	70.329	56.024	86	0	0
<b>Jul</b>	73.921	49.700	61	0	0
<b>Ago</b>	78.254	38.118	21	0	0
<b>Sep</b>	72.882	61.156	10	0	0
<b>Oct</b>	68.130	209.037	100	50.518	0
<b>Nov</b>	64.035	272.904	100	208.869	0
<b>Dic</b>	66.135	251.853	100	185.718	0
<b>Datos anuales</b>	836.678			835.731	0

Como es posible observar en la Tabla 36. el almacenamiento  $A_{i-1}$ , Correspondiente al mes de diciembre, debido a que el ciclo para el balance hídrico comienza a partir del mes de enero, no coincide con el supuesto por lo cual se concluye que la suposición es falsa y el valor de  $A_{i-1}$ , debe cambiarse hasta que éste sea igual al almacenamiento del mes de diciembre.

Se Supone un almacenamiento inicial de 100mm, y se vuelve a hacer el mismo ciclo obtenido los datos de la Tabla 37.

El mismo procedimiento se ejecuta para los datos de la estación meteorológica del aeropuerto Guillermo Leon Valencia y para los datos promedios de las dos estaciones y se obtienen los resultados de la Tabla 40

**Tabla 37: Balance hídrico 2- Serie histórica Estación meteorológica Universidad del Cauca**

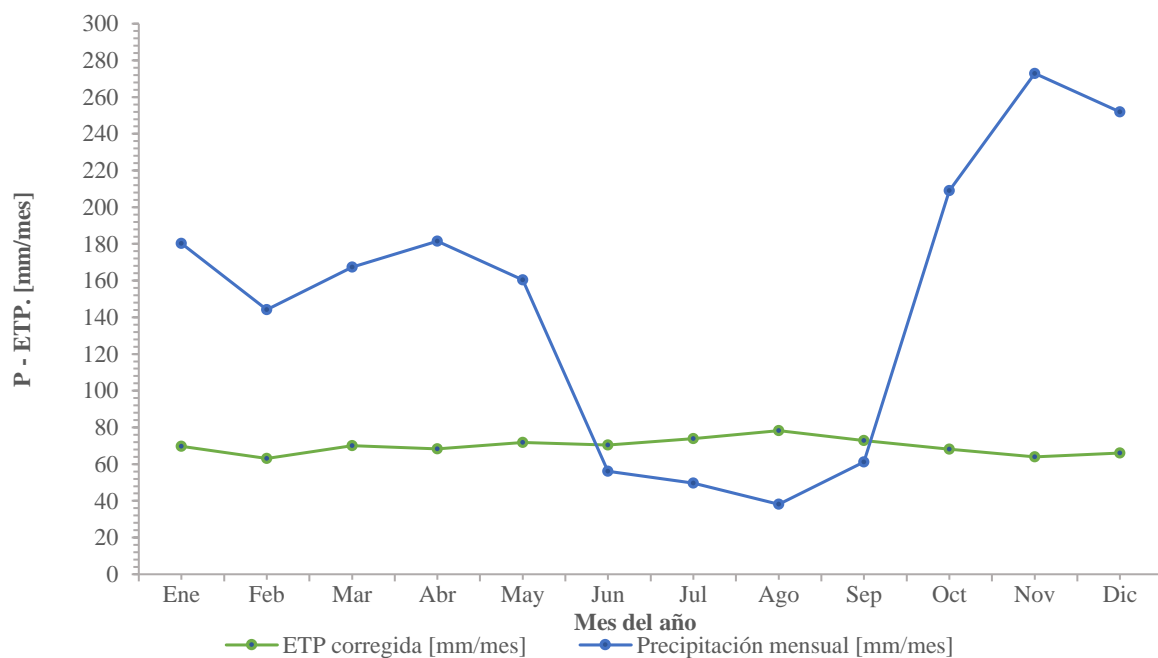
Mes	ETP corregida [mm/mes]	Precipitación mensual [mm/mes]	Almacenamiento [mm/mes]	Exceso [mm/mes]	Déficit [mm/mes]
Ai-1 (Semilla)			100		
Ene	69.644	180.203	100	110.559	0
Feb	63.085	144.195	100	81.110	0
Mar	70.070	167.433	100	97.363	0
Abr	68.364	181.462	100	113.098	0
May	71.827	160.324	100	88.497	0
Jun	70.329	56.024	86	0	0
Jul	73.921	49.700	61	0	0
Ago	78.254	38.118	21	0	0
Sep	72.882	61.156	10	0	0
Oct	68.130	209.037	100	50.518	0
Nov	64.035	272.904	100	208.869	0
Dic	66.135	251.853	100	185.718	0
Datos anuales	836.678			935.731	0

**Tabla 38: Balance hídrico - Estación meteorológica Aeropuerto Guillermo Leon Valencia**

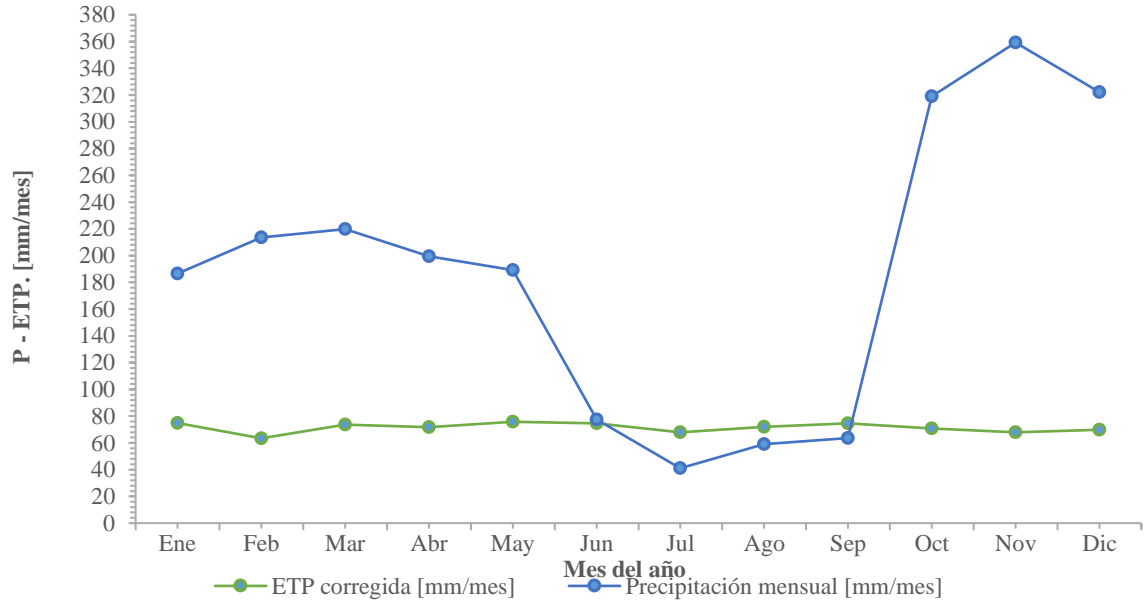
Mes	ETP corregida [mm/mes]	Precipitación mensual [mm/mes]	Almacenamiento [mm/mes]	Exceso [mm/mes]	Déficit [mm/mes]
Ai-1 (Semilla)			100		
Ene	74.949	186.500	100	111.551	0
Feb	63.424	213.511	100	150.087	0
Mar	73.606	219.889	100	146.283	0
Abr	71.730	199.367	100	127.636	0
May	75.770	189.078	100	113.308	0
Jun	74.526	77.513	100	2.987	0
Jul	67.802	41.025	73	0	0
Ago	71.904	59.150	60	0	0
Sep	74.680	63.550	49	0	0
Oct	70.810	318.963	100	197.492	0
Nov	67.800	359.225	100	291.425	0
Dic	69.734	322.175	100	252.441	0
Datos anuales	856.734			1393.211	0

**Tabla 39: Balance hídrico – Promedio Estaciones meteorológica Universidad del Cauca y Aeropuerto Guillermo Leon Valencia**

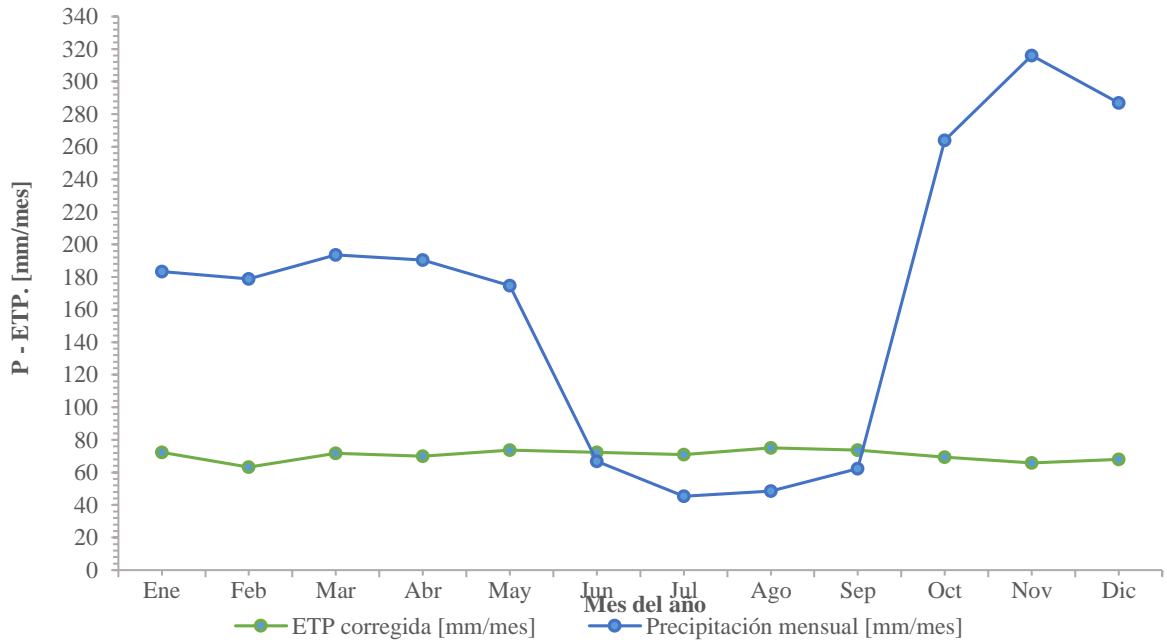
Mes	ETP corregida [mm/mes]	Precipitación mensual [mm/mes]	Almacenamiento [mm/mes]	Exceso [mm/mes]	Déficit [mm/mes]
Ai-1 (Semilla)			100		
Ene	72.243	183.352	100	111.108	0
Feb	63.253	178.853	100	115.600	0
Mar	71.808	193.661	100	121.853	0
Abr	70.019	190.414	100	120.395	0
May	73.763	174.701	100	100.938	0
Jun	72.389	66.768	94	0	0
Jul	70.861	45.363	69	0	0
Ago	75.081	48.634	42	0	0
Sep	73.768	62.353	31	0	0
Oct	69.449	264.000	100	125.570	0
Nov	65.885	316.065	100	250.180	0
Dic	67.904	287.014	100	219.110	0
Datos anuales	846.423			1164.754	0



**Figura 46: Variación de Precipitación, P, y evapotranspiración ETP, en el año- Estación meteorológica Universidad del Cauca**



**Figura 47: Variación de Precipitación, P, y evapotranspiración ETP, en el año- Serie histórica Estación meteorológica Aeropuerto Guillermo León Valencia**



**Figura 48: Variación de Precipitación, P, y evapotranspiración ETP, en el año- Promedio Series históricas**

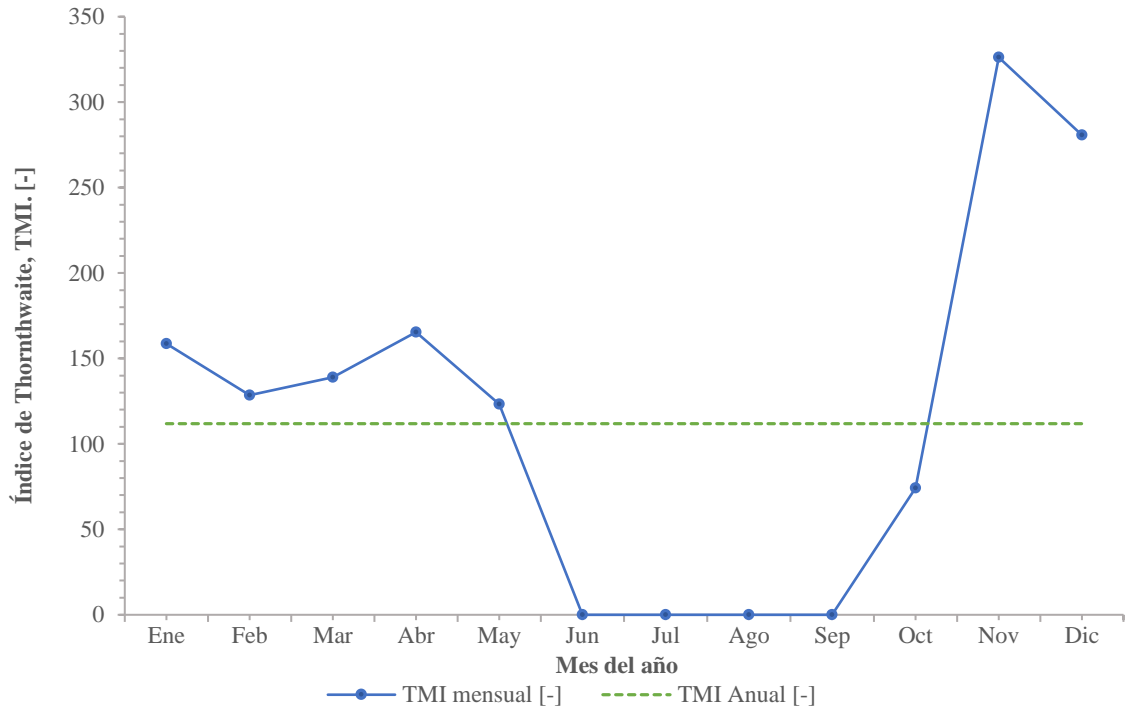
### 4.2.3 Determinación del TMI.

**Tabla 40: Índice de humedad “Ih” e índice de Aridez “Ia”.**

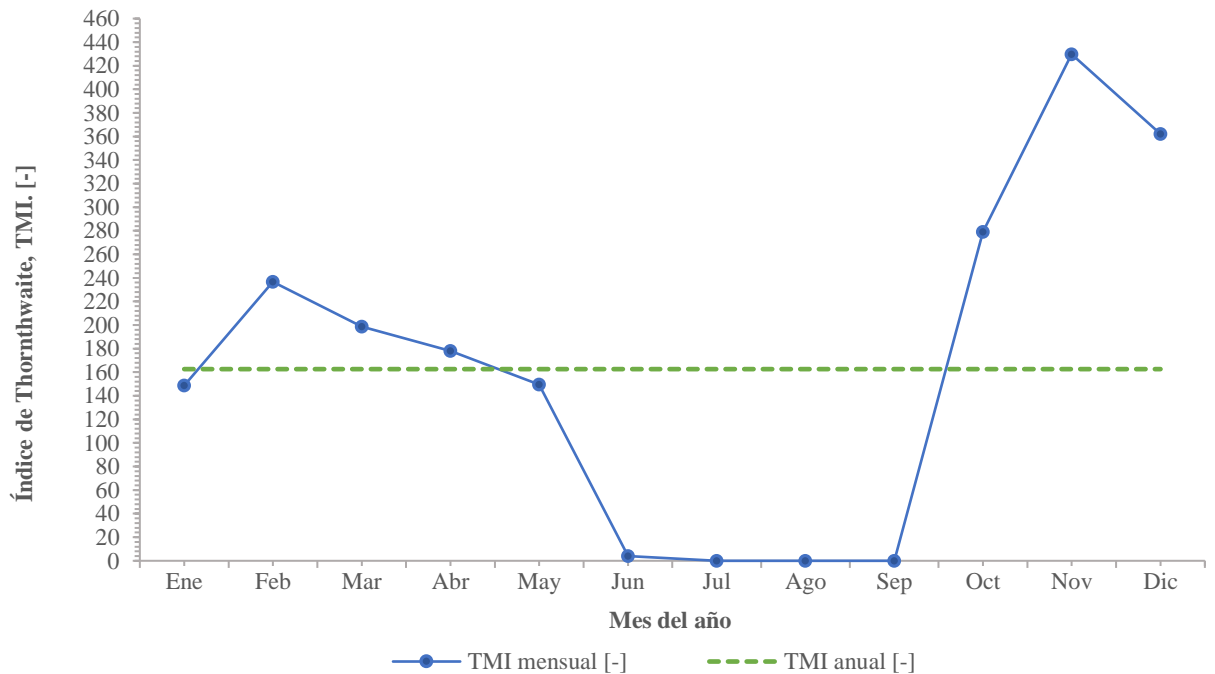
	Serie histórica Universidad del Cauca		Serie histórica Aeropuerto Guillermo Leon Valencia		Promedio Series Históricas	
	Ih	Ia	Ih	Ia	Ih	Ia
<b>Ene</b>	158.747	0	148.837	0	153.797	0
<b>Feb</b>	128.571	0	236.641	0	182.760	0
<b>Mar</b>	138.952	0	198.738	0	169.693	0
<b>Abr</b>	165.433	0	177.939	0	171.947	0
<b>May</b>	123.210	0	149.543	0	136.840	0
<b>Jun</b>	0.000	0	4.008	0	0.000	0
<b>Jul</b>	0.000	0	0.000	0	0.000	0
<b>Ago</b>	0.000	0	0.000	0	0.000	0
<b>Sep</b>	0.000	0	0.000	0	0.000	0
<b>Oct</b>	74.149	0	278.906	0	180.808	0
<b>Nov</b>	326.177	0	429.831	0	379.723	0
<b>Dic</b>	280.816	0	362.003	0	322.674	0
<b>Datos anuales</b>	111.839	0	162.619	0	137.609	0

**Tabla 41: Índice de Thornthwaite “TMI”.**

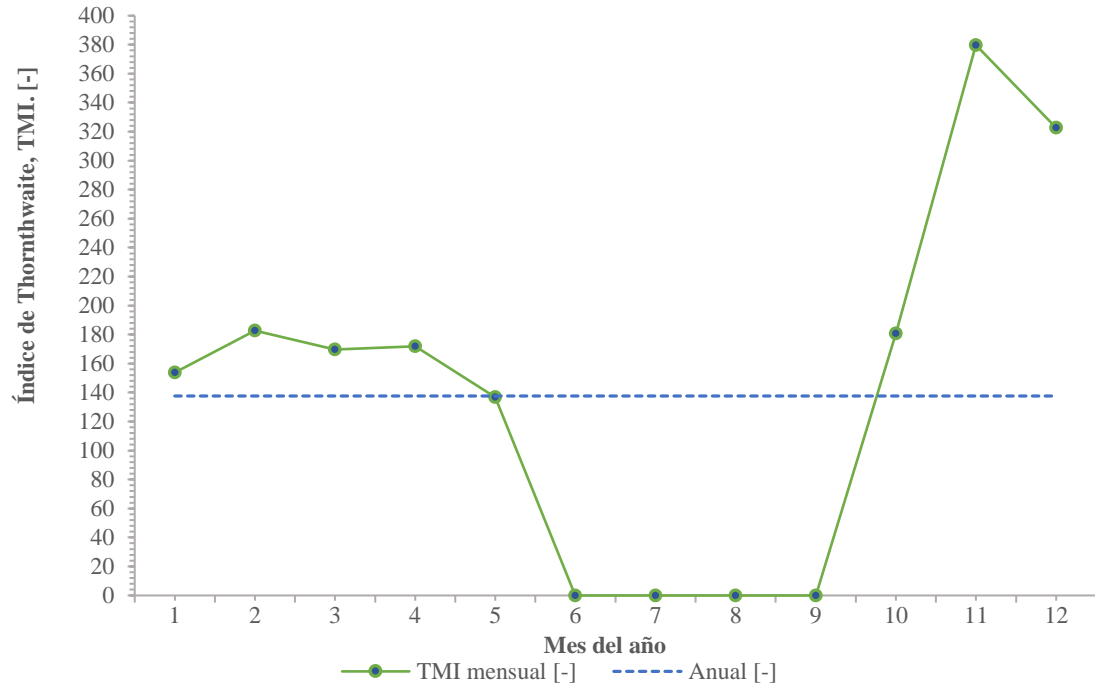
	Serie histórica Universidad del Cauca	Serie histórica Aeropuerto Guillermo Leon Valencia	Promedio Series Históricas
	TMI mensual [-]		
<b>Ene</b>	158.747	148.837	153.797
<b>Feb</b>	128.571	236.641	182.760
<b>Mar</b>	138.952	198.738	169.693
<b>Abr</b>	165.433	177.939	171.947
<b>May</b>	123.210	149.543	136.840
<b>Jun</b>	0.000	4.008	0.000
<b>Jul</b>	0.000	0.000	0.000
<b>Ago</b>	0.000	0.000	0.000
<b>Sep</b>	0.000	0.000	0.000
<b>Oct</b>	74.149	278.906	180.808
<b>Nov</b>	326.177	429.831	379.723
<b>Dic</b>	280.816	362.003	322.674
<b>Anual</b>	111.839	162.619	137.609



**Figura 49: Variación del TMI en el año-Serie Histórica Estación meteorológica Universidad del Cauca**



**Figura 50: Variación del TMI en el año-Serie histórica Estación meteorológica Aeropuerto Guillermo Leon Valencia**



**Figura 51: Variación del TMI en el año-Promedio Series históricas**

#### 4.3 Estimación de la succión mensual en términos del ÍNDICE DE THORNTHWAITE, en suelos considerados como plásticos ( $(P_{200} \geq 10\%$ ó $wPI \geq 2.0)$ )

**Tabla 42: Constantes de regresión para TMI- $P_{200}$ /WPIModel.**

P200 O WPI	$\alpha$	$\beta$	$\Upsilon$	$\delta$	$R^2$
<b>P200 =10</b>	0.3	419.07	133.45	15	>0.99
<b>P200 =50/ Wpi= 0.5 o menos</b>	0.3	521.5	137.3	16	>0.99
<b>wPI=5</b>	0.3	663.5	142.5	17.5	>0.99
<b>wPI=10</b>	0.3	801	147.6	25	>0.99
<b>wPI=20</b>	0.3	975	152.5	32	>0.99
<b>wPI=50</b>	0.3	1171.2	157.5	27.8	>0.99

La determinación de las constantes consiste en un proceso de interpolación lineal entre los límites que se encuentren Los parámetros de cada muestra tal y como se indica en la Tabla 43.



**Tabla 43: Iteración lineal Constantes de regresión para TMI-P<sub>200</sub>/WPIModelo de las Muestras**

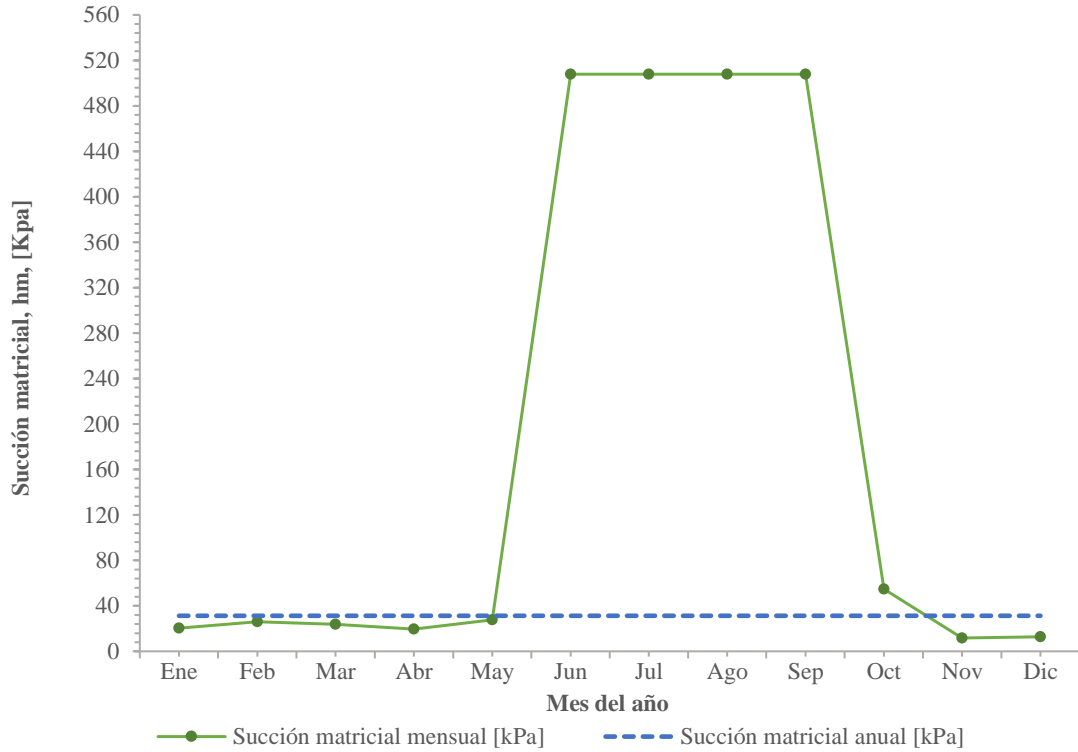
		ing civil	la ladrillera	ing civil	la ladrillera
$\beta$	lim inferior	975	801	1166.4912	835.104
	lim superior	1171.2	975		
$\Upsilon$	lim inferior	147.6	147.6	157.2624	148.5604
	lim superior	157.5	152.5		
$\delta$	lim inferior	32	25	27.9008	26.372
	lim superior	27.8	32		

**Tabla 44: Constantes de regresión para TMI-P<sub>200</sub>/WPIModelo de las Muestras**

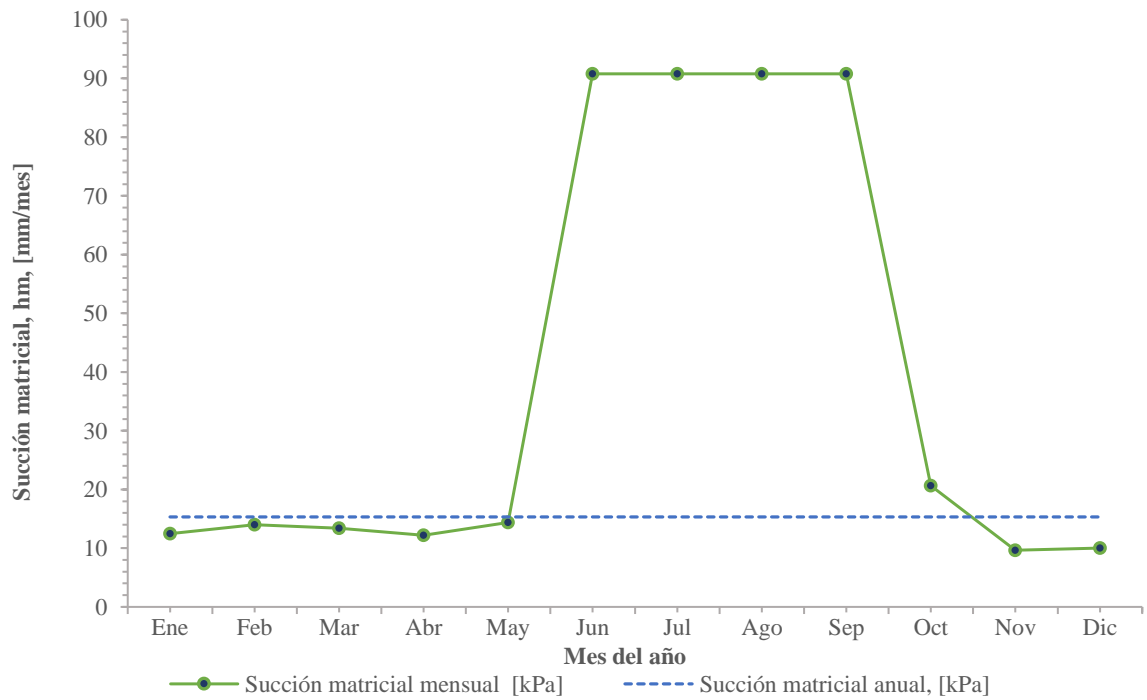
Muestra	Muestra Ingeniería civil	Muestra de La ladrillera
<b>P<sub>200</sub></b>	88	46
<b>Ip</b>	56	26
<b>Wpi</b>	49.28	11.96
<b><math>\alpha</math></b>	0.3	0.3
<b><math>\beta</math></b>	1166.4912	835.104
<b><math>\Upsilon</math></b>	157.2624	148.5604
<b><math>\delta</math></b>	27.9008	26.372

**Tabla 45: Succión Matricial Serie histórica estación meteorológica Universidad del Cauca**

Muestra	TMI [-]	Succion Matricial hm [Kpa]	
		Muestra Ingeniería civil	Muestra de La ladrillera
<b>Ene</b>	158.747	20	12
<b>Feb</b>	128.571	26	14
<b>Mar</b>	138.952	24	13
<b>Abr</b>	165.433	20	12
<b>May</b>	123.210	28	14
<b>Jun</b>	0	508	91
<b>Jul</b>	0	508	91
<b>Ago</b>	0	508	91
<b>Sep</b>	0	508	91
<b>Oct</b>	74.149	55	21
<b>Nov</b>	326.177	12	10
<b>Dic</b>	280.816	13	10
<b>Anual</b>	111.839	31	15



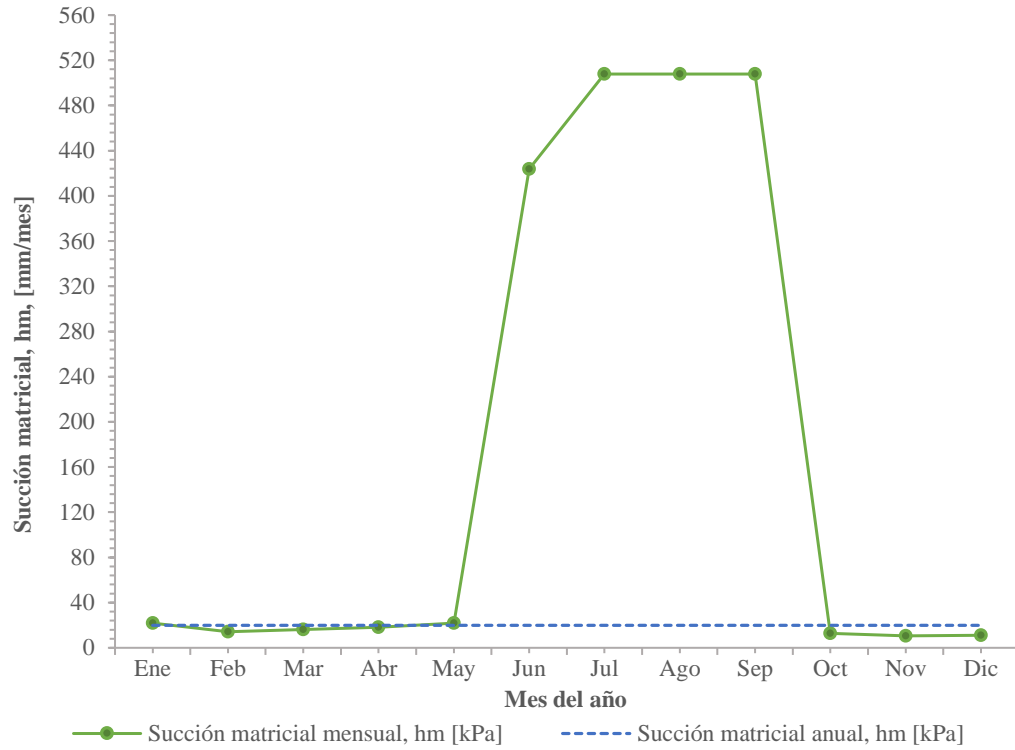
**Figura 52: Succión Matricial mensual Muestra Ing. Civil -Serie histórica estación meteorológica Universidad del Cauca**



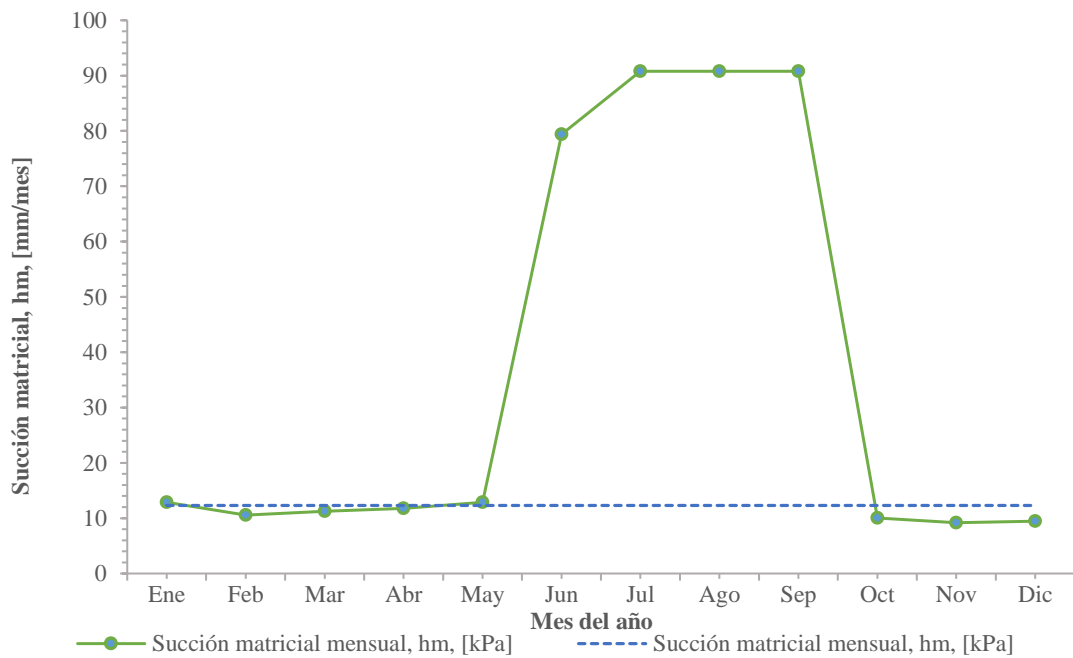
**Figura 53: Succión Matricial mensual Muestra La ladrillera -Serie histórica estación meteorológica Universidad del Cauca**

**Tabla 46: Succión Matricial serie histórica Estación meteorológica Aeropuerto Guillermo Leon Valencia**

Muestra	TMI [-]	Succion Matricial hm [Kpa]	
		Muestra Ingenieria civil	Muestra de La ladrillera
<b>Ene</b>	148.837	22	13
<b>Feb</b>	236.641	14	11
<b>Mar</b>	198.738	16	11
<b>Abr</b>	177.939	18	12
<b>May</b>	149.543	22	13
<b>Jun</b>	4.008	424	79
<b>Jul</b>	0.000	508	91
<b>Ago</b>	0.000	508	91
<b>Sep</b>	0.000	508	91
<b>Oct</b>	278.906	13	10
<b>Nov</b>	429.831	11	9
<b>Dic</b>	362.003	11	9
<b>Anual</b>	162.619	20	12



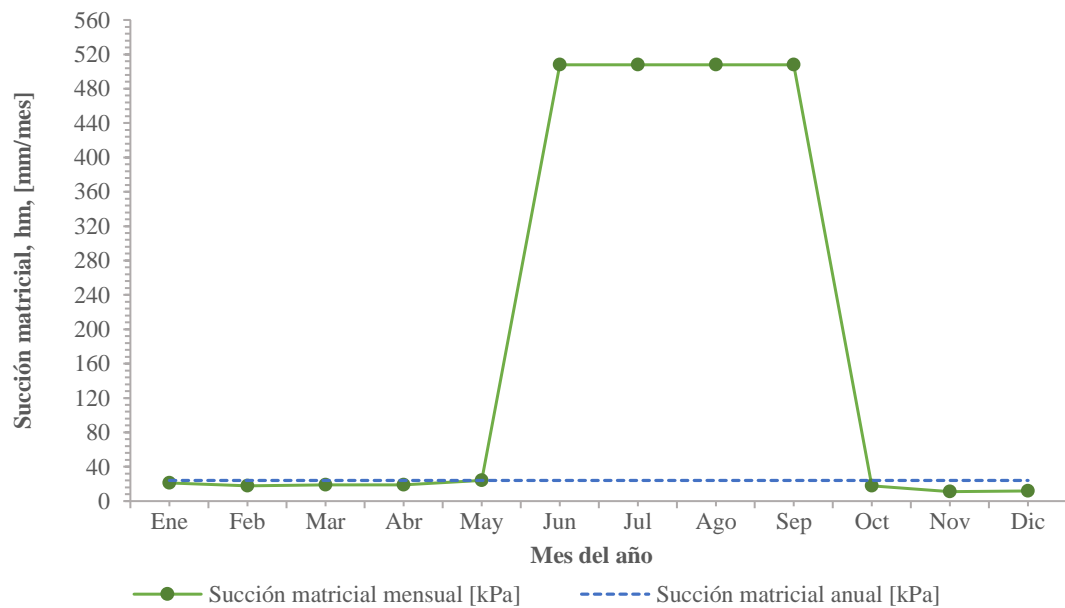
**Figura 54: Succión Matricial mensual Muestra Ing. Civil -Serie histórica estación meteorológica Aeropuerto Guillermo Leon Valencia**



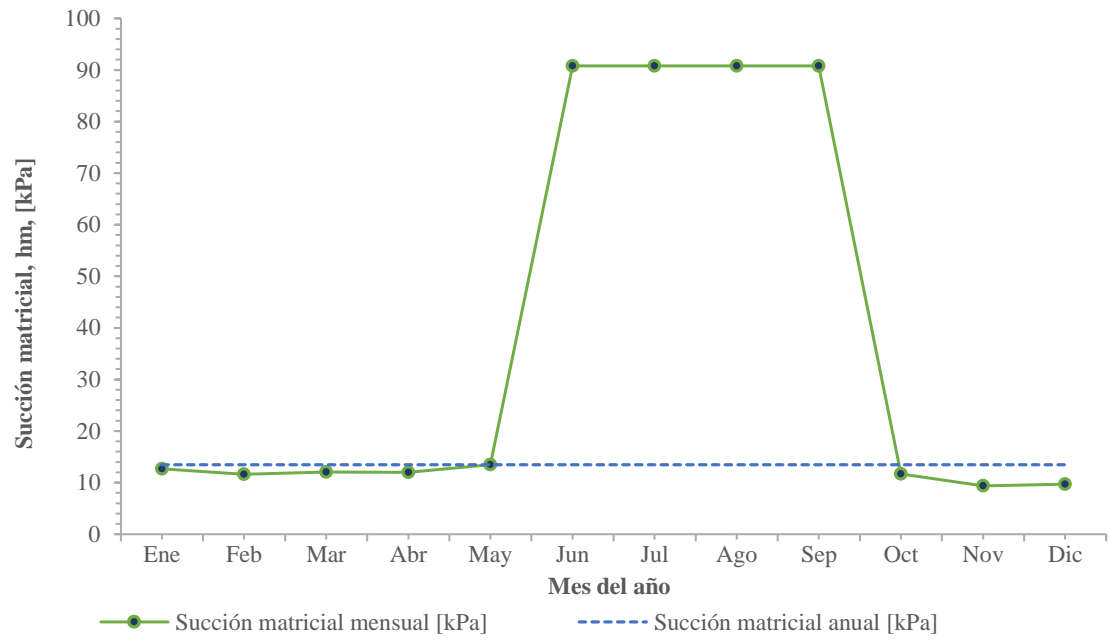
**Figura 55: Succión Matricial mensual Muestra La Ladrillera -Serie histórica estación meteorológica Aeropuerto Guillermo Leon Valencia**

**Tabla 47: Succión Matricial Promedio series históricas Estación meteorológica Universidad del Cauca y Aeropuerto Guillermo Leon Valencia**

Muestra	TMI [-]	Succion Matricial hm [Kpa]	
		Muestra Ingenieria civil	Muestra de La ladrillera
<b>Ene</b>	153.797	21	13
<b>Feb</b>	182.760	18	12
<b>Mar</b>	169.693	19	12
<b>Abr</b>	171.947	19	12
<b>May</b>	136.840	24	14
<b>Jun</b>	0.000	508	91
<b>Jul</b>	0.000	508	91
<b>Ago</b>	0.000	508	91
<b>Sep</b>	0.000	508	91
<b>Oct</b>	180.808	18	12
<b>Nov</b>	379.723	11	9
<b>Dic</b>	322.674	12	10
<b>Anual</b>	137.609	24	13



**Figura 56: Succión Matricial mensual Muestra de Ing. Civil - Promedio Series históricas**



**Figura 57: Succión Matricial mensual Muestra La Ladrillera -Promedio Series histórica**

#### 4.4 Determinación de la SWCC, teniendo en cuenta el nivel de diseño según la guía de diseño de pavimentos empírico mecanicista (MEPDG)

##### 4.4.1 Determinación de SWCC para nivel 2.

**Tabla 48: Parámetros de los materiales compactados [ $\theta_{sat}$ ,  $S_{opt}$ ,  $\theta_{sat}$ ].**

Paso	Ensayo	Parámetros	Muestra de Ing. civil	Muestra de la ladrillera
1	Proctor estándar	$\gamma d_{max}$	1.12	1.138
		$\%W_{opt}$	48.5	40
2	Gs medida	$G_s$	2.756	2.698
3	Granulometría	%Pasa N°200	88	46
	IP	%W	56	29
4	Contenido de agua volumétrico óptimo	$\theta_{opt}$	54.32	45.52
5	Grado de saturación para la condición óptima	$S_{opt}$	91.51	78.73
6	Contenido de agua volumétrico para la condición saturada	$\theta_{sat}$	0.593613933	0.578206079

**Tabla 49: Parámetros de curva Característica suelo-Agua “SWCC”-Nivel 2.**

	Muestra ing civil	Muestra la ladrillera	UND
$af$	160.413014	117.5058358	kPa
$bf$	0.410656272	0.62263273	-
$cf$	0.03	0.156448779	-
$hr$	500	500	kPa

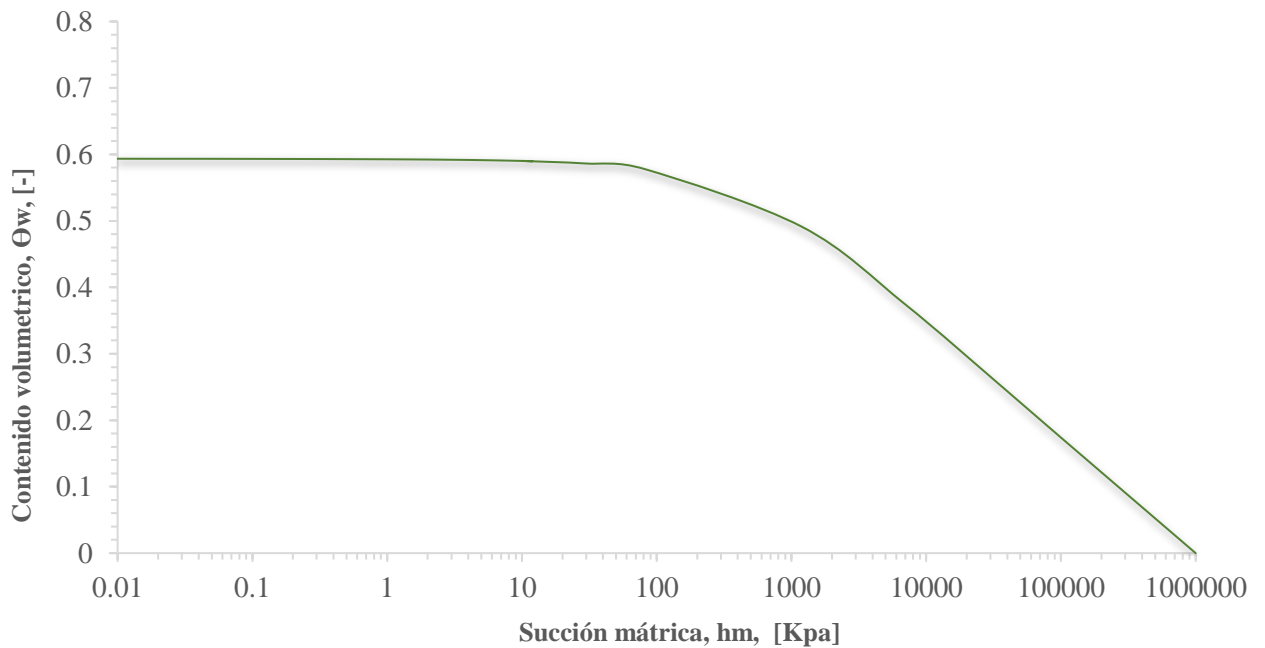
##### Ecuaciones de la SWCC N2 DE - Muestra de Ing. civil

$$C(h) = \left[ 1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{h}{500}\right)}{\ln\left(1 + \frac{1 * 10^6}{500}\right)} \right]$$

$$\theta_w = C(h) * \left[ \frac{0.5936139}{\left[ \ln \left[ EXP(1) + \left( \frac{h}{160.413} \right)^{0.41065} \right] \right]^{0.03}} \right]$$

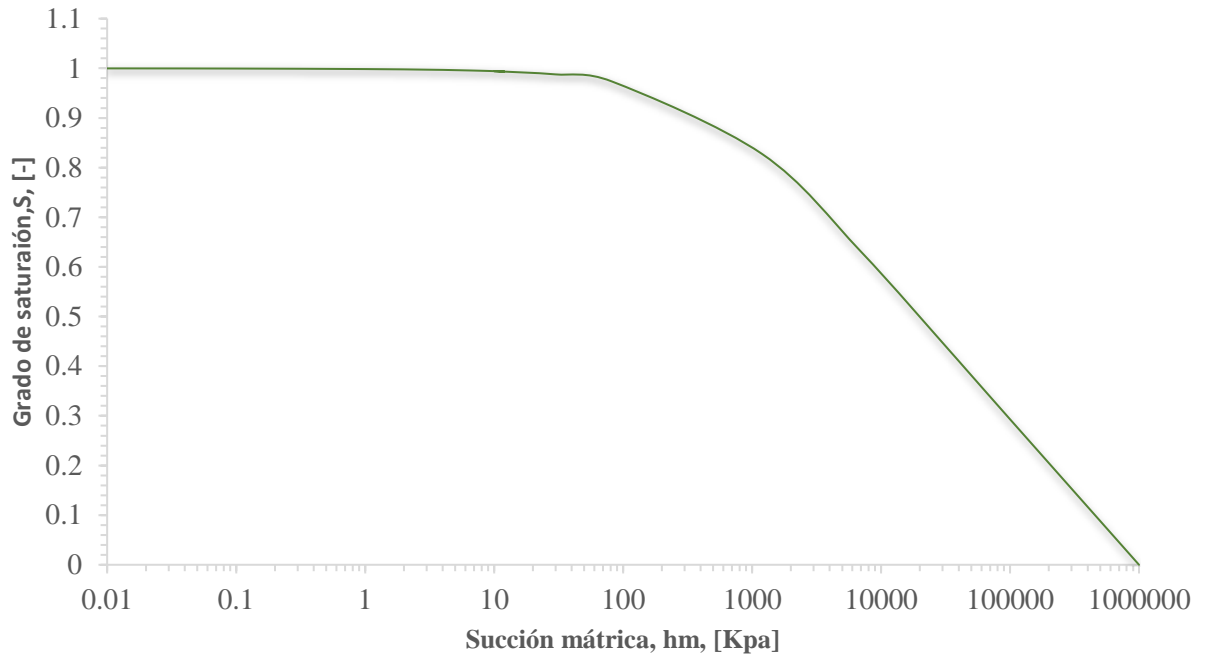
**Tabla 50: Valores de Succión matricial y saturación Tabulados - Muestra de Ing. Civil**

<b>h</b>	<b>C(h)</b>	<b><math>\theta_w</math></b>	<b>S</b>
1000000	0	0	0
100000	0.302325456	0.173969696	0.293068754
55843	0.378456207	0.218250429	0.367663925
42208	0.414906518	0.239524981	0.403502963
34708	0.440309939	0.254380764	0.428528965
6958	0.644475076	0.374671952	0.631171087
1198	0.839125838	0.491052088	0.827224667
81	0.980184647	0.578031679	0.973750188
30	0.992334453	0.586301947	0.987682253
10	0.997394872	0.590196491	0.994242988
12	0.99687998	0.589762454	0.993511812
9	0.997653075	0.59042065	0.994620606
5	0.998690987	0.591390389	0.996254225
3	0.999213031	0.591955228	0.99720575
1	0.999737153	0.592679759	0.998426292
0.1	0.999973692	0.593287624	0.9994503
0.02	0.999994738	0.593448993	0.999722143
0.01	0.999997369	0.593490362	0.999791832



**Figura 58: SWCC N2 - succión matricial Vs Contenido volumétrico de agua - Muestra ing. Civil**





**Figura 59: SWCC N2- succión matricial Vs grado de Saturación - Muestra ing. Civil**

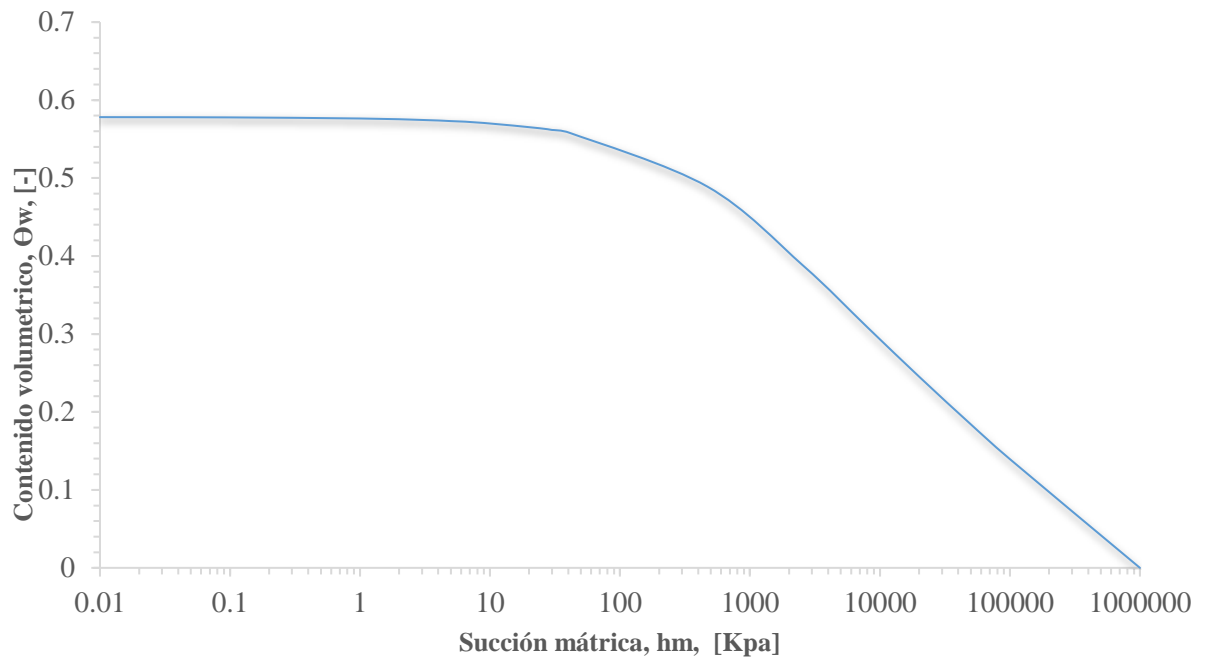
**Ecuaciones de la SWCC N2 - Muestra de La ladrillera**

$$C(h) = \left[ 1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{h}{500}\right)}{\ln\left(1 + \frac{1 * 10^6}{500}\right)} \right]$$

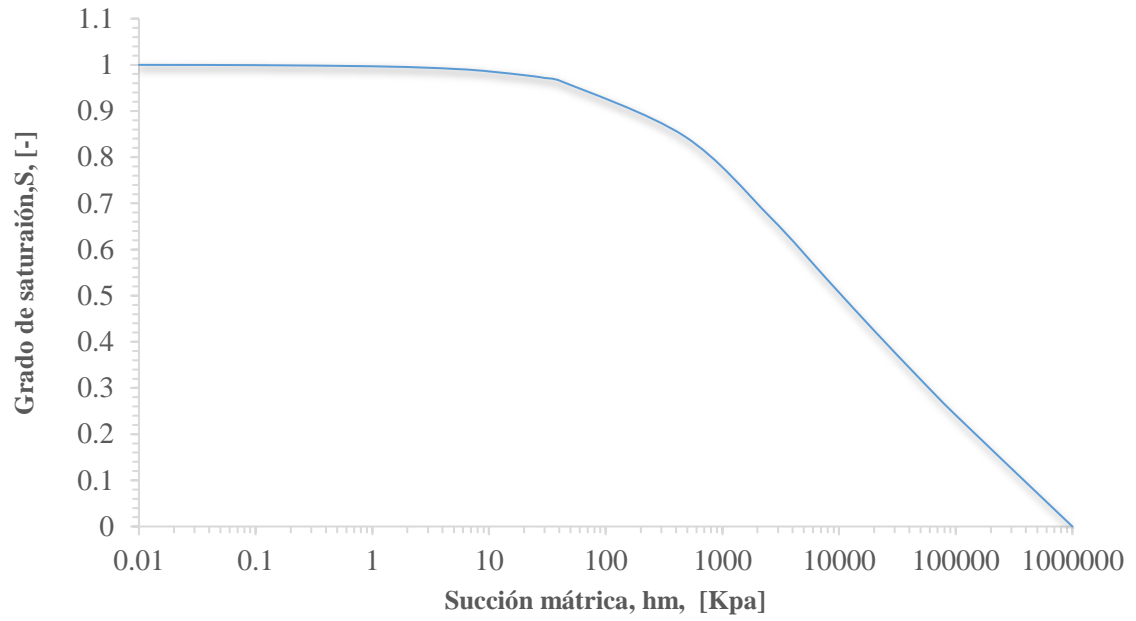
$$\theta_w = C(h) * \left[ \frac{0.578206}{\left[ \ln \left[ \text{EXP}(1) + \left( \frac{h}{117.50583} \right)^{0.62263} \right] \right]^{0.1564}} \right]$$

**Tabla 51: Valores de Succión matricial y grado de saturación Tabulados - Muestra de la ladrillera**

h	C(h)	$\theta_w$	S
1000000	0	0	0
100000	0.302325456	0.139443728	0.241166139
50000	0.392859329	0.18411208	0.318419482
20000	0.51146224	0.245300936	0.424244823
7964	0.627841345	0.308928414	0.534287731
2570	0.76124854	0.387549288	0.670261526
472	0.912600002	0.48893143	0.84560064
30	0.992334453	0.561668235	0.971398012
24	0.993916863	0.564024405	0.975472977
41	0.989607082	0.557938765	0.96494794
9	0.997653075	0.570636441	0.986908409
5	0.998690987	0.573037577	0.991061142
3	0.999213031	0.57449352	0.993579178
1	0.999737153	0.576377552	0.996837587
0.1	0.999973692	0.577784869	0.999271523
0.02	0.999994738	0.578053529	0.999736167
0.01	0.999997369	0.578107394	0.999829326
0.01	0.999997369	0.578107394	0.999829326



**Figura 60: SWCC N2 - succión Vs contenido volumétrico de agua - Muestra de la ladrillera**



**Figura 61: SWCC N2 - Succión vs grado de Saturación - Muestra de la ladrillera**

#### 4.4.2 Determinación de SWCC para nivel 1.

Las Curvas características que se presentan corresponden a las obtenidas mediante procedimientos de secado, porque de esta forma se prepararon las muestras para la determinación de la succión con ensayos de papel filtro.

Teniendo en cuenta la sensibilidad del ensayo, durante el proceso se descartaron algunos datos de la Tabla 52, debido a su baja confiabilidad, porque para los primer ensayos se utilizó un papel filtro diferente (schleicher & schuell) y además no se tuvo la precaución de la utilización de recipientes para el proceso de pesado de los papeles filtro, por lo que se consideró más adecuado hacer una revisión teniendo como base los ensayos adicionales, en los que se tuvieron en cuenta todas las precauciones y dependiendo de éstos se evaluarán los primeros resultados obtenidos.

**Tabla 52: Valores de succión Matricial obtenidos en el laboratorio mediante ensayos con papel filtro**

		Muestra de ing Civil		Muestra de la ladrillera	
		Succión [Kpa]	Saturación [%]	Succión [Kpa]	Saturación [%]
<b>Ensayos mensuales</b>	<b>Febrero</b>	9.40	98		
	<b>Marzo</b>	1198.46	92	23.66	69
	<b>Abril</b>	1.99	81	5.65	71
	<b>Mayo</b>	20.15	95	41.10	68
<b>Ensayos Adicionales</b>	<b>1</b>	6958.40	72	471.63	55
	<b>2</b>	34708.31	56	2570.06	40
	<b>2</b>	42207.89	51	7963.65	32
	<b>3</b>	55842.96	44	49379.98	14

#### 4.4.2.1.1 Procedimiento de Ajuste de la SWCC N1

	Celda Objetivo
	Resultados de iteración
	Datos Calculados a partir del modelo
	Datos calculados a partir de datos de laboratorio

**Tabla 53: Parámetros SWCC-Nivel 1**

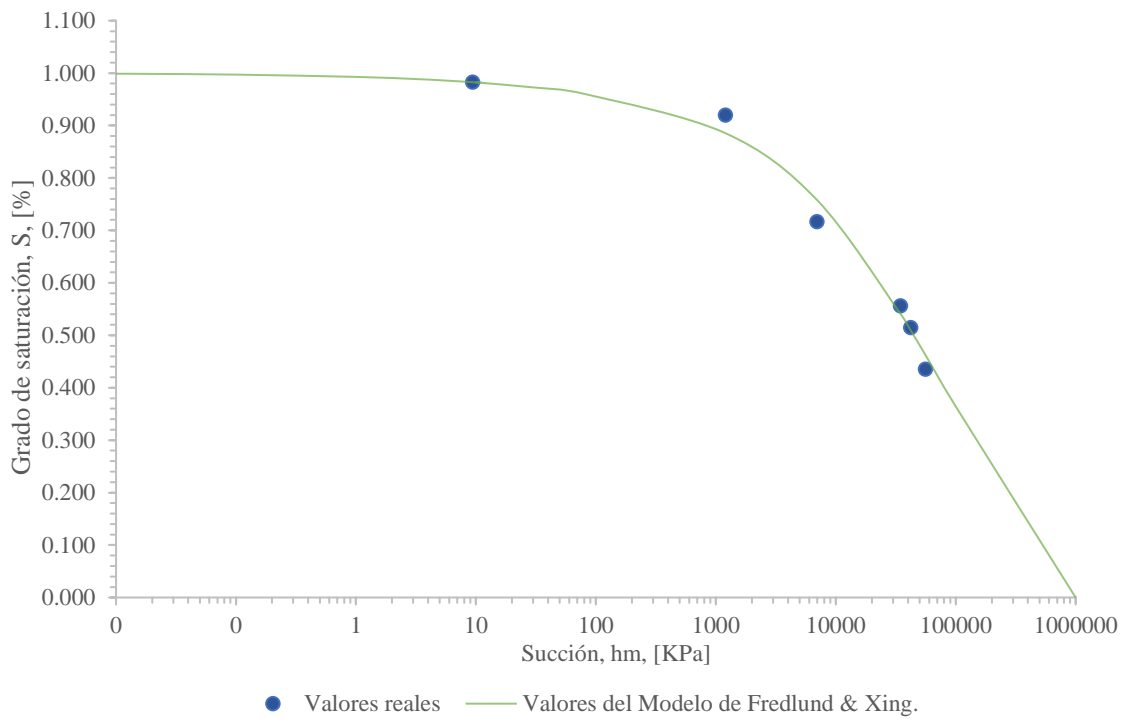
	Muestra de Ing. civil	Muestra de la ladrillera
<b>af</b>	2564.40329	47.23329415
<b>fb</b>	0.401448321	1.192346021
<b>cf.</b>	0.465189883	0.491145766
<b>hr</b>	12211.15241	1172.610407
<b>Θ sat</b>	0.593613933	0.578206079

**Tabla 54: Datos para el Ajuste de la SWCC-Muestra de ing. Civil.**

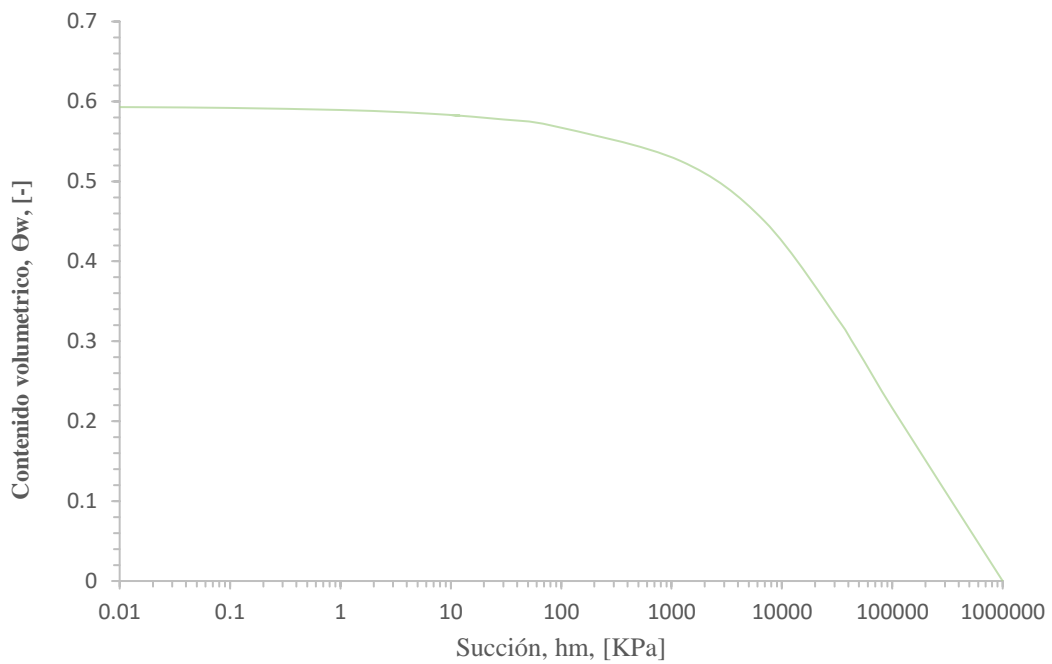
Succión hm [Kpa]	S real [-]	S modelo [-]	S real-S modelo	(S real-S modelo) <sup>2</sup>
9	0.983	0.982637355	0.000279705	7.82349E-08
1198	0.920	0.885647806	0.033914581	0.001150199
6958.399203	0.717	0.758371103	-0.041829082	0.001749672
34708.31069	0.556	0.540789319	0.015636306	0.000244494
42207.89429	0.514	0.509068697	0.00537496	2.88902E-05
55842.95758	0.436	0.462697504	-0.027181607	0.003173333
			<b>objetivo</b>	<b>0.006346667</b>

**Tabla 55: Valores de succión y grado de Saturación Tabulados-Muestra de Ing. Civil.**

<b>h [Kpa]</b>	<b>C(h)</b>	<b><math>\Theta_w</math></b>	<b>S[-]</b>
1000000	0	0	0
100000	0.497903514	0.216328965	0.364427034
55843	0.611106551	0.274663685	0.462697504
42208	0.661720415	0.302190272	0.509068697
34708	0.695286956	0.321020075	0.540789319
6958	0.897913044	0.450179653	0.758371103
1198	0.978806739	0.525732878	0.885647806
81	0.998498225	0.569907965	0.960065006
30	0.999444542	0.577455364	0.97277933
10	0.999814696	0.583056015	0.982214167
12	0.999777653	0.582280349	0.980907483
9	0.99983322	0.583480313	0.982928939
5	0.999907329	0.585558179	0.986429304
3	0.999944393	0.587020187	0.988892198
1	0.999981463	0.589337456	0.992795861
0.1	0.999998146	0.59190073	0.997113945
0.02	0.999999629	0.592713157	0.998482556
0.01	0.999999815	0.592931348	0.99885012



**Figura 62:SWCC N1-Succión Vs grado de saturación - Muestra de Ing. Civil**



**Figura 63:SWCC N1-Succión Vs Contenido Volumétrico - Muestra de Ing. Civil**

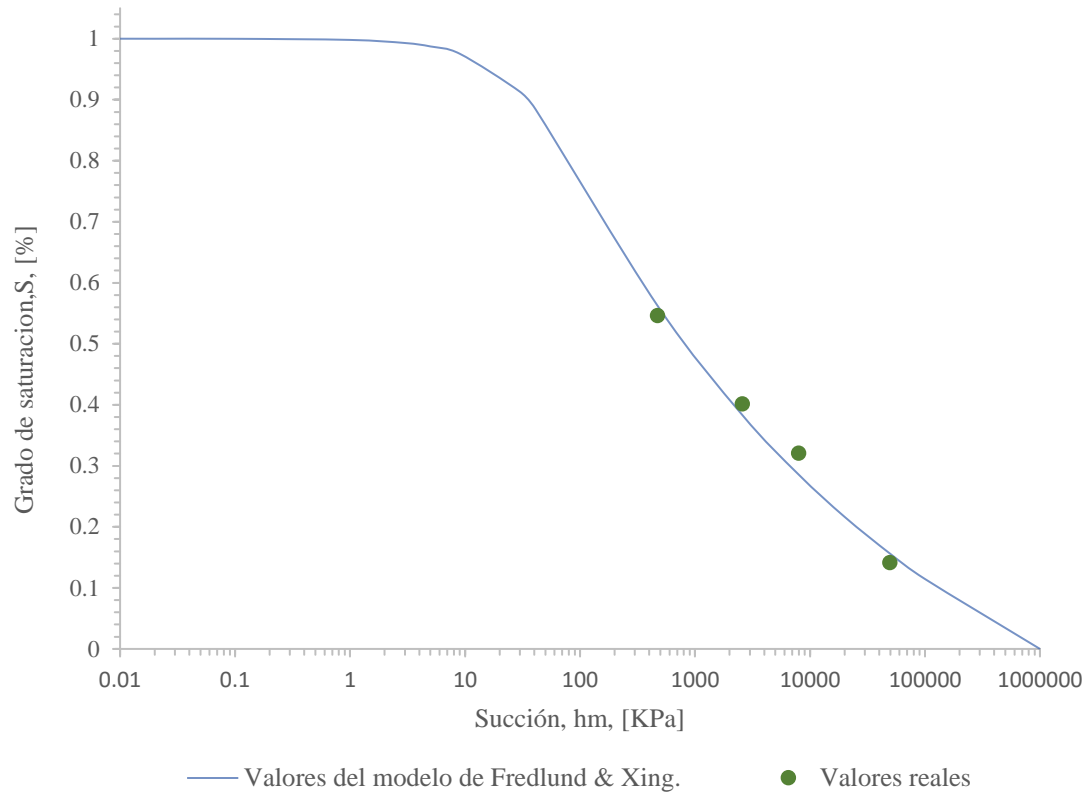
**Tabla 56: Datos para el Ajuste de la SWCC-Muestra de La ladrillera.**

Succión hm [Kpa]	Grado de saturacion S. real	Grado de saturacion S. Modelo	S real-S modelo	(S real-S modelo) <sup>2</sup>
472	0.5461	0.562631901	-0.016548207	0.000273843
2570.065	0.4014	0.383703325	0.017676786	0.000312469
7963.65	0.3209	0.285827337	0.03510656	0.001232471
49379.98	0.1414	0.156547433	-0.015167843	0.000230063
			<b>objetivo</b>	<b>0.002048846</b>

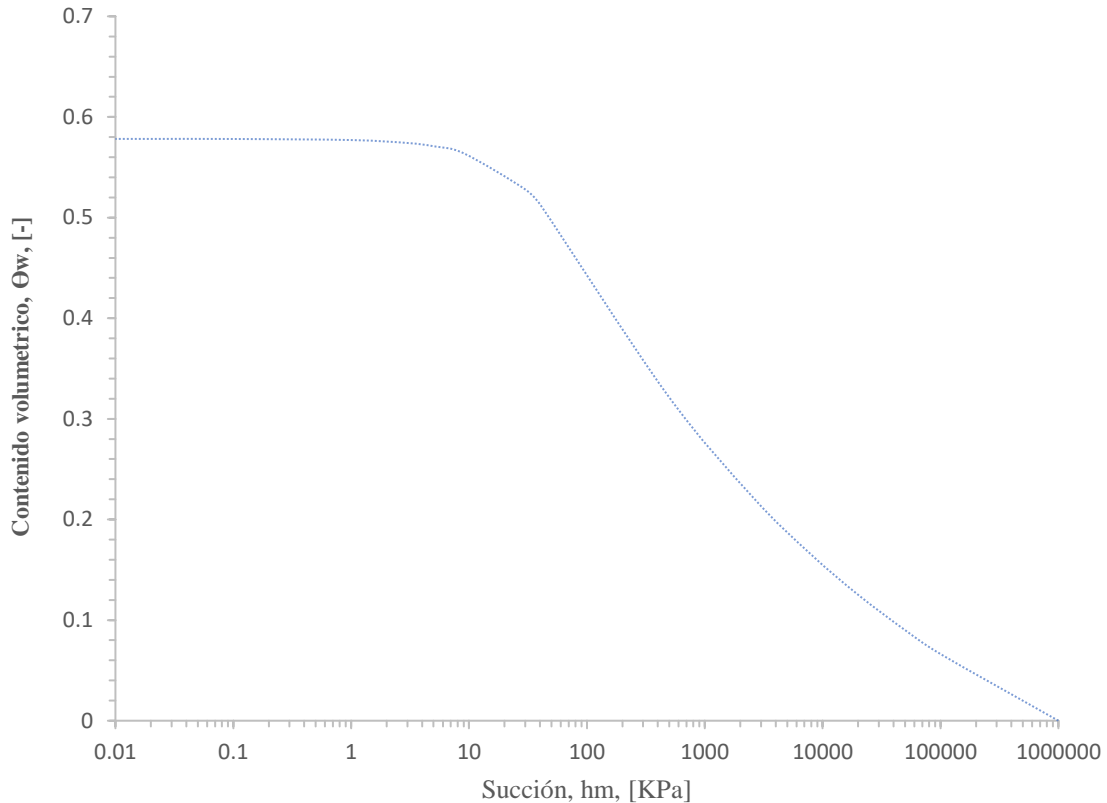
**Tabla 57: Valores de succión y Saturación Tabulados-Muestra de la ladrillera.**

h [Kpa]	C(h)	$\Theta_w$	S[-]
1000000	0	0	0
100000	0.339585595	0.066263701	0.114602221
50000	0.44057144	0.090067838	0.155771171
20000	0.571317507	0.125163368	0.216468441
7964	0.695835323	0.165267104	0.285827337
2570	0.828056179	0.221859595	0.383703325
472	0.949917214	0.325317185	0.562631901
30	0.99625729	0.527995212	0.913160951
24	0.997040028	0.538343936	0.931058936
41	0.994895791	0.511278417	0.884249467
9	0.998867226	0.563954369	0.975351851
5	0.999369612	0.570884483	0.987337395
3	0.999621445	0.574149408	0.99298404
1	0.999873708	0.577084337	0.998059963
0.1	0.999987366	0.578131129	0.999870375
0.02	0.999997473	0.578194688	0.9999803
0.01	0.999998737	0.578201003	0.999991221
0.01	0.999998737	0.578201003	0.999991221





**Figura 64: SWCC N1-Succión Vs grado de saturación - Muestra de la ladrillera**



**Figura 65: SWCC N1-Succión Vs Contenido Volumétrico - Muestra de la ladrillera**

#### **4.5 Determinación de Correlación para estimación del Módulo resiliente en función del CBR**

En el análisis de la bibliografía (Sánchez & Campagnoli, 2016) se encontraron diferentes correlaciones para la estimación del módulo resiliente a partir del valor de CBR, Sin embargo, estas se han inferido a través de procesos investigativos para tipos de suelo y condiciones diferentes a las del proyecto, por ello, se hizo necesario un análisis estadístico que permitiera la determinación de la correlación que se considere más adecuada.

Las correlaciones encontradas corresponden a ecuaciones de la forma:

$$M_r = A \text{ CBR}^B$$

Los valores de A y B utilizados en el análisis se presentan en la Tabla 58.

**Tabla 58: Coeficientes A y B de correlaciones entre CBR y Mr [Mpa]**

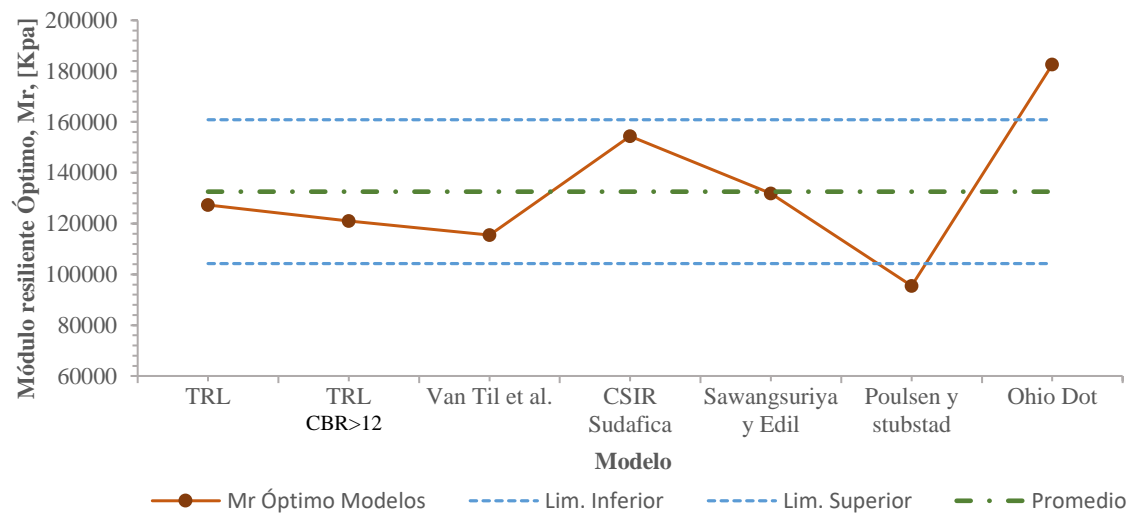
	<b>A</b>	<b>B</b>
<b>TRL (CBR &lt;12)</b>	17.6	0.64
<b>TRL (CBR &gt;12)</b>	22.1	0.55
<b>Heukelon y Klomp</b>	10.3	1
<b>Van Til et al.</b>	12.7	0.714
<b>CSIR Sudafica</b>	20.7	0.65
<b>Sawangsuriya y Edil</b>	18.8	0.63
<b>Poulsen y stubstad</b>	10	0.73
<b>Ohio Dot</b>	8.3	1

**Tabla 59: Mr óptimo Calculado a partir de correlaciones en Función de CBR**

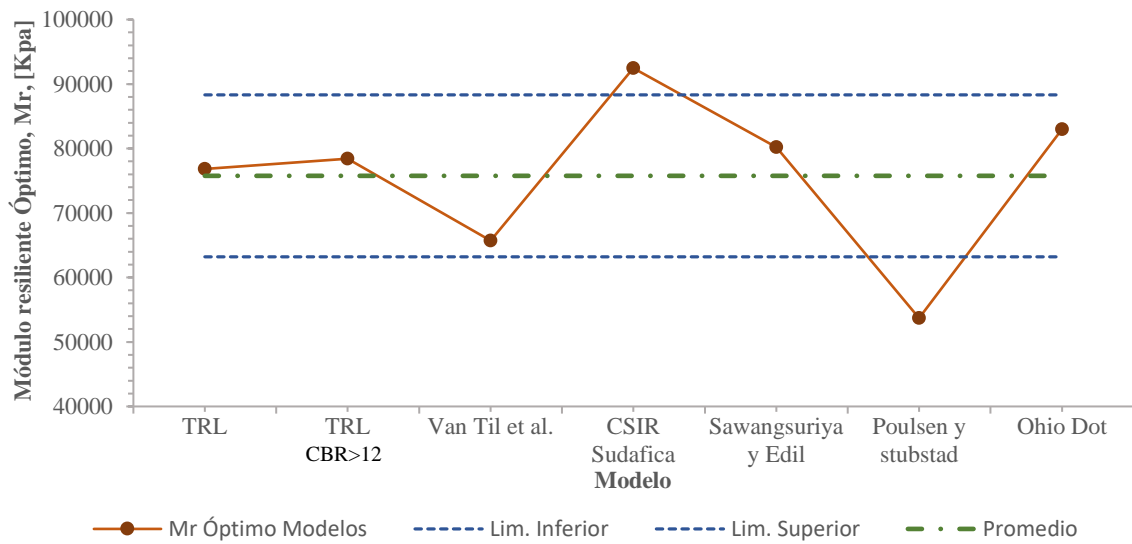
Muestra		Ing. Civil	La Ladrillera
CBR Óptimo [%]		22	10
Mr Ó p t i m o	TRL	127251.58	76826.78647
	TRL	120983.1111	78413.75902
	Van Til et al.	115423.3075	65736.06766
	CSIR Sudafica	154363.6674	92463.50358
	Sawangsurriya y Edil	131790.5099	80196.94953
	Poulsen y stubstad	95492.34469	53703.17964
	Ohio Dot	182600	83000

**Tabla 60: Mr Óptimo promedio y determinación de la desviación estándar.**

Mr Promedio [Kpa]		132557.7886	75762.89227
Desviación estandar		28313.34954	12558.35783
Banda Des. estandar	Lim. Inferior	104244.4391	63204.53444
	Lim. Superior	160871.1382	88321.2501



**Figura 66: Banda de la desviación estándar – Muestra de ing. Civil**



**Figura 67: Banda de la desviación estándar – Muestra de La Ladrillera**

De las gráficas se puede inferir que, para la muestra de ingeniería civil, el modelo de Poulsen y Stubstad subestima el valor del Mr, debido a que se encuentra muy lejos del Valor del Módulo resiliente óptimo y además está por debajo del límite inferior de la desviación estándar, al contrario de lo que muestra el modelo de Ohio Dot, el cual arroja valores de Mr muy por encima del Mr promedio, saliéndose de la banda que comprende la desviación estándar. Los otros modelos proporcionan valores muy cercanos al promedio

Para la muestra de la ladrillera los modelos que más se alejan del valor del módulo resiliente óptimo son el CSIR Sudáfrica y el de Poulsen y Stubstad, sobrestimando y subestimando respectivamente el valor del Módulo.

Finalmente, Se considera que El modelo TRL, resultaría adecuado para las muestras del proyecto, porque con él se obtienen valores de modulo resiliente muy cercanos al Mr óptimo Promedio. Por lo que será el modelo a utilizarse para la estimación del Módulo resiente de las muestras a partir del valor de CBR.

En la revisión bibliográfica se encontraron muchas más ecuaciones a las utilizadas para la determinación de la correlación más adecuada, sin embargo, debido a que fue imposible encontrarse información acerca de cómo se determinó y sus limitaciones estas no se utilizaron.

Además, se usaron las correlaciones que se encuentran en función del CBR, debido a que este parámetro es el que más se ha correlacionado con el Mr, por lo cual desde principios de la investigación se determinó que se realizarían ensayos de CBR inalterados a partir de los cuales se inferiría el valor del Mr.

#### 4.6 Módulo resiliente calculado con el modelo escogido TRL (CBR>12)

Con el modelo del TRL (CBR>12), se obtiene los valores del Mr calculado a partir de valores de CBR inalterados, de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$Mr = 22.1 \times CBR^{0.55} [Mpa]$$

Los valores obtenidos se encuentran resumidos en la Tabla 61 y Tabla 62 para cada una de los suelos estudiados.

**Tabla 61: Mr calculado a partir de CBR Muestra de Ing. civil**

Mes	CBR mensual Real [%]	Mr Mensual-Modelo TRL (CBR >12, medido) [Kpa]
Feb	34	153711.26
Mar	24	126913.69
Abr	39	165759.26
May	8	69357.23

**Tabla 62: Mr real Muestra de la ladrillera**

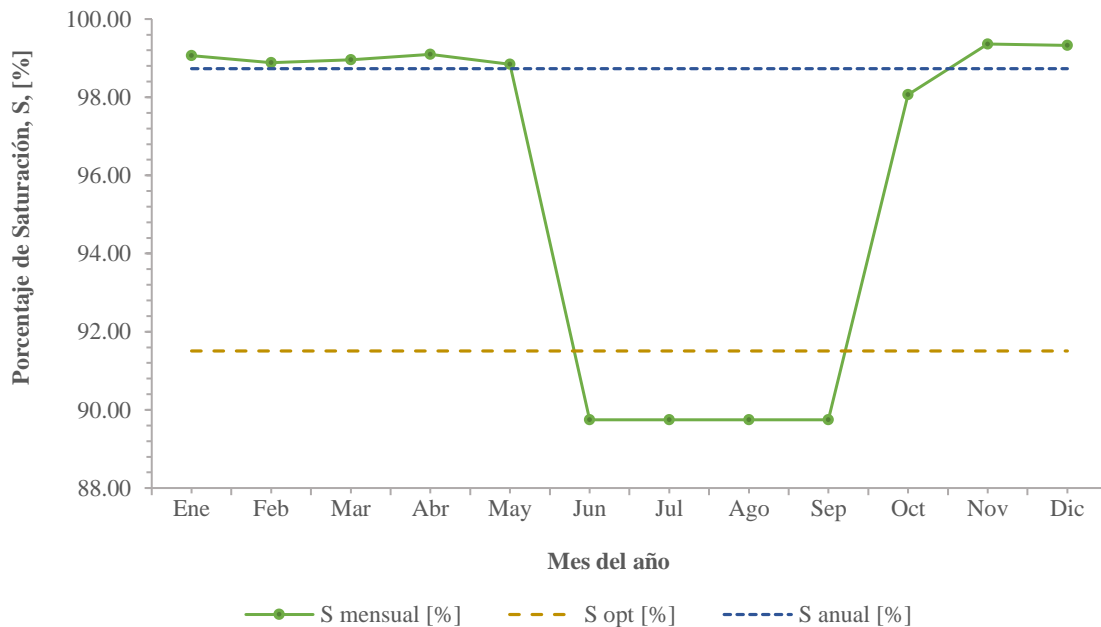
<b>Mes</b>	<b>CBR mensual Real [%]</b>	<b>Mr Mensual-Modelo TRL (CBR &gt;12, medido) [Kpa]</b>
<b>Mar</b>	41	170381.88
<b>Abr</b>	39	165759.26
<b>May</b>	3	40439.80

## 4.7 Determinación del Módulo resiliente - Mr- Modelo MEPDG

### 4.7.1 Módulo resiliente Nivel 2

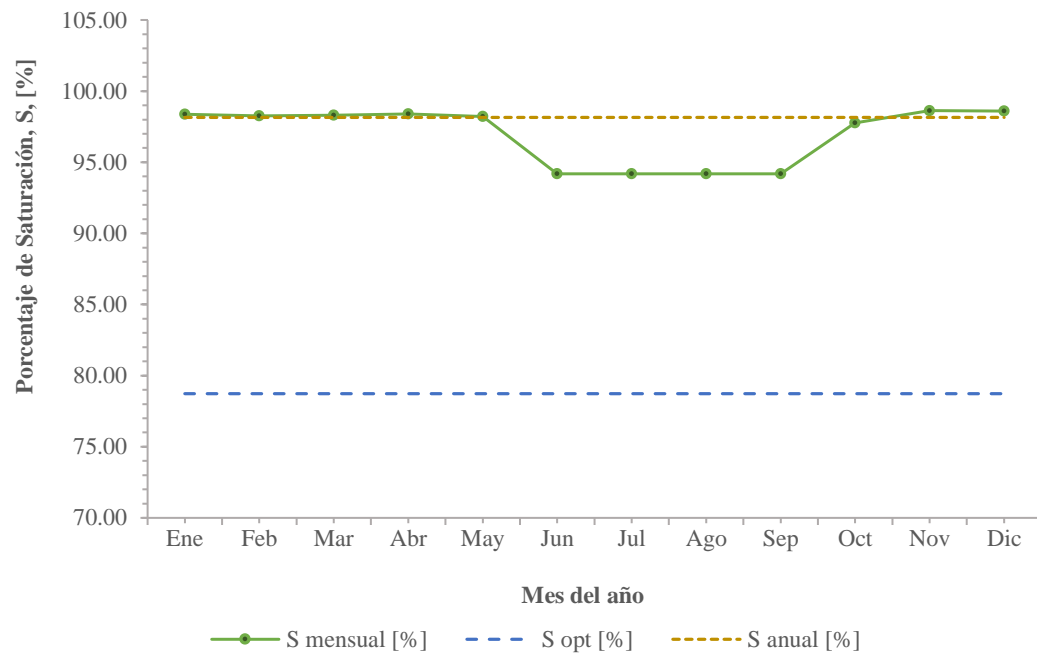
**Tabla 63: % de saturación mensual Serie Histórica estación meteorológica Universidad del Cauca.**

Mes	Ingeniería civil				La Ladrillera			
	Succión Matricial [Kpa]	C(h)	$\theta_w$	S [%]	Succión Matricial [Kpa]	C(h)	$\theta_w$	S [%]
Ene	20	0.9947	0.5881	99.07	12	0.9968	0.5840	98.38
Feb	26	0.9933	0.5870	98.89	14	0.9964	0.5832	98.25
Mar	24	0.9939	0.5874	98.96	13	0.9965	0.5836	98.31
Abr	20	0.9950	0.5882	99.10	12	0.9968	0.5841	98.40
May	28	0.9929	0.5867	98.84	14	0.9963	0.5831	98.22
Jun	508	0.9078	0.5327	89.75	91	0.9781	0.5591	94.19
Jul	508	0.9078	0.5327	89.75	91	0.9781	0.5591	94.19
Ago	508	0.9078	0.5327	89.75	91	0.9781	0.5591	94.19
Sep	508	0.9078	0.5327	89.75	91	0.9781	0.5591	94.19
Oct	55	0.9863	0.5821	98.06	21	0.9947	0.5803	97.75
Nov	12	0.9970	0.5898	99.36	10	0.9975	0.5855	98.63
Dic	13	0.9967	0.5896	99.33	10	0.9974	0.5853	98.60
Anual	31	0.9920	0.5861	98.73	15	0.9960	0.5826	98.15



**Figura 68: % de Saturación mensual Muestra de Ing. Civil N2-Serie Histórica Estación meteorológica Universidad de Cauca.**

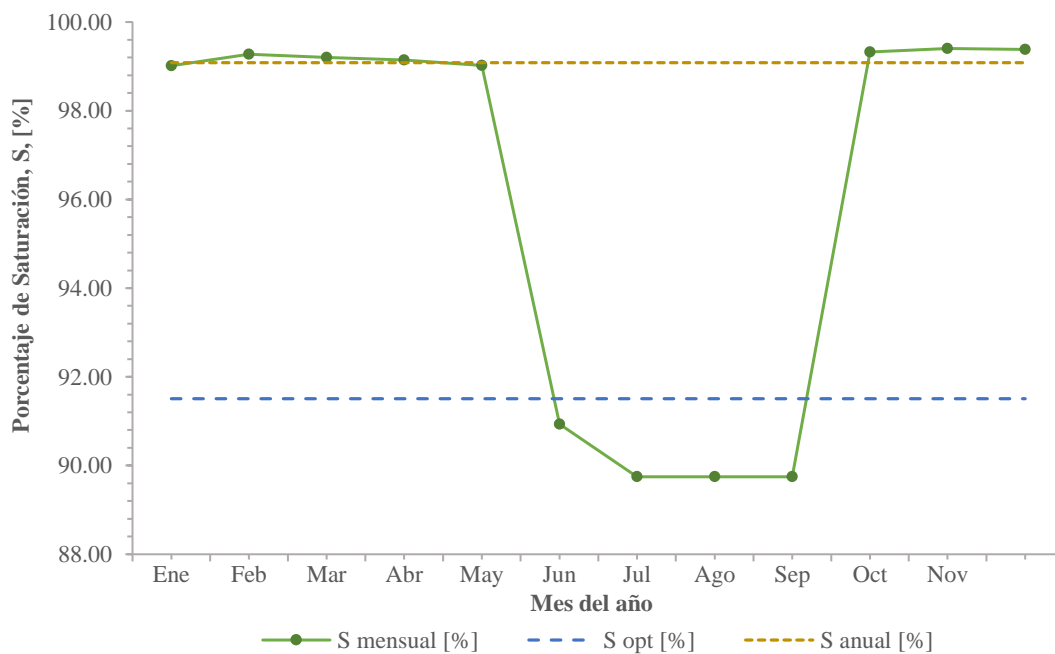




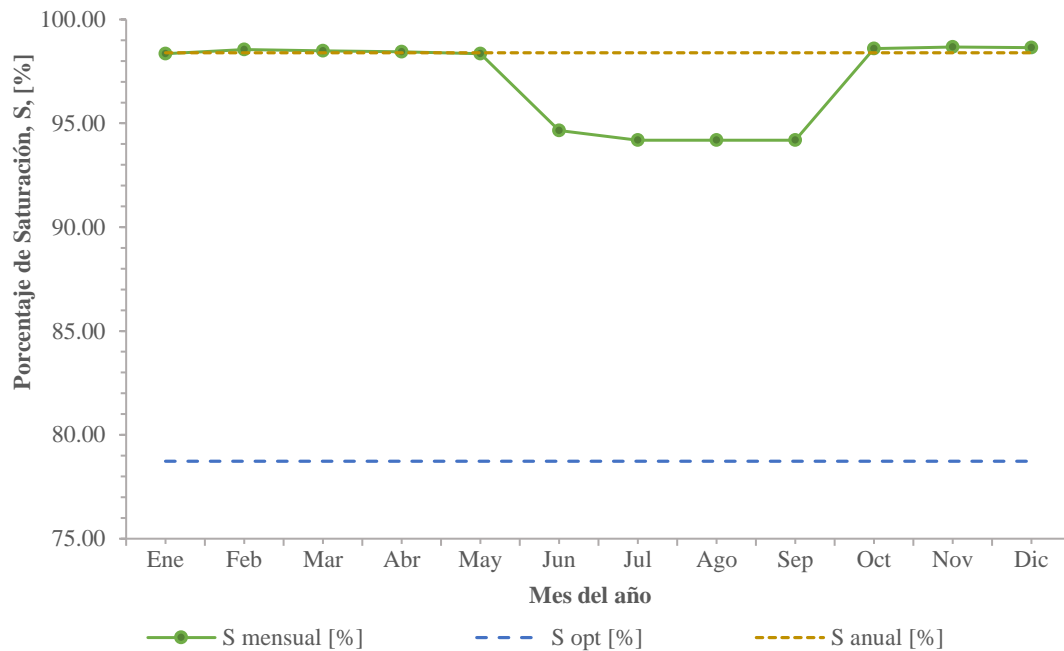
**Figura 69: % de Saturación mensual Muestra de La Ladrillera N2-Serie Histórica Estación meteorológica Universidad de Cauca.**

**Tabla 64: % de saturación mensual Serie Histórica estación meteorológica  
Aeropuerto Guillermo león Valencia**

Mes	Ingeniería civil				La Ladrillera			
	Succión Matricial [Kpa]	C(h)	$\theta_w$	S [%]	Succión Matricial [Kpa]	C(h)	$\theta_w$	S [%]
Ene	22	0.9944	0.5878	99.02	13	0.9967	0.5838	98.35
Feb	14	0.9963	0.5893	99.27	11	0.9973	0.5850	98.55
Mar	16	0.9958	0.5889	99.20	11	0.9971	0.5846	98.49
Abr	18	0.9953	0.5885	99.14	12	0.9969	0.5844	98.44
May	22	0.9944	0.5878	99.02	13	0.9967	0.5838	98.35
Jun	424	0.9192	0.5398	90.93	79	0.9806	0.5619	94.66
Jul	508	0.9078	0.5327	89.75	91	0.9781	0.5591	94.19
Ago	508	0.9078	0.5327	89.75	91	0.9781	0.5591	94.19
Sep	508	0.9078	0.5327	89.75	91	0.9781	0.5591	94.19
Oct	13	0.9967	0.5896	99.33	10	0.9974	0.5853	98.60
Nov	11	0.9973	0.5901	99.40	9	0.9976	0.5857	98.67
Dic	11	0.9971	0.5899	99.38	9	0.9975	0.5856	98.65
Anual	20	0.9949	0.5882	99.08	12	0.9968	0.5841	98.40



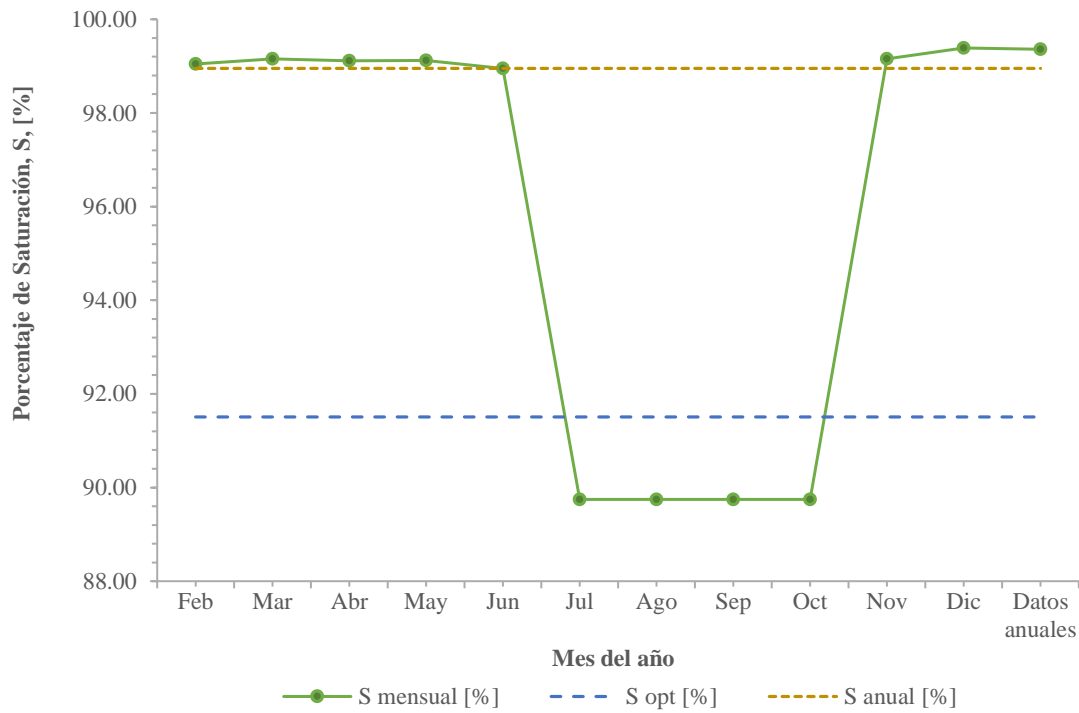
**Figura 70: % de Saturación mensual Muestra de Ing. Civil N2-Serie Histórica  
Estación meteorológica Aeropuerto.**



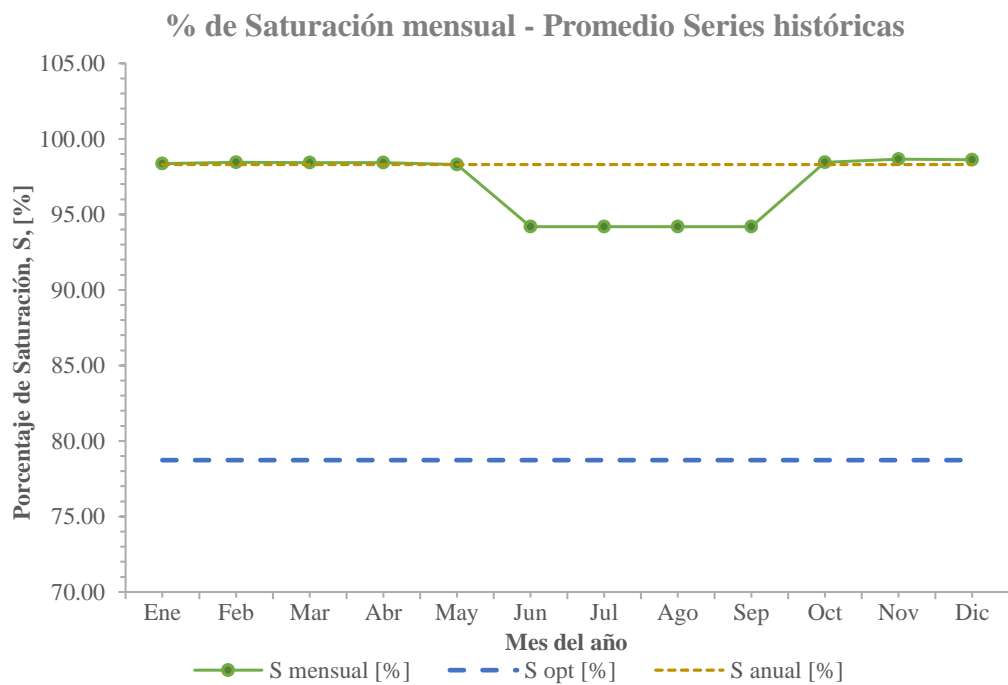
**Figura 71: % de Saturación mensual Muestra de La Ladrillera N2-Serie Histórica Estación meteorológica Aeropuerto.**

**Tabla 65: % de saturación mensual Promedio Series Históricas estación meteorológica Universidad del Cauca y Aeropuerto Guillermo León Valencia**

Mes	Ingeniería civil				La Ladrillera			
	Succión Matricial [Kpa]	C(h)	$\theta_w$	S [%]	Succión Matricial [Kpa]	C(h)	$\theta_w$	S [%]
Ene	21	0.9946	0.5879	99.04	13	0.9967	0.5839	98.37
Feb	18	0.9954	0.5886	99.16	12	0.9970	0.5844	98.45
Mar	19	0.9951	0.5883	99.11	12	0.9969	0.5842	98.42
Abr	19	0.9952	0.5884	99.12	12	0.9969	0.5843	98.42
May	24	0.9938	0.5874	98.95	14	0.9965	0.5835	98.30
Jun	508	0.9078	0.5327	89.75	91	0.9781	0.5591	94.19
Jul	508	0.9078	0.5327	89.75	91	0.9781	0.5591	94.19
Ago	508	0.9078	0.5327	89.75	91	0.9781	0.5591	94.19
Sep	508	0.9078	0.5327	89.75	91	0.9781	0.5591	94.19
Oct	18	0.9954	0.5886	99.15	12	0.9970	0.5844	98.45
Nov	11	0.9971	0.5900	99.39	9	0.9976	0.5856	98.66
Dic	12	0.9969	0.5898	99.36	10	0.9975	0.5855	98.63
Anual	24	0.9938	0.5874	98.95	13	0.9965	0.5835	98.30



**Figura 72: % de Saturación mensual Muestra de Ing. Civil N2-Promedio Series Históricas**



**Figura 73: % de Saturación mensual Muestra de La Ladrillera N2-Promedio Series Históricas.**

$$\text{Termino } a = e^{\left(\ln \frac{-0.4}{-0.5934} + 6.1324(S - S_{opt})\right)}$$

$$\text{Termino } b = -0.5934 + \frac{0.4 - (-0.5934)}{1 + e^{\left(\ln \frac{-0.4}{-0.5934} + 6.1324(S - S_{opt})\right)}}$$

$$F_{amb} = \frac{M}{M_{r,opt}} = 10^{\left[-0.5934 + \frac{0.4 - (-0.5934)}{1 + e^{\left(\ln \frac{-0.4}{-0.5934} + 6.1324(S - S_{opt})\right)}}\right]}$$

**Tabla 66: Mr Muestra de ing. Civil N2 - Serie histórica estación meteorológica universidad del Cauca**

Mes	TMI [-]	Succión Matricial [Kpa]	Saturación SWCC N-2 [%]	Sopt [%]	CBR opt [%]	Mr optimo, TRL (CBR>12) [Kpa]	S-Sopt [%]	a	b	Famb mensual [-]	Mr mensual [Kpa]	CBR mensual Inferido [%]
<b>Ene</b>	158.747	20	0.99067	0.92	22	120983.11	0.0756	1.07082	-0.11369	0.76969	93119	13.668
<b>Feb</b>	128.571	26	0.98886				0.0738	1.05903	-0.11094	0.77457	93710	13.826
<b>Mar</b>	138.952	24	0.98960				0.0745	1.06382	-0.11206	0.77257	93468	13.762
<b>Abr</b>	165.433	20	0.99096				0.0759	1.07270	-0.11412	0.76891	93026	13.644
<b>May</b>	123.210	28	0.98842				0.0733	1.05617	-0.11027	0.77577	93855	13.865
<b>Jun</b>	0.000	508	0.89747				-0.0176	0.60520	0.02547	1.06039	128289	24.475
<b>Jul</b>	0.000	508	0.89747				-0.0176	0.60520	0.02547	1.06039	128289	24.475
<b>Ago</b>	0.000	508	0.89747				-0.0176	0.60520	0.02547	1.06039	128289	24.475
<b>Sep</b>	0.000	508	0.89747				-0.0176	0.60520	0.02547	1.06039	128289	24.475
<b>Oct</b>	74.149	55	0.98065				0.0656	1.00711	-0.09846	0.79715	96442	14.568
<b>Nov</b>	326.177	12	0.99361				0.0785	1.09029	-0.11816	0.76181	92166	13.415
<b>Dic</b>	280.816	13	0.99327				0.0782	1.08803	-0.11764	0.76271	92275	13.444
<b>Anual</b>	111.839	31	0.98730	0.0722	1.04898	-0.10857	0.77880	94222	13.964			

**Tabla 67: Mr Muestra de ing. Civil-N2 - Serie histórica Estación meteorológica Aeropuerto Guillermo Leon Valencia**

Mes	TMI [-]	Succión Matricial [Kpa]	Saturación SWCC N-2 [%]	Sopt [%]	CBR opt [%]	Mr optimo, TRL (CBR>12) [Kpa]	S-Sopt [%]	a	b	Famb mensual [-]	Mr mensual [Kpa]	CBR mensual Inferido [%]
<b>Ene</b>	148.837	22	0.99018	0.92	22	120983.11	0.0751	1.06761	-0.11294	0.77100	93279	13.711
<b>Feb</b>	236.641	14	0.99275				0.0777	1.08454	-0.11684	0.76411	92444	13.489
<b>Mar</b>	198.738	16	0.99201				0.0769	1.07968	-0.11573	0.76607	92682	13.552
<b>Abr</b>	177.939	18	0.99142				0.0763	1.07574	-0.11482	0.76768	92876	13.604
<b>May</b>	149.543	22	0.99022				0.0751	1.06786	-0.11300	0.77090	93266	13.708
<b>Jun</b>	4.008	424	0.90930				-0.0058	0.65068	0.00841	1.01956	123349	22.789
<b>Jul</b>	0.000	508	0.89747				-0.0176	0.60520	0.02547	1.06039	128289	24.475
<b>Ago</b>	0.000	508	0.89747				-0.0176	0.60520	0.02547	1.06039	128289	24.475
<b>Sep</b>	0.000	508	0.89747				-0.0176	0.60520	0.02547	1.06039	128289	24.475
<b>Oct</b>	278.906	13	0.99325				0.0782	1.08791	-0.11761	0.76276	92281	13.446
<b>Nov</b>	429.831	11	0.99404				0.0790	1.09312	-0.11880	0.76068	92029	13.379
<b>Dic</b>	362.003	11	0.99380				0.0787	1.09154	-0.11844	0.76131	92106	13.399
<b>Anual</b>	162.619	20	0.99084	0.0758	1.07194	-0.11394	0.76923	93064	13.654			

**Tabla 68: Mr Muestra de ing. Civil N2 – Promedio Series históricas**

Mes	TMI [-]	Succión Matricial [Kpa]	Saturación SWCC N-2 [%]	Sopt [%]	CBR opt [%]	Mr optimo, TRL (CBR>12) [Kpa]	S-Sopt [%]	a	b	Famb mensual [-]	Mr mensual [Kpa]	CBR mensual Inferido [%]
Ene	153.800	21.13	0.99043	0.92	22	120983.11	0.0754	1.06929	-0.11333	0.77032	93195	13.689
Feb	182.760	17.64	0.99157				0.0765	1.07676	-0.11506	0.76726	92825	13.590
Mar	169.693	19.00	0.99112				0.0761	1.07380	-0.11438	0.76846	92971	13.629
Abr	171.944	18.74	0.99121				0.0761	1.07436	-0.11450	0.76824	92944	13.622
May	136.837	24.21	0.98946				0.0744	1.06292	-0.11185	0.77295	93514	13.774
Jun	0.000	507.82	0.89747				-0.0176	0.60520	0.02547	1.06039	128289	24.475
Jul	0.000	507.82	0.89747				-0.0176	0.60520	0.02547	1.06039	128289	24.475
Ago	0.000	507.82	0.89747				-0.0176	0.60520	0.02547	1.06039	128289	24.475
Sep	0.000	507.82	0.89747				-0.0176	0.60520	0.02547	1.06039	128289	24.475
Oct	180.809	17.82	0.99151				0.0764	1.07635	-0.11496	0.76742	92845	13.596
Nov	379.729	11.00	0.99387				0.0788	1.09203	-0.11855	0.76111	92082	13.393
Dic	322.680	11.78	0.99359				0.0785	1.09015	-0.11812	0.76186	92173	13.417
Anual	137.609	24.04	0.98951	0.0744	1.06325	-0.11193	0.77281	93497	13.770			

**Tabla 69: Mr Muestra de la ladrilleraN2 – Serie histórica Estación meteorológica Universidad del Cauca**

Mes	TMI [-]	Succión Matricial [Kpa]	Saturación SWCC N-2 [%]	Sopt [%]	CBR opt [%]	Mr optimo, TRL (CBR>12) [Kpa]	S-Sopt [%]	a	b	Famb mensual [-]	Mr mensual [Kpa]	CBR mensual Inferido [%]
Ene	158.747	12.45	0.98383	0.79	10	76826.79	0.1965	2.24531	-0.28730	0.51606	39648	2.894
Feb	128.571	14.02	0.98254				0.1952	2.22762	-0.28562	0.51806	39801	2.914
Mar	138.952	13.39	0.98305				0.1958	2.23464	-0.28629	0.51727	39740	2.906
Abr	165.433	12.20	0.98405				0.1967	2.24828	-0.28758	0.51573	39622	2.891
May	123.210	14.39	0.98224				0.1949	2.22352	-0.28523	0.51853	39837	2.919
Jun	0.000	90.79	0.94186				0.1546	1.73649	-0.23038	0.58833	45199	3.673
Jul	0.000	90.79	0.94186				0.1546	1.73649	-0.23038	0.58833	45199	3.673
Ago	0.000	90.79	0.94186				0.1546	1.73649	-0.23038	0.58833	45199	3.673
Sep	0.000	90.79	0.94186				0.1546	1.73649	-0.23038	0.58833	45199	3.673
Oct	74.149	20.66	0.97754				0.1902	2.16041	-0.27907	0.52593	40405	2.995
Nov	326.177	9.65	0.98630				0.1990	2.27947	-0.29049	0.51229	39358	2.856
Dic	280.816	10.01	0.98597				0.1987	2.27492	-0.29006	0.51278	39396	2.861
Anual	111.839	15.32	0.98150	0.1942	2.21349	-0.28427	0.51968	39925	2.931			

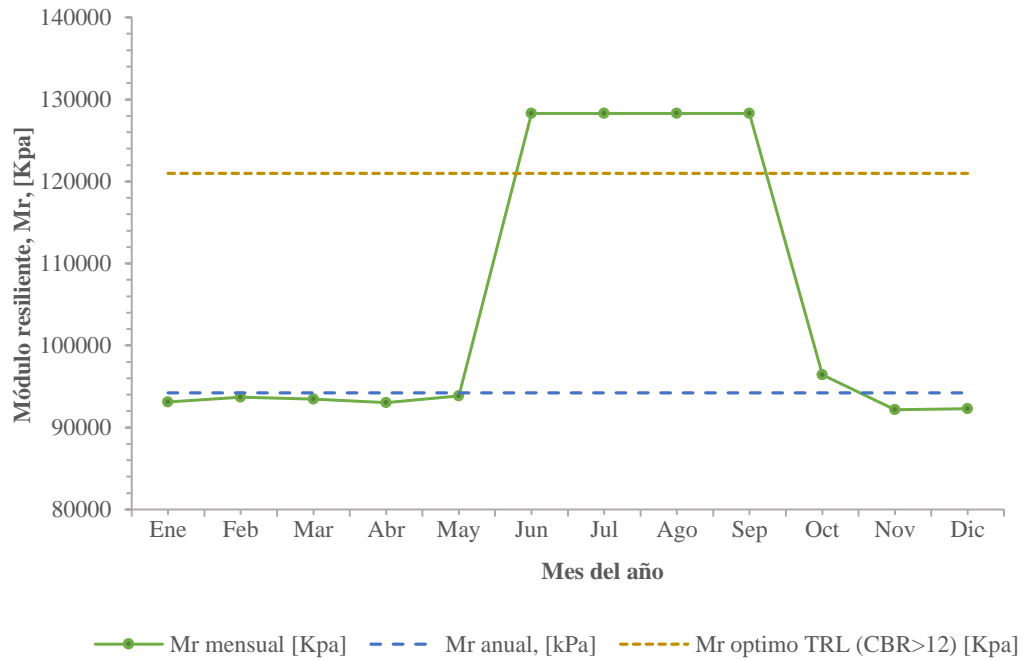
**Tabla 70: Mr Muestra de la ladrillera N2 – Serie histórica Estación meteorológica Aeropuerto Guillermo Leon Valencia.**

Mes	TMI [-]	Succión Matricial [Kpa]	Saturación SWCC N-2 [%]	Sopt [%]	CBR opt [%]	Mr optimo, TRL (CBR>12) [Kpa]	S-Sopt [%]	a	b	Famb mensual [-]	Mr mensual [Kpa]	CBR mensual Inferido [%]
Ene	148.830	12.89	0.98347	0.79	10	76826.79	0.1962	2.24035	-0.28683	0.51662	39690	2.900
Feb	236.641	10.53	0.98550				0.1982	2.26834	-0.28945	0.51351	39451	2.868
Mar	198.738	11.23	0.98488				0.1976	2.25976	-0.28865	0.51445	39524	2.878
Abr	177.946	11.78	0.98440				0.1971	2.25318	-0.28804	0.51518	39580	2.885
May	149.549	12.85	0.98350				0.1962	2.24073	-0.28686	0.51658	39687	2.899
Jun	4.010	79.40	0.94658				0.1593	1.78743	-0.23701	0.57941	44514	3.572
Jul	0.000	90.79	0.94186				0.1546	1.73649	-0.23038	0.58833	45199	3.673
Ago	0.000	90.79	0.94186				0.1546	1.73649	-0.23038	0.58833	45199	3.673
Sep	0.000	90.79	0.94186				0.1546	1.73649	-0.23038	0.58833	45199	3.673
Oct	278.899	10.03	0.98596				0.1987	2.27469	-0.29004	0.51281	39398	2.861
Nov	429.817	9.18	0.98674				0.1994	2.28559	-0.29105	0.51162	39306	2.849
Dic	361.992	9.45	0.98649				0.1992	2.28208	-0.29073	0.51200	39336	2.853
Anual	162.619	12.30	0.98396	0.1967	2.24707	-0.28746	0.51587	39632	2.892			

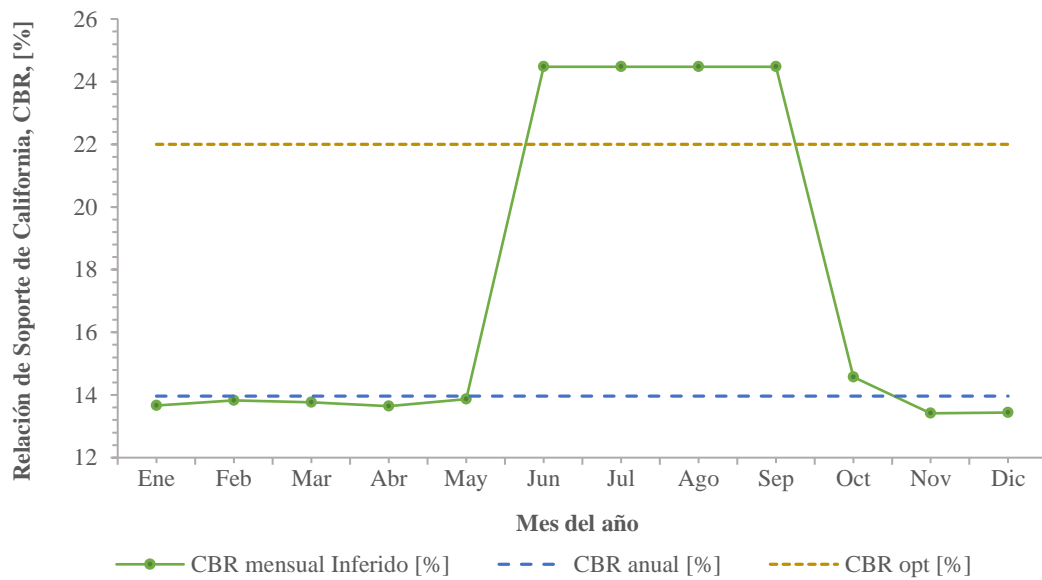
**Tabla 71: Mr Muestra de la ladrillera N2 – Promedio Series históricas**

Mes	TMI [-]	Succión Matricial [Kpa]	Saturación SWCC N-2 [%]	Sopt [%]	CBR opt [%]	Mr optimo, TRL (CBR>12) [Kpa]	S-Sopt [%]	a	b	Famb mensual [-]	Mr mensual [Kpa]	CBR mensual Inferido [%]
Ene	153.800	12.66	0.98366	0.79	10	76826.79	0.1964	2.24292	-0.28707	0.51633	39668	2.897
Feb	182.760	11.64	0.98453				0.1972	2.25486	-0.28819	0.51500	39566	2.883
Mar	169.693	12.05	0.98418				0.1969	2.25004	-0.28774	0.51553	39607	2.889
Abr	171.944	11.97	0.98424				0.1969	2.25093	-0.28783	0.51544	39599	2.888
May	136.837	13.51	0.98296				0.1957	2.23330	-0.28616	0.51742	39751	2.908
Jun	0.000	90.79	0.94186				0.1546	1.73649	-0.23038	0.58833	45199	3.673
Jul	0.000	90.79	0.94186				0.1546	1.73649	-0.23038	0.58833	45199	3.673
Ago	0.000	90.79	0.94186				0.1546	1.73649	-0.23038	0.58833	45199	3.673
Sep	0.000	90.79	0.94186				0.1546	1.73649	-0.23038	0.58833	45199	3.673
Oct	180.809	11.70	0.98448				0.1972	2.25419	-0.28813	0.51507	39571	2.884
Nov	379.729	9.37	0.98656				0.1993	2.28315	-0.29082	0.51189	39327	2.852
Dic	322.680	9.68	0.98628				0.1990	2.27917	-0.29046	0.51232	39360	2.856
Anual	137.609	13.46	0.98299	0.1957	2.23379	-0.28621	0.51736	39747	2.907			

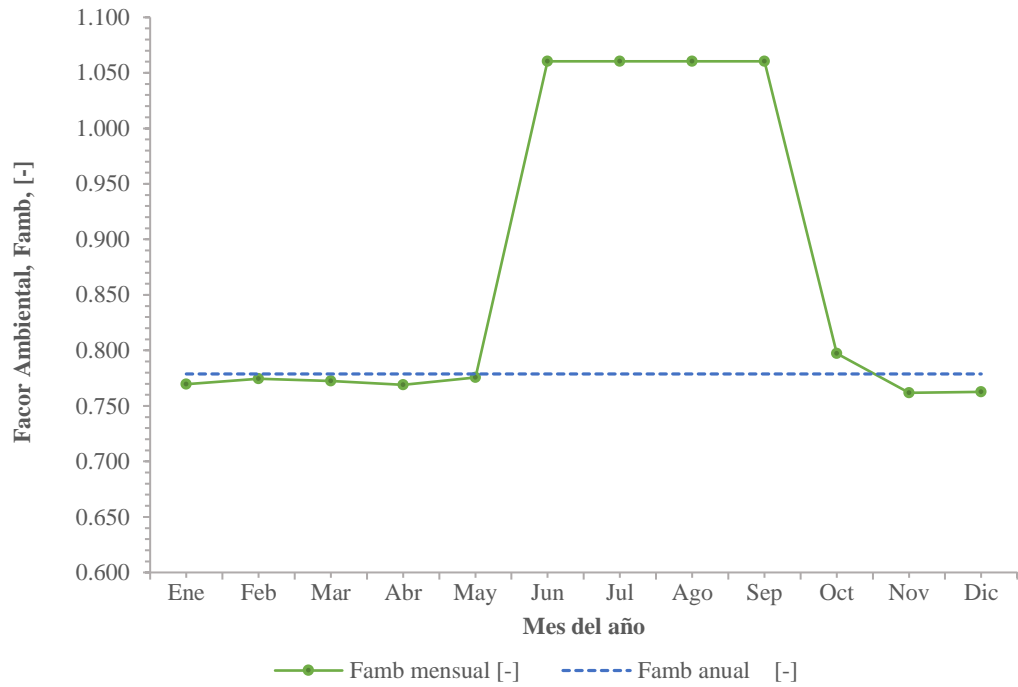




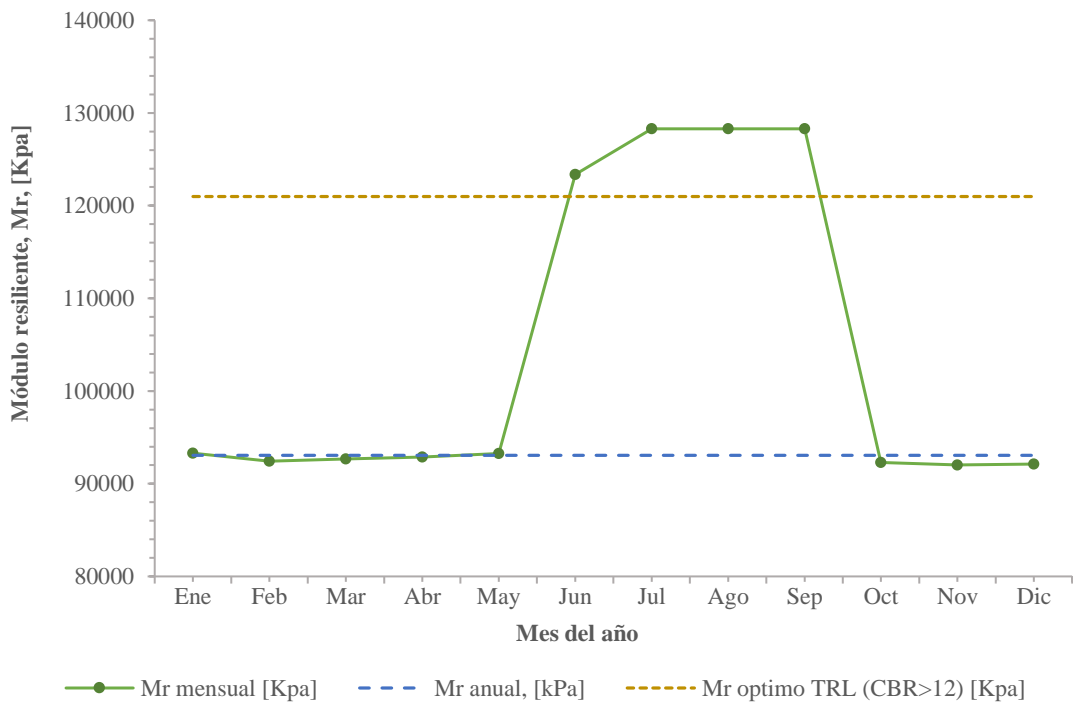
**Figura 74: Mr Muestra Ing. Civil N2-Serie histórica Estación Meteorológica Universidad del Cauca**



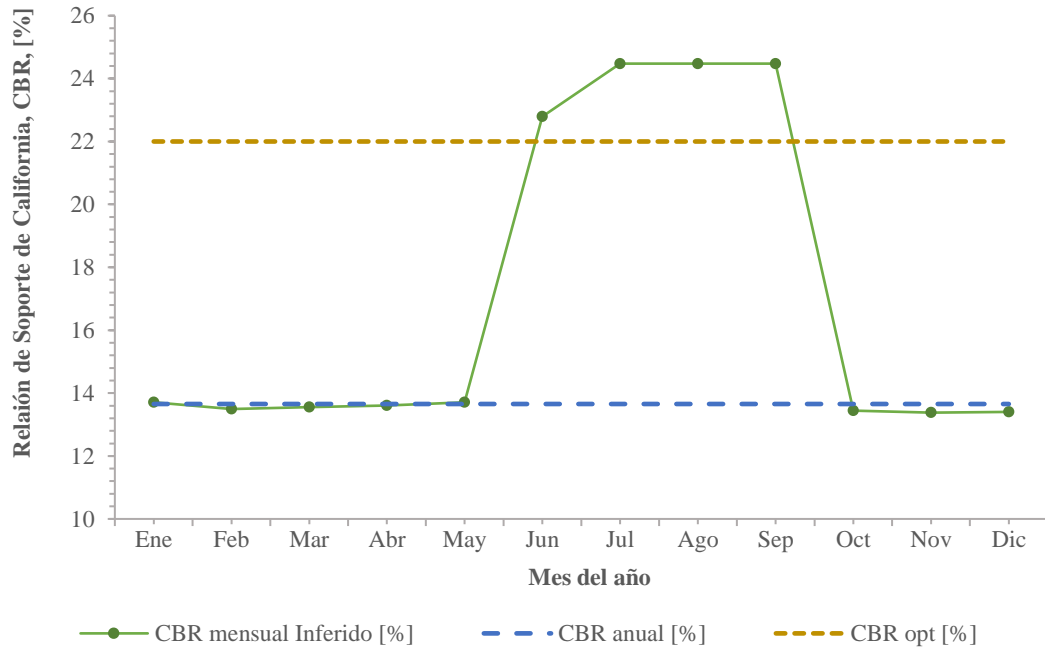
**Figura 75: CBR Muestra Ing. Civil N2-Serie histórica Estación Meteorológica Universidad del Cauca**



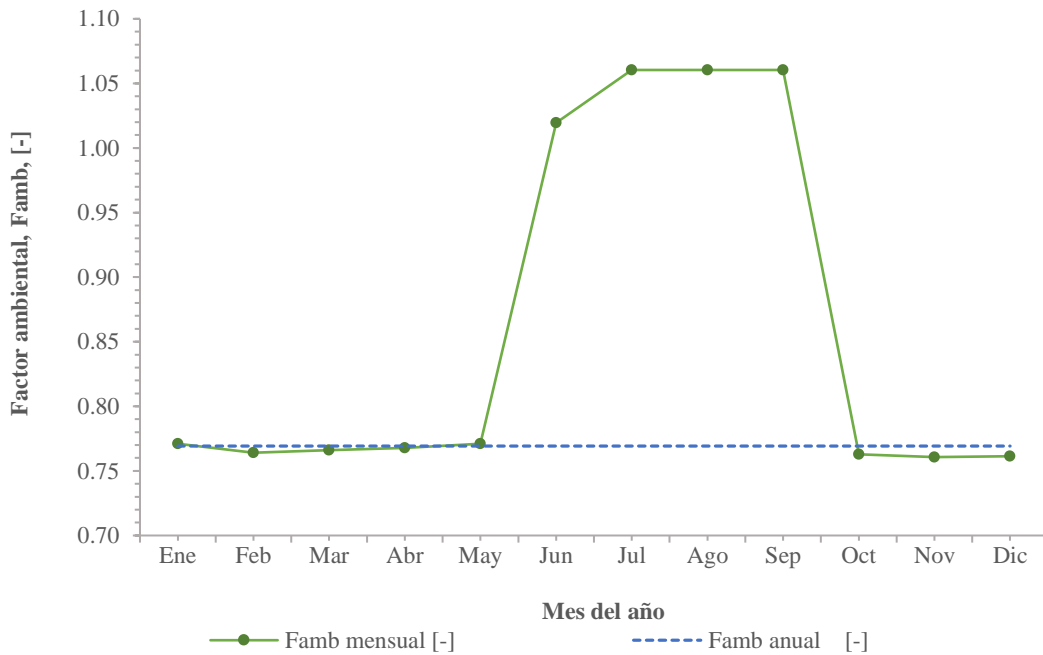
**Figura 76:  $F_{amb}$  Muestra Ing. Civil N2-Serie histórica Estación Meteorológica Universidad del Cauca**



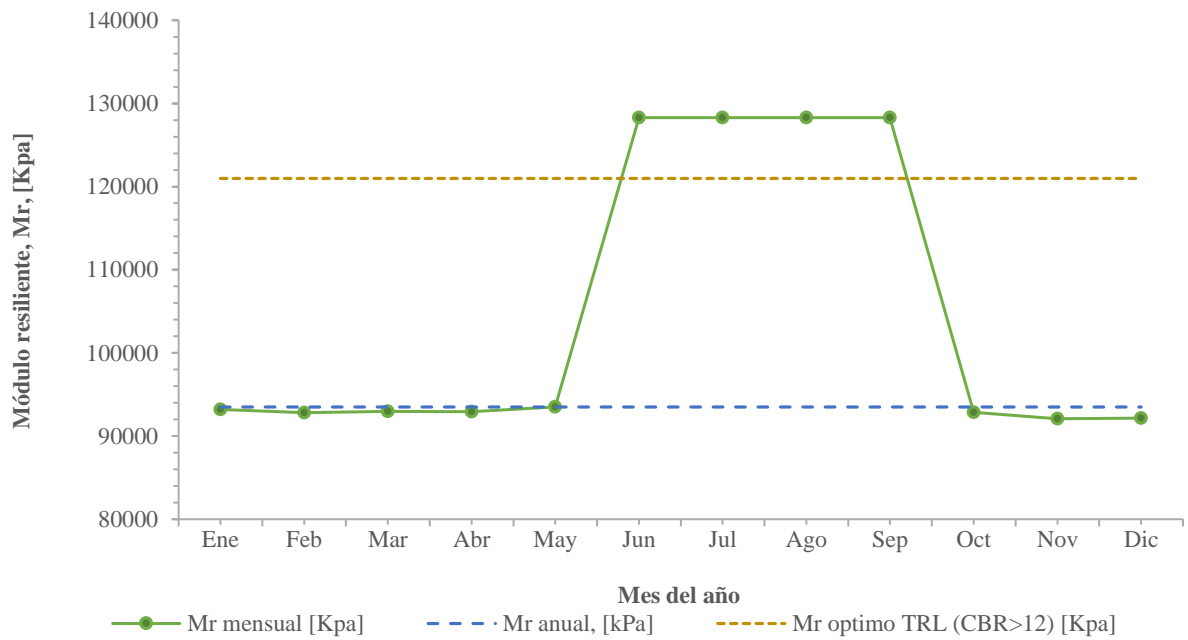
**Figura 77:  $Mr$  Muestra Ing. Civil N2-Serie histórica Estación Meteorológica Aeropuerto Guillermo Leon Valencia**



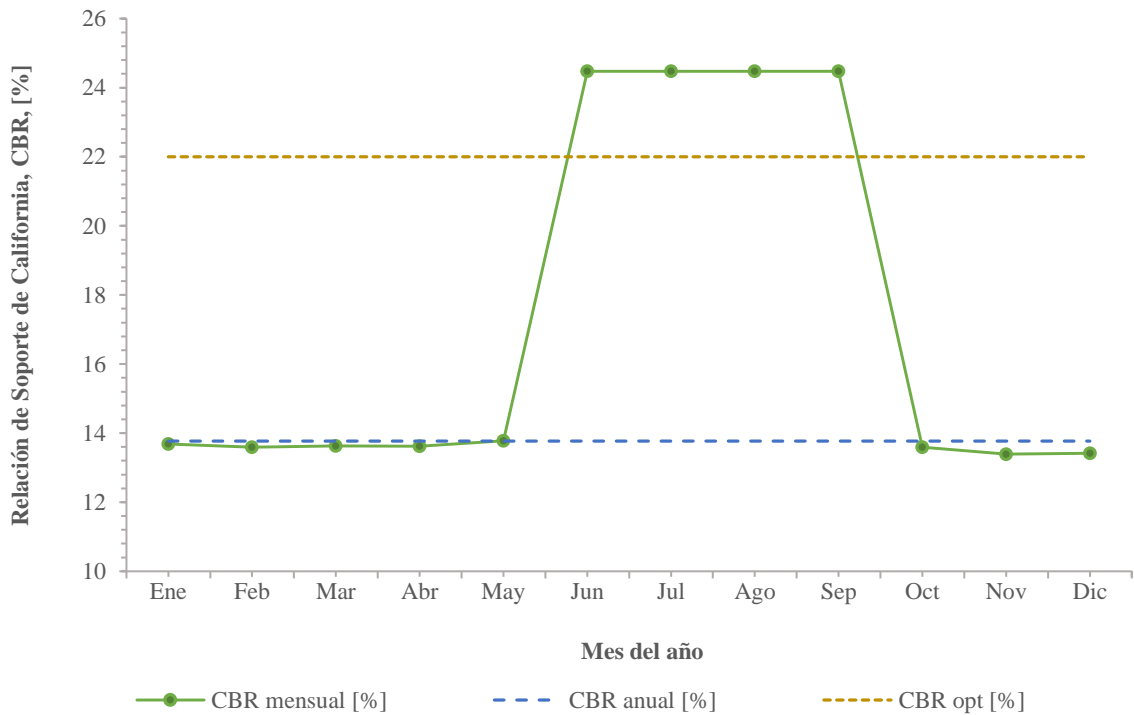
**Figura 78: CBR Muestra Ing. Civil N2-Serie histórica Estación Meteorológica Aeropuerto Guillermo Leon Valencia**



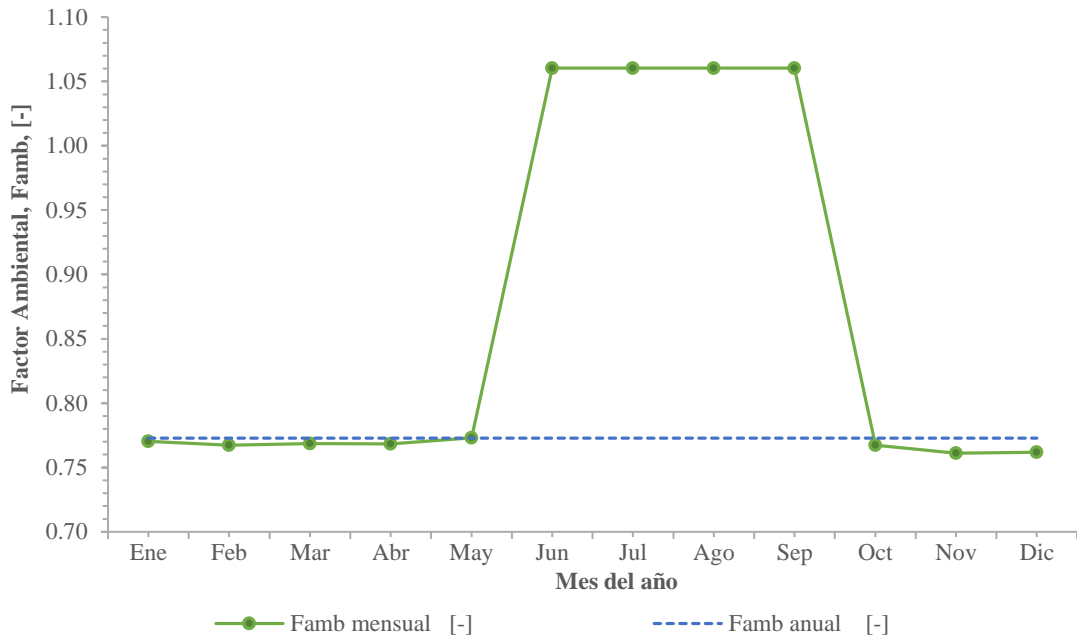
**Figura 79: Famb Muestra Ing. Civil N2-Serie histórica Estación Meteorológica Aeropuerto Guillermo Leon Valencia**



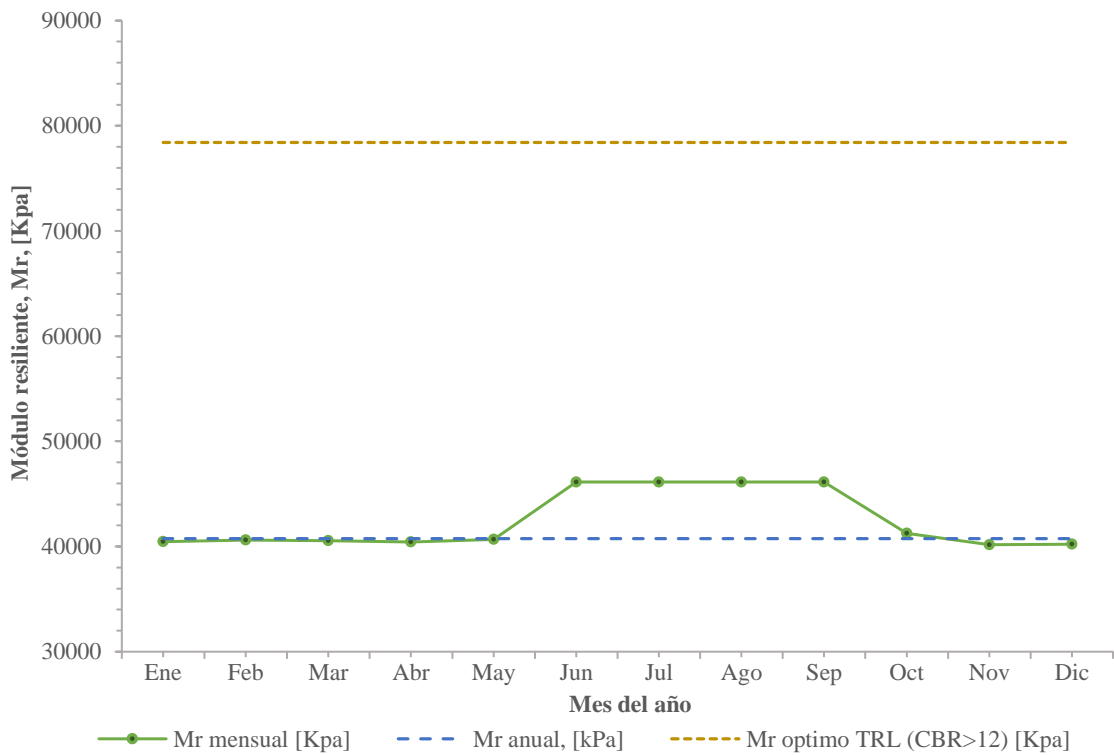
**Figura 80: Mr Muestra Ing. Civil N2- Promedio Series Históricas**



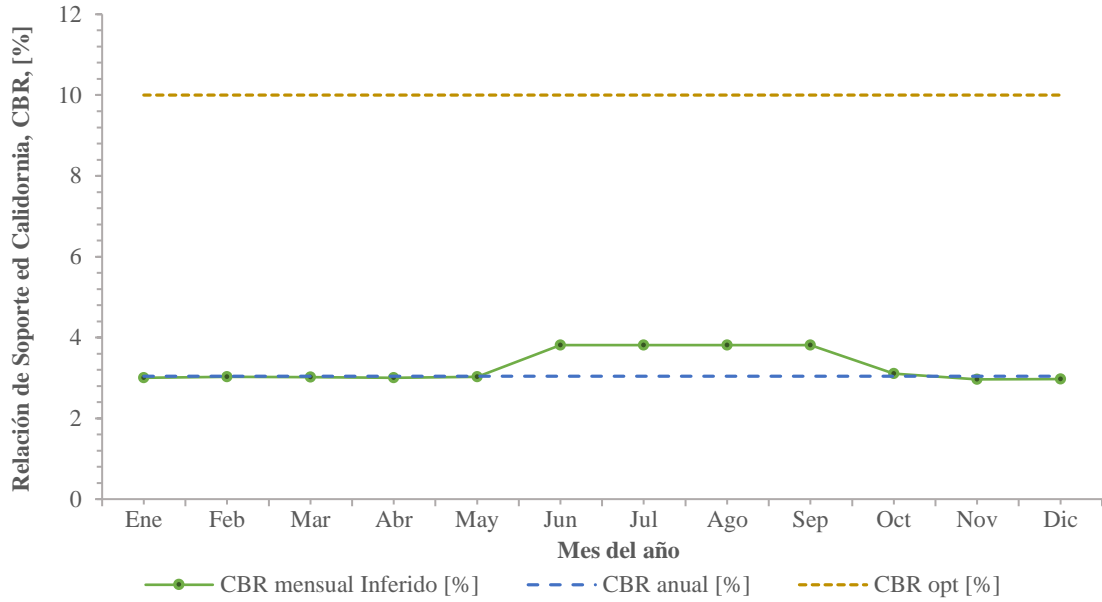
**Figura 81: CBR Muestra Ing. Civil N2- Promedio Series Históricas**



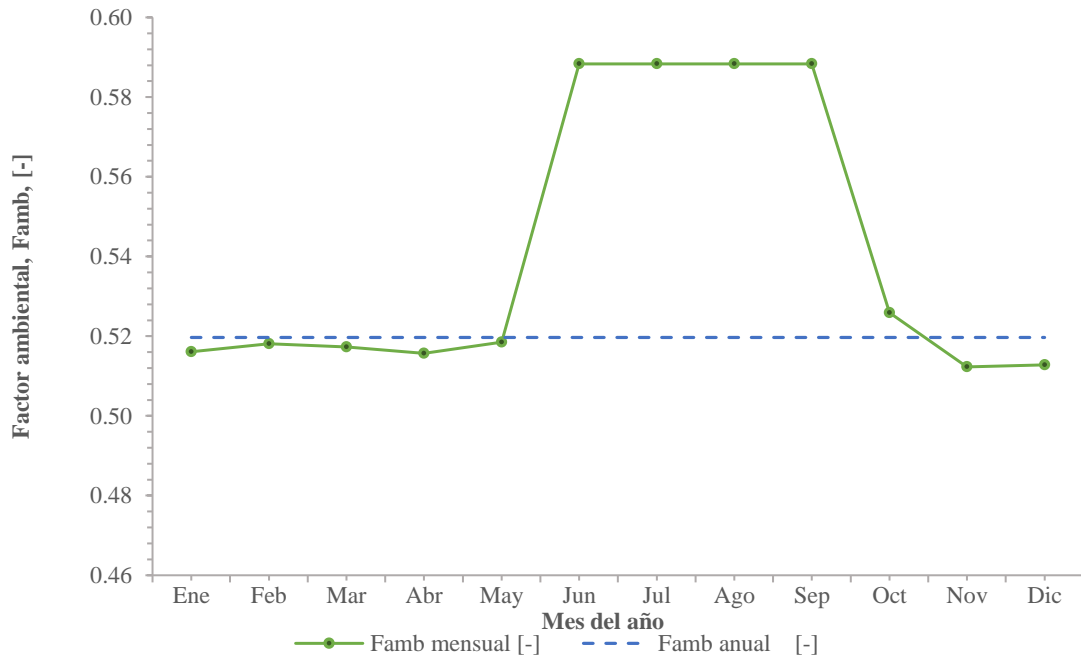
**Figura 82:  $F_{amb}$  Muestra Ing. Civil N1- Promedio Series Históricas**



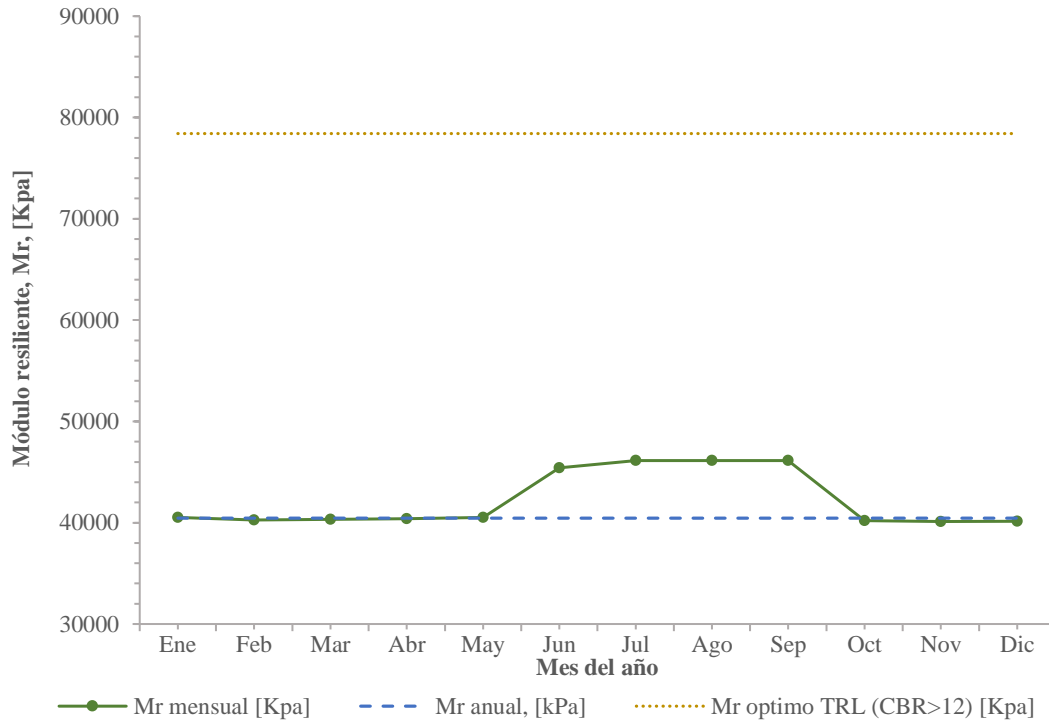
**Figura 83: Mr Muestra de la ladrillera N2 - Serie histórica Estación Meteorológica Universidad del Cauca**



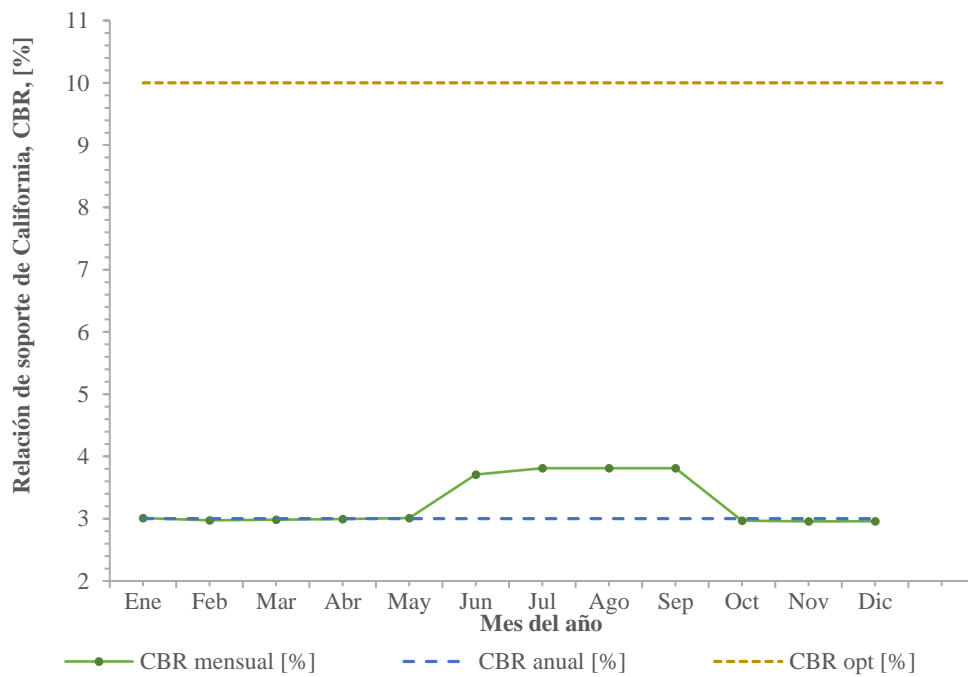
**Figura 84: CBR Muestra de la ladrillera N2 - Serie histórica Estación Meteorológica Universidad del Cauca**



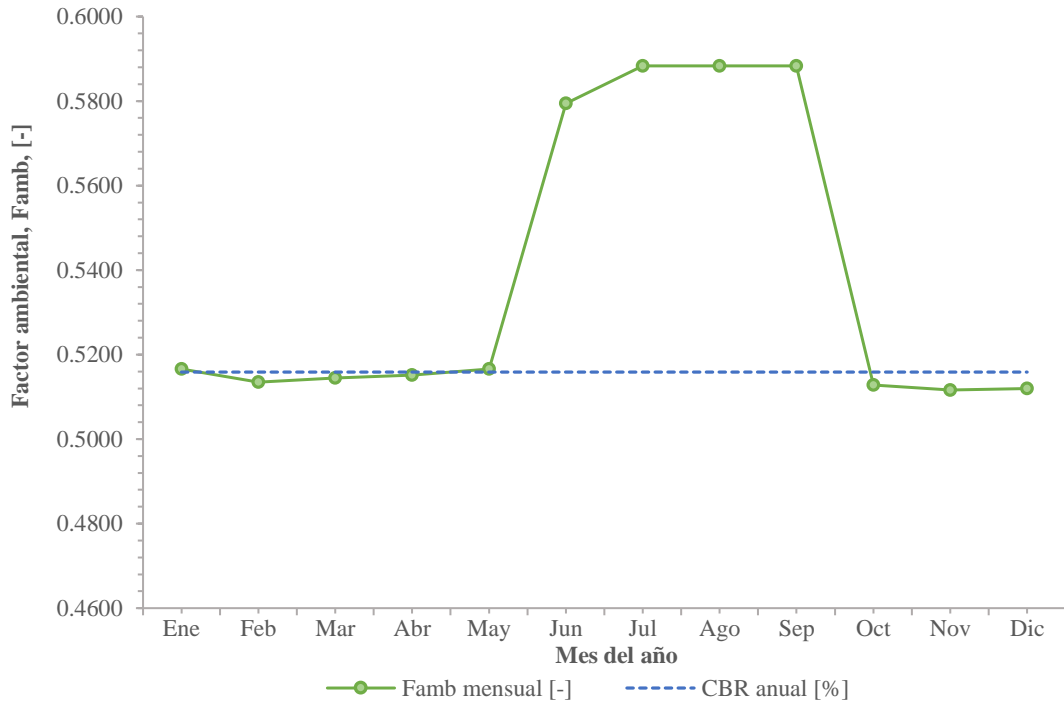
**Figura 85: Famb Muestra de la ladrillera N2 - Serie histórica Estación Meteorológica Universidad del Cauca**



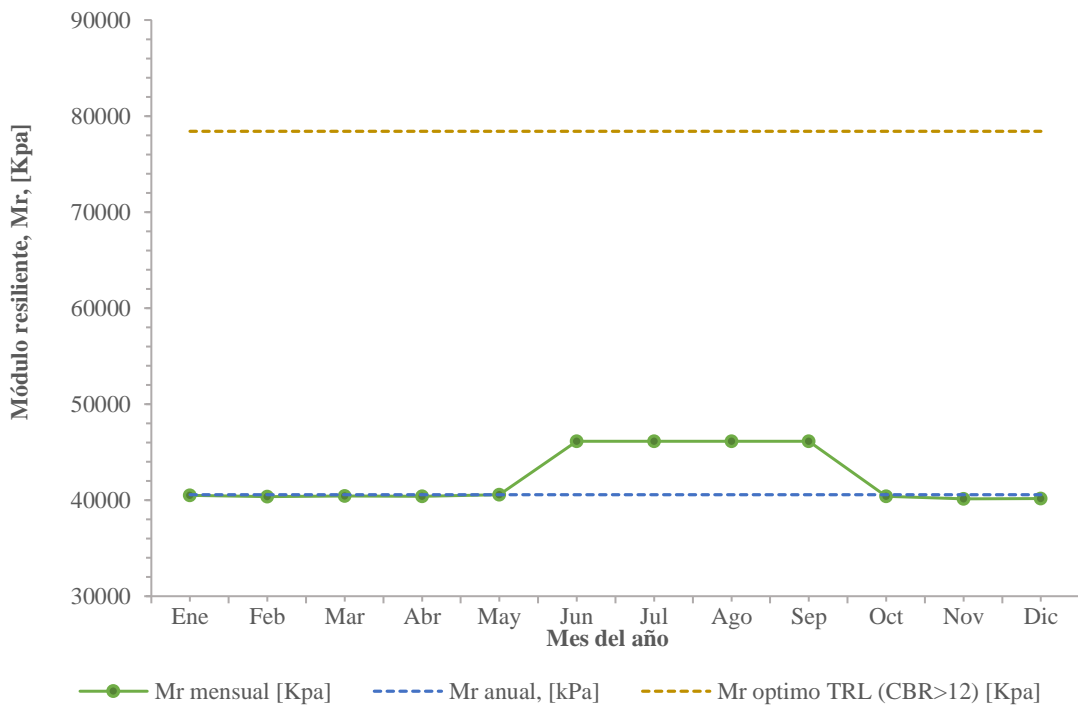
**Figura 86: Mr Muestra de la ladrillera N2 - Serie histórica Estación Meteorológica Aeropuerto Guillermo Leon Valencia**



**Figura 87: CBR Muestra de la ladrillera N2 - Serie histórica Estación Meteorológica Aeropuerto Guillermo Leon Valencia**

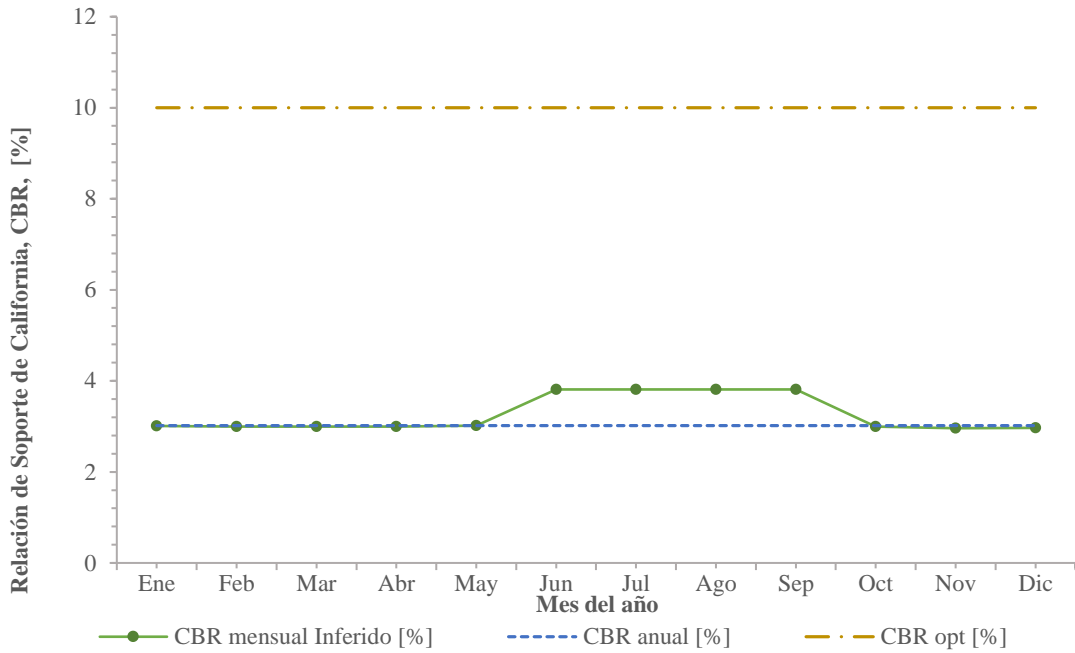


**Figura 88: Famb Muestra de la ladrillera N2 - Serie histórica Estación Meteorológica Aeropuerto Guillermo Leon Valencia**

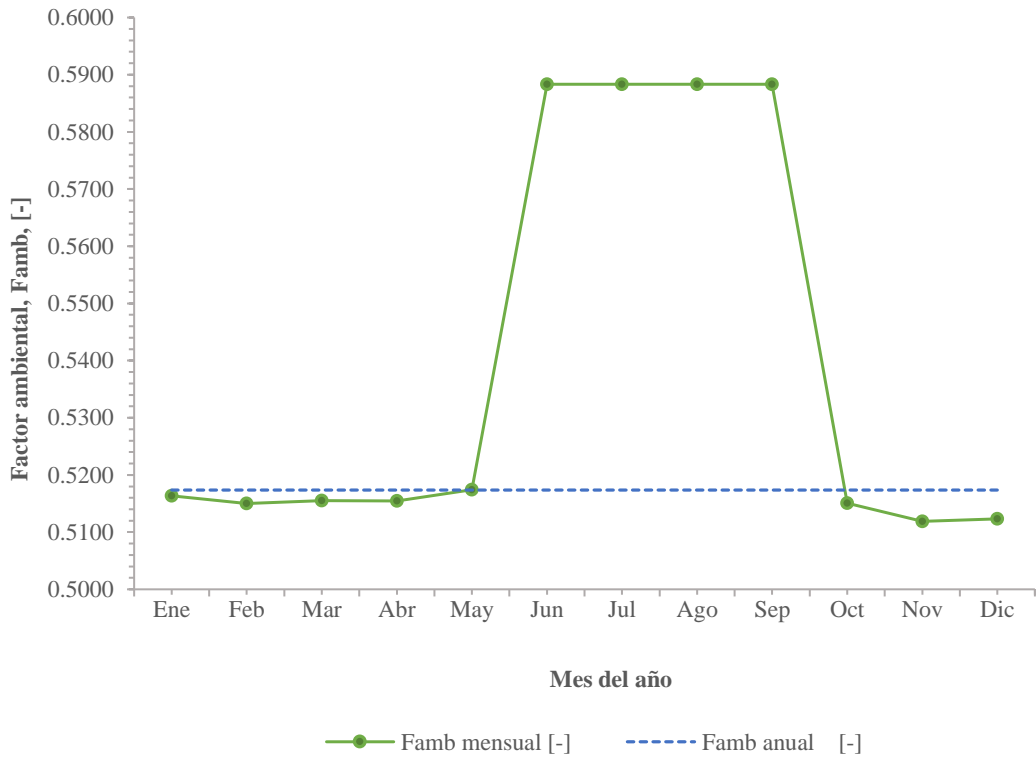


**Figura 89: Mr Muestra de la ladrillera N2 – Promedio Series históricas**





**Figura 90: CBR Muestra de la ladrillera N2 – Promedio Series históricas**

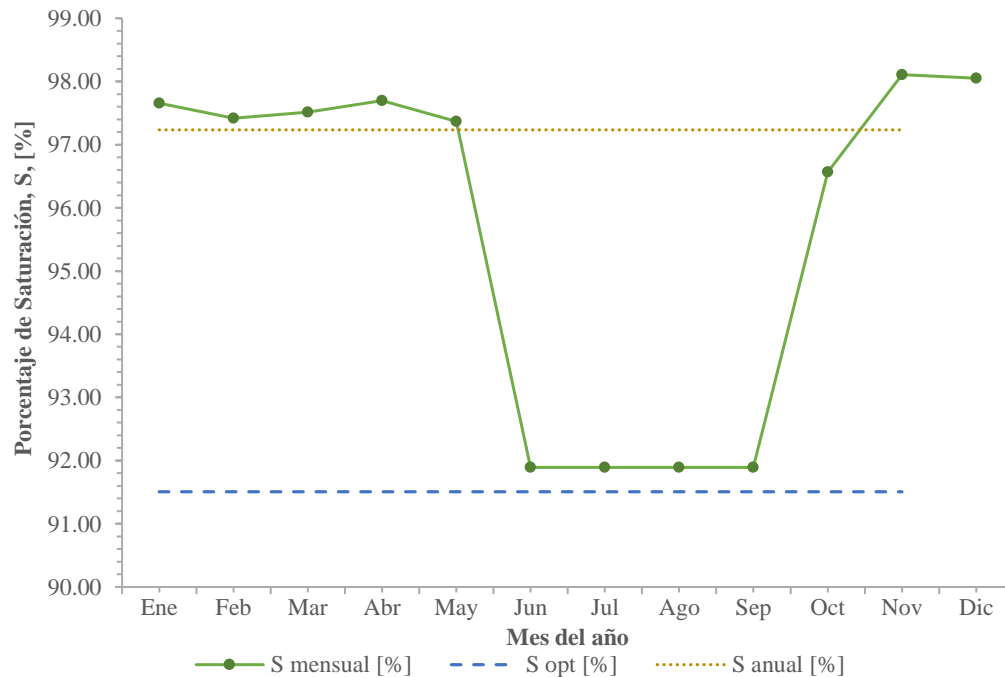


**Figura 91: Famb Muestra de la ladrillera N2 – Promedio Series históricas**

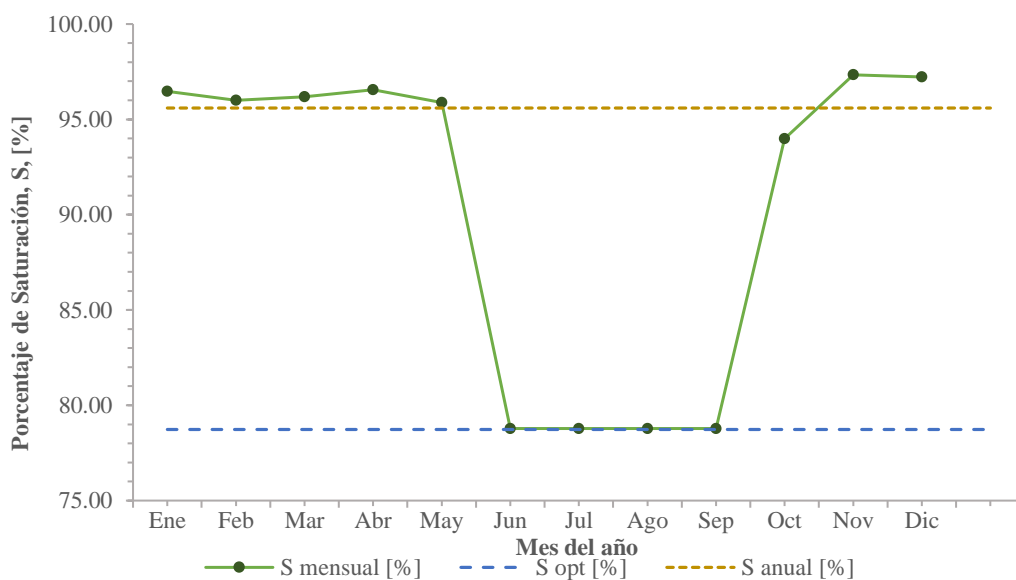
#### 4.7.2 Modulo resiliente Nivel 1

**Tabla 72: % de saturación mensual Serie Histórica estación meteorológica Universidad del Cauca.**

Mes	Ingeniería civil				La Ladrillera			
	Succión Matricial [Kpa]	C(h)	$\theta_w$	% S	Succión Matricial [Kpa]	C(h)	$\theta_w$	% S
Ene	20.40	0.9996	57.9692	97.65	12.45	0.9984	55.7824	96.47
Feb	26.13	0.9995	57.8294	97.42	14.02	0.9982	55.5046	95.99
Mar	23.76	0.9996	57.8845	97.51	13.39	0.9983	55.6163	96.19
Abr	19.51	0.9996	57.9929	97.69	12.20	0.9985	55.8278	96.55
May	27.57	0.9995	57.7973	97.37	14.39	0.9982	55.4383	95.88
Jun	507.82	0.9908	54.5488	91.89	90.79	0.9890	45.5518	78.78
Jul	507.82	0.9908	54.5488	91.89	90.79	0.9890	45.5518	78.78
Ago	507.82	0.9908	54.5488	91.89	90.79	0.9890	45.5518	78.78
Sep	507.82	0.9908	54.5488	91.89	90.79	0.9890	45.5518	78.78
Oct	54.75	0.9990	57.3246	96.57	20.66	0.9974	54.3430	93.99
Nov	11.72	0.9998	58.2384	98.11	9.65	0.9988	56.2798	97.34
Dic	12.67	0.9998	58.2038	98.05	10.01	0.9987	56.2168	97.23
Anual	31.26	0.9994	57.7196	97.23	15.32	0.9981	55.2738	95.60



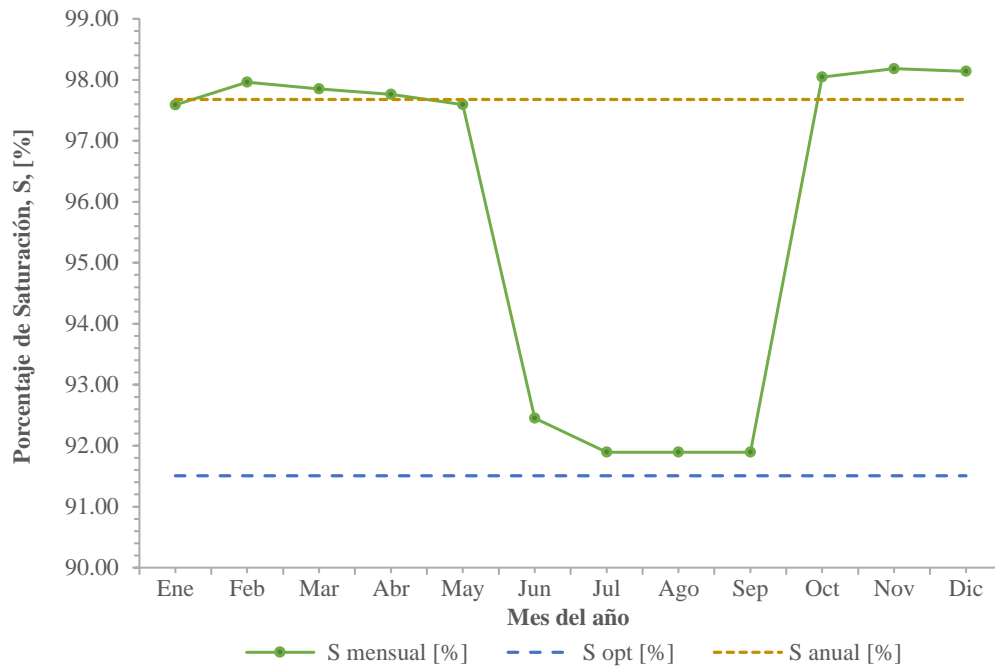
**Figura 92: % de Saturación mensual Muestra de Ing. Civil N1-Serie Histórica Estación meteorológica Universidad de Cauca.**



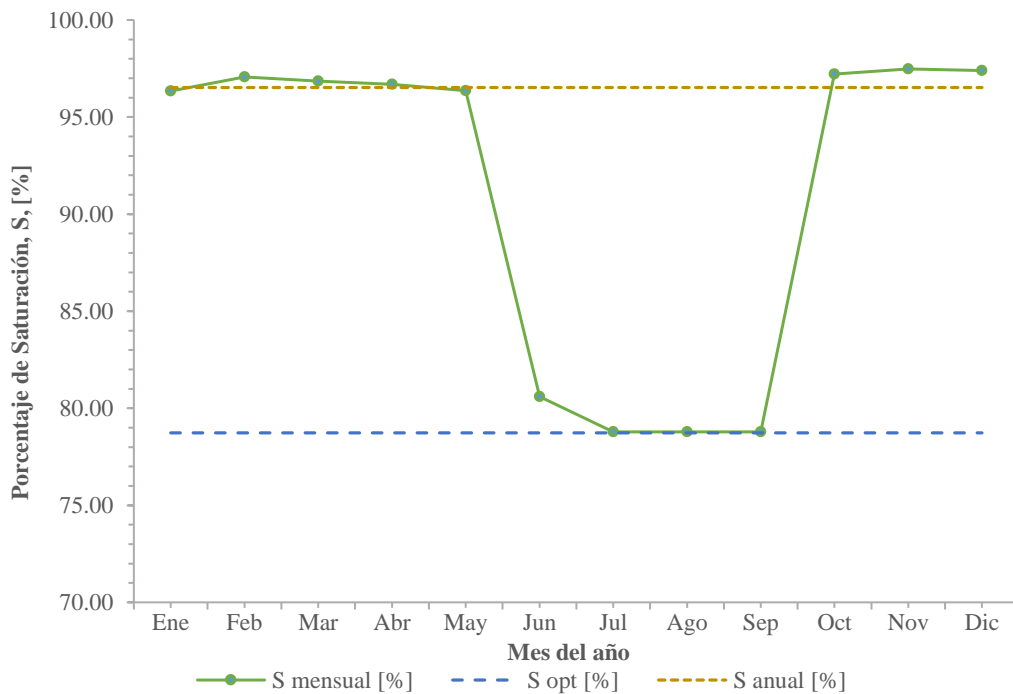
**Figura 93: % de Saturación mensual Muestra de la ladrillera N1-Serie Histórica Estación meteorológica Universidad de Cauca.**

**Tabla 73: % de saturación mensual Serie Histórica estación meteorológica Aeropuerto Guillermo león Valencia**

Mes	Ingenieria civil				La Ladrillera			
	Succión Matricial [Kpa]	C(h)	$\theta_w$	% S	Succión Matricial [Kpa]	C(h)	$\theta_w$	% S
Ene	21.93	0.9996	57.9298	97.59	12.88	0.9984	55.7059	96.34
Feb	14.17	0.9997	58.1526	97.96	10.53	0.9987	56.1237	97.07
Mar	16.32	0.9997	58.0845	97.85	11.23	0.9986	55.9994	96.85
Abr	18.11	0.9997	58.0319	97.76	11.78	0.9985	55.9016	96.68
May	21.81	0.9996	57.9328	97.59	12.85	0.9984	55.7117	96.35
Jun	423.75	0.9923	54.8787	92.45	79.41	0.9903	46.6028	80.60
Jul	507.82	0.9908	54.5488	91.89	90.79	0.9890	45.5518	78.78
Ago	507.82	0.9908	54.5488	91.89	90.79	0.9890	45.5518	78.78
Sep	507.82	0.9908	54.5488	91.89	90.79	0.9890	45.5518	78.78
Oct	12.72	0.9998	58.2020	98.05	10.03	0.9987	56.2135	97.22
Nov	10.56	0.9998	58.2831	98.18	9.18	0.9988	56.3632	97.48
Dic	11.21	0.9998	58.2578	98.14	9.45	0.9988	56.3156	97.40
Anual	19.87	0.9996	57.9832	97.68	12.30	0.9985	55.8092	96.52



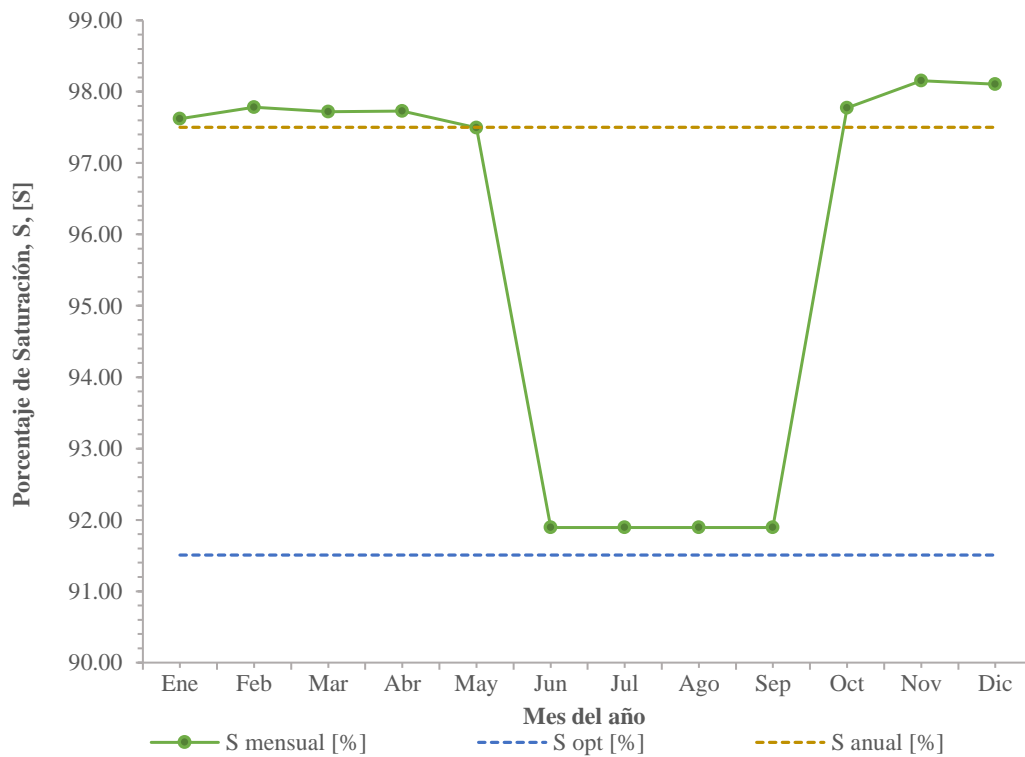
**Figura 94: % de Saturación mensual Muestra de Ing. Civil N1-Serie Histórica Estación meteorológica Aeropuerto Guillermo Leon Valencia.**



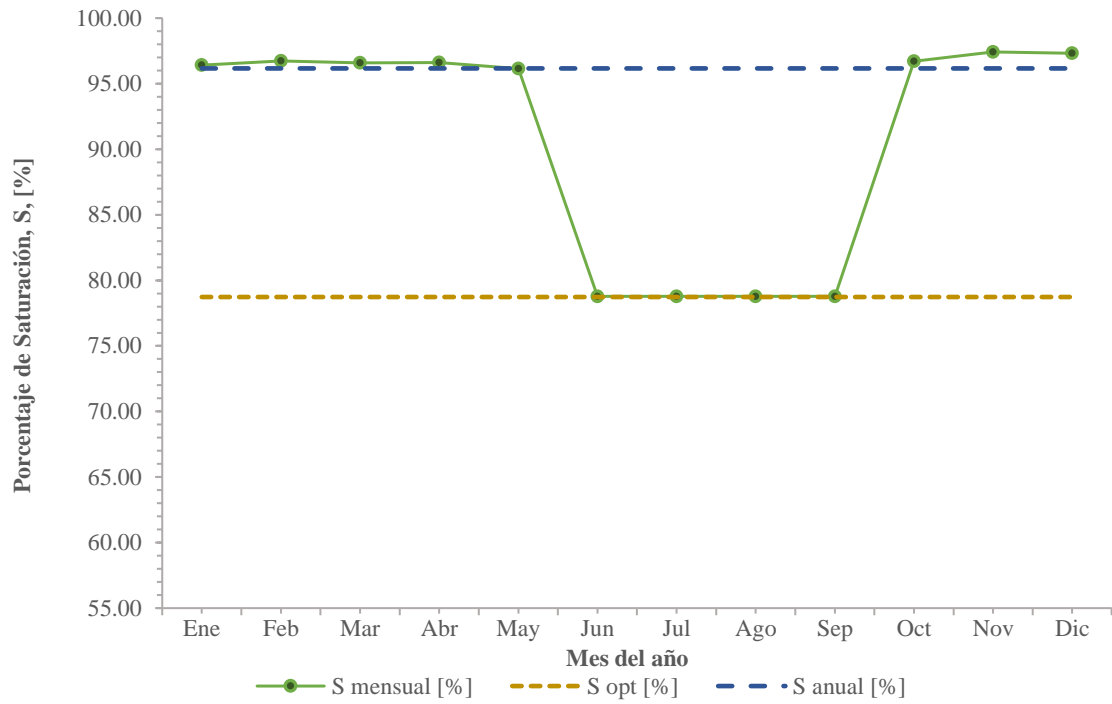
**Figura 95: % de Saturación mensual Muestra de la ladrillera N1-Serie Histórica Estación meteorológica Aeropuerto Guillermo Leon Valencia.**

**Tabla 74: % de saturación mensual Promedio Series Históricas estación meteorológica Universidad del Cauca y Aeropuerto Guillermo León Valencia**

Mes	Ingeniería civil				La Ladrillera			
	Succión Matricial [Kpa]	C(h)	$\theta w$	% S	Succión Matricial [Kpa]	C(h)	$\theta w$	% S
Ene	21.13	0.9996	57.9502	97.62	12.66	0.9984	55.7456	96.41
Feb	17.64	0.9997	58.0454	97.78	11.64	0.9985	55.9268	96.72
Mar	19.00	0.9996	58.0069	97.72	12.05	0.9985	55.8544	96.60
Abr	18.74	0.9997	58.0140	97.73	11.97	0.9985	55.8679	96.62
May	24.21	0.9996	57.8740	97.49	13.51	0.9983	55.5952	96.15
Jun	507.82	0.9908	54.5488	91.89	90.79	0.9890	45.5518	78.78
Jul	507.82	0.9908	54.5488	91.89	90.79	0.9890	45.5518	78.78
Ago	507.82	0.9908	54.5488	91.89	90.79	0.9890	45.5518	78.78
Sep	507.82	0.9908	54.5488	91.89	90.79	0.9890	45.5518	78.78
Oct	17.82	0.9997	58.0400	97.77	11.70	0.9985	55.9168	96.71
Nov	11.00	0.9998	58.2656	98.15	9.37	0.9988	56.3302	97.42
Dic	11.78	0.9998	58.2362	98.10	9.68	0.9988	56.2758	97.33
Anual	24.04	0.9996	57.8779	97.50	13.46	0.9983	55.6030	96.16



**Figura 96: % de Saturación mensual Muestra de Ingeniería Civil N1-Promedio Series Históricas.**



**Figura 97: % de Saturación mensual Muestra de La Ladrillera N1-Promedio Series Históricas.**

**Tabla 75: Mr Muestra de ing. Civil N1 - Serie histórica estación meteorológica universidad del Cauca**

Mes	TMI [-]	Succión Matricial [Kpa]	Saturación SWCC N-1 [%]	Sopt [%]	CBR opt [%]	Mr optimo, TRL (CBR>12) [Kpa]	S-Sopt [%]	a	b	Famb mensual [-]	Mr mensual [Kpa]	CBR mensual Inferido [%]
Ene	158.747	20.40	0.97655	0.92	22	120983.11	0.0615	0.98213	-0.09222	0.80868	97837	14.954
Feb	128.571	26.13	0.97419				0.0591	0.96806	-0.08864	0.81538	98647	15.180
Mar	138.952	23.76	0.97512				0.0600	0.97359	-0.09005	0.81273	98327	15.090
Abr	165.433	19.51	0.97695				0.0619	0.98453	-0.09283	0.80755	97700	14.916
May	123.210	27.57	0.97365				0.0586	0.96487	-0.08782	0.81692	98834	15.232
Jun	0.000	507.82	0.91893				0.0039	0.69018	-0.00565	0.98707	119419	21.486
Jul	0.000	507.82	0.91893				0.0039	0.69018	-0.00565	0.98707	119419	21.486
Ago	0.000	507.82	0.91893				0.0039	0.69018	-0.00565	0.98707	119419	21.486
Sep	0.000	507.82	0.91893				0.0039	0.69018	-0.00565	0.98707	119419	21.486
Oct	74.149	54.75	0.96569				0.0506	0.91895	-0.07572	0.84000	101626	16.023
Nov	326.177	11.72	0.98108				0.0660	1.00978	-0.09912	0.79595	96296	14.528
Dic	280.816	12.67	0.98050				0.0654	1.00618	-0.09823	0.79757	96493	14.582
Anual	111.839	31.26	0.97234	0.0573	0.95717	-0.08583	0.82067	99287	15.359			

**Tabla 76: Mr Muestra de ing. Civil-N1 - Serie histórica Estación meteorológica Aeropuerto Guillermo Leon Valencia**

Mes	TMI [-]	Succión Matricial [Kpa]	Saturación SWCC N-1 [%]	Sopt [%]	CBR opt [%]	Mr optimo, TRL (CBR>12) [Kpa]	S-Sopt [%]	a	b	Famb mensual [-]	Mr mensual [Kpa]	CBR mensual Inferido [%]
Ene	148.830	21.93	0.97588	0.92	22	120983.11	0.0608	0.97814	-0.09121	0.81057	98065	15.017
Feb	236.641	14.17	0.97964				0.0646	1.00088	-0.09692	0.79999	96785	14.663
Mar	198.738	16.32	0.97849				0.0634	0.99388	-0.09518	0.80320	97174	14.770
Abr	177.946	18.11	0.97760				0.0625	0.98850	-0.09383	0.80570	97476	14.853
May	149.549	21.81	0.97593				0.0609	0.97845	-0.09129	0.81042	98047	15.012
Jun	4.010	423.70	0.92449				0.0094	0.71408	-0.01385	0.96862	117187	20.761
Jul	0.000	507.82	0.91893				0.0039	0.69018	-0.00565	0.98707	119419	21.486
Ago	0.000	507.82	0.91893				0.0039	0.69018	-0.00565	0.98707	119419	21.486
Sep	0.000	507.82	0.91893				0.0039	0.69018	-0.00565	0.98707	119419	21.486
Oct	278.899	12.72	0.98047				0.0654	1.00600	-0.09819	0.79765	96503	14.585
Nov	429.817	10.56	0.98183				0.0668	1.01444	-0.10026	0.79385	96043	14.459
Dic	361.992	11.21	0.98141				0.0663	1.01180	-0.09961	0.79504	96186	14.498
Anual	162.619	19.87	0.97678	0.0617	0.98354	-0.09258	0.80802	97756	14.931			

**Tabla 77: Mr Muestra de ing. Civil N1 – Promedio Series históricas**

Mes	TMI [-]	Succión Matricial [Kpa]	Saturación SWCC N-1 [%]	Sopt [%]	CBR opt [%]	Mr optimo, TRL (CBR>12) [Kpa]	S-Sopt [%]	a	b	Famb mensual [-]	Mr mensual [Kpa]	CBR mensual Inferido [%]
Ene	153.800	21.13	0.97623	0.92	22	120983.11	0.0612	0.98020	-0.09173	0.80959	97947	14.984
Feb	182.760	17.64	0.97783				0.0628	0.98987	-0.09417	0.80506	97399	14.832
Mar	169.693	19.00	0.97718				0.0621	0.98596	-0.09319	0.80689	97620	14.893
Abr	171.944	18.74	0.97730				0.0622	0.98668	-0.09337	0.80655	97579	14.882
May	136.837	24.21	0.97494				0.0599	0.97253	-0.08978	0.81324	98388	15.107
Jun	0.000	507.82	0.91893				0.0039	0.69018	-0.00565	0.98707	119419	21.486
Jul	0.000	507.82	0.91893				0.0039	0.69018	-0.00565	0.98707	119419	21.486
Ago	0.000	507.82	0.91893				0.0039	0.69018	-0.00565	0.98707	119419	21.486
Sep	0.000	507.82	0.91893				0.0039	0.69018	-0.00565	0.98707	119419	21.486
Oct	180.809	17.82	0.97774				0.0627	0.98933	-0.09404	0.80531	97429	14.841
Nov	379.729	11.00	0.98154				0.0665	1.01261	-0.09981	0.79467	96142	14.486
Dic	322.680	11.78	0.98104				0.0660	1.00955	-0.09906	0.79605	96309	14.532
Anual	137.609	24.04	0.97501	0.0599	0.97292	-0.08988	0.81305	98366	15.101			

**Tabla 78: Mr Muestra de la ladrillera N1 – Serie histórica Estación meteorológica Universidad del Cauca**

Mes	TMI [-]	Succión Matricial [Kpa]	Saturación SWCC N-1 [%]	Sopt [%]	CBR opt [%]	Mr optimo, TRL (CBR>12) [Kpa]	S-Sopt [%]	a	b	Famb mensual [-]	Mr mensual [Kpa]	CBR mensual Inferido [%]
Ene	158.747	12.45	0.96475	0.79	10	76826.79	0.1774	1.99773	-0.26202	0.54700	42024	3.217
Feb	128.571	14.02	0.95995				0.1726	1.93983	-0.25549	0.55528	42660	3.306
Mar	138.952	13.39	0.96188				0.1746	1.96291	-0.25812	0.55192	42402	3.270
Abr	165.433	12.20	0.96553				0.1782	2.00736	-0.26308	0.54566	41921	3.203
May	123.210	14.39	0.95880				0.1715	1.92626	-0.25392	0.55728	42814	3.328
Jun	0.000	90.79	0.78781				0.0005	0.67620	-0.00075	0.99827	76694	9.605
Jul	0.000	90.79	0.78781				0.0005	0.67620	-0.00075	0.99827	76694	9.605
Ago	0.000	90.79	0.78781				0.0005	0.67620	-0.00075	0.99827	76694	9.605
Sep	0.000	90.79	0.78781				0.0005	0.67620	-0.00075	0.99827	76694	9.605
Oct	74.149	20.66	0.93986				0.1526	1.71532	-0.22755	0.59217	45495	3.716
Nov	326.177	9.65	0.97335				0.1861	2.10577	-0.27354	0.53267	40923	3.066
Dic	280.816	10.01	0.97226				0.1850	2.09176	-0.27209	0.53445	41060	3.084
Anual	111.839	15.32	0.95595	0.1687	1.89299	-0.25002	0.56232	43201	3.383			

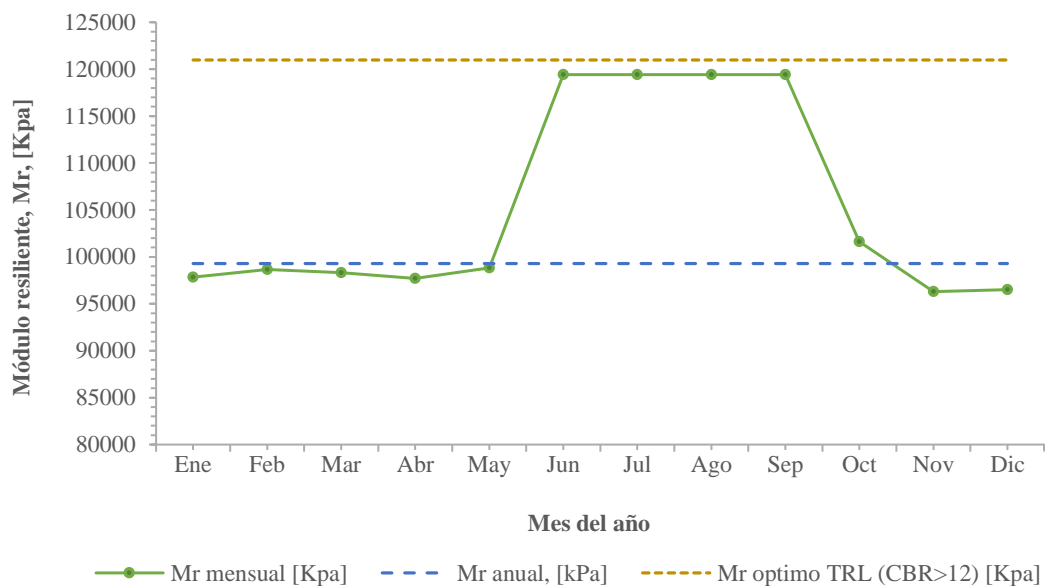


**Tabla 79: Mr Muestra de la ladrillera N1 – Serie histórica Estación meteorológica Aeropuerto Guillermo Leon Valencia.**

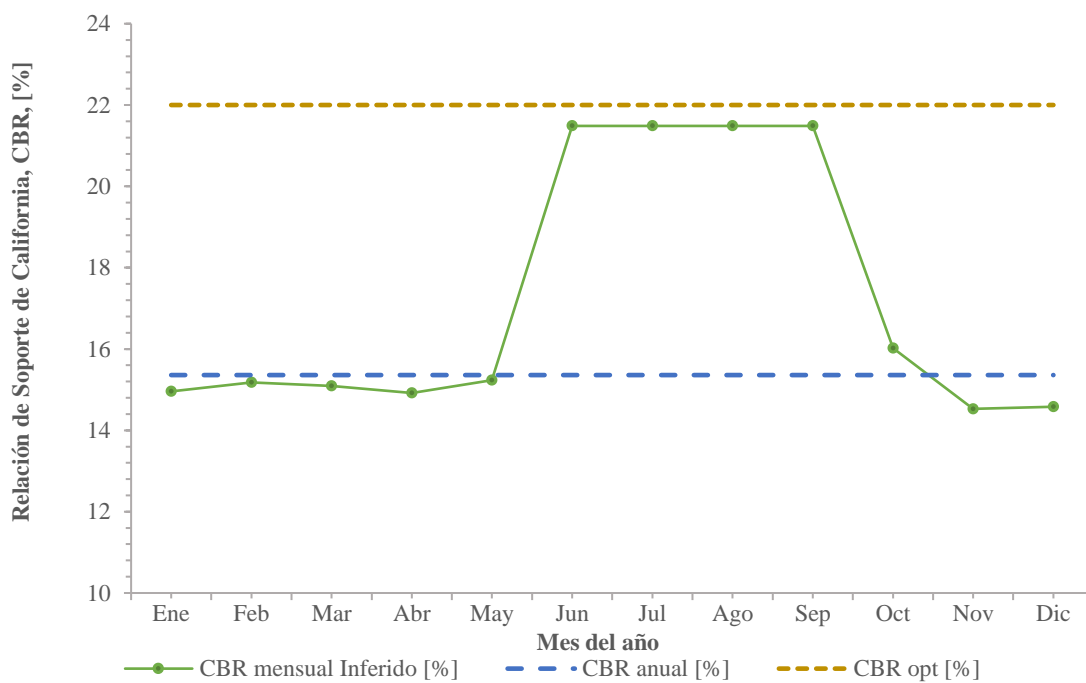
Mes	TMI [-]	Succión Matricial [Kpa]	Saturación SWCC N-1 [%]	Sopt [%]	CBR opt [%]	Mr optimo, TRL (CBR>12) [Kpa]	S-Sopt [%]	a	b	Famb mensual [-]	Mr mensual [Kpa]	CBR mensual Inferido [%]
Ene	148.837	12.88	0.96343	0.787	10	76826.79	0.1761	1.98161	-0.26022	0.54926	42198	3.241
Feb	236.641	10.53	0.97065				0.1834	2.07126	-0.26995	0.53709	41263	3.112
Mar	198.738	11.23	0.96850				0.1812	2.04416	-0.26707	0.54067	41538	3.150
Abr	177.939	11.78	0.96681				0.1795	2.02311	-0.26480	0.54350	41756	3.180
May	149.543	12.85	0.96353				0.1762	1.98284	-0.26036	0.54908	42184	3.239
Jun	4.008	79.41	0.80599				0.0187	0.75580	-0.02762	0.93839	72093	8.583
Jul	0.000	90.79	0.78781				0.0005	0.67620	-0.00075	0.99827	76694	9.605
Ago	0.000	90.79	0.78781				0.0005	0.67620	-0.00075	0.99827	76694	9.605
Sep	0.000	90.79	0.78781				0.0005	0.67620	-0.00075	0.99827	76694	9.605
Oct	278.906	10.03	0.97221				0.1849	2.09104	-0.27202	0.53454	41067	3.085
Nov	429.831	9.18	0.97479				0.1875	2.12444	-0.27545	0.53033	40743	3.041
Dic	362.003	9.45	0.97397				0.1867	2.11377	-0.27437	0.53166	40846	3.055
Anual	162.619	12.30	0.96521	0.1779	2.00341	-0.26264	0.54621	41963	3.209			

**Tabla 80: Mr Muestra de la ladrillera N1 – Promedio Series históricas**

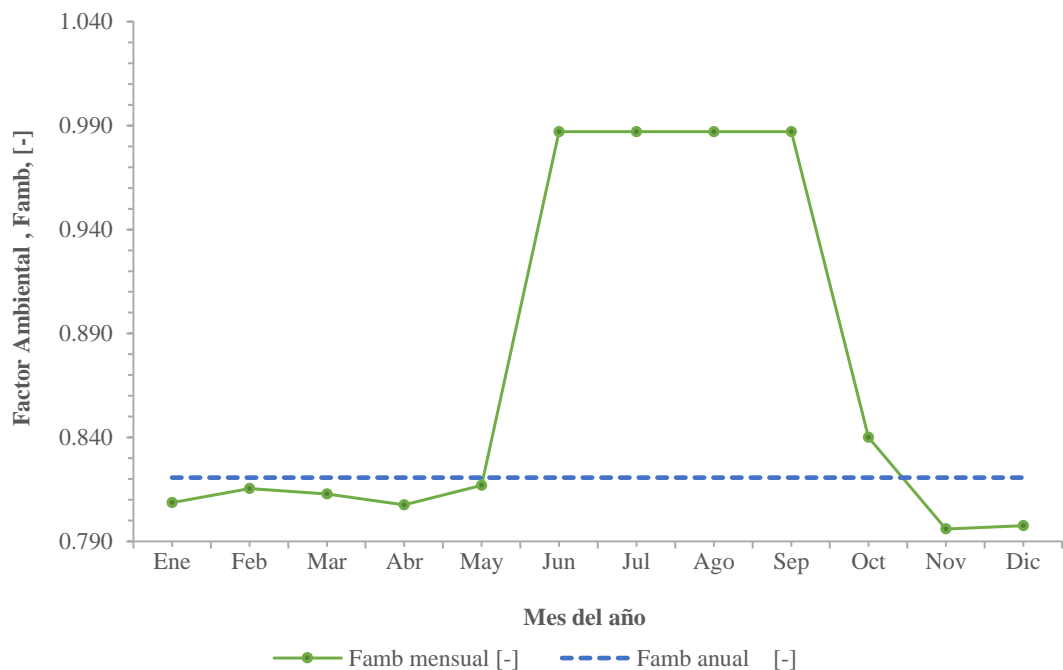
Mes	TMI [-]	Succión Matricial [Kpa]	Saturación SWCC N-1 [%]	Sopt [%]	CBR opt [%]	Mr optimo, TRL (CBR>12) [Kpa]	S-Sopt [%]	a	b	Famb mensual [-]	Mr mensual [Kpa]	CBR mensual Inferido [%]
Ene	153.800	12.66	0.96411	0.79	10	76826.79	0.1768	1.98998	-0.26116	0.54808	42107	3.229
Feb	182.760	11.64	0.96725				0.1799	2.02850	-0.26538	0.54277	41699	3.172
Mar	169.693	12.05	0.96600				0.1787	2.01303	-0.26370	0.54488	41861	3.195
Abr	171.944	11.97	0.96623				0.1789	2.01589	-0.26401	0.54449	41831	3.190
May	136.837	13.51	0.96151				0.1742	1.95852	-0.25762	0.55256	42451	3.277
Jun	0.000	90.79	0.78781				0.0005	0.67620	-0.00075	0.99827	76694	9.605
Jul	0.000	90.79	0.78781				0.0005	0.67620	-0.00075	0.99827	76694	9.605
Ago	0.000	90.79	0.78781				0.0005	0.67620	-0.00075	0.99827	76694	9.605
Sep	0.000	90.79	0.78781				0.0005	0.67620	-0.00075	0.99827	76694	9.605
Oct	180.809	11.70	0.96707				0.1798	2.02636	-0.26515	0.54306	41722	3.175
Nov	379.729	9.37	0.97422				0.1869	2.11703	-0.27470	0.53125	40814	3.051
Dic	322.680	9.68	0.97328				0.1860	2.10487	-0.27345	0.53278	40932	3.067
Anual	137.609	13.46	0.96165	0.1743	1.96014	-0.25781	0.55232	42433	3.274			



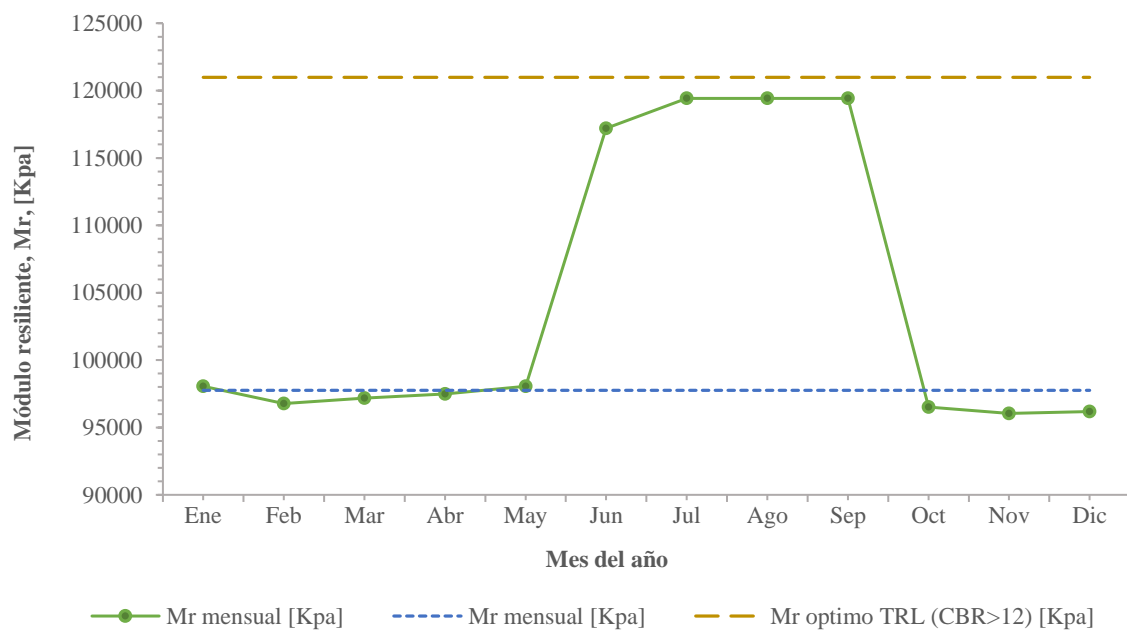
**Figura 98: Mr Muestra Ing. Civil N1-Serie histórica Estación Meteorológica Universidad del Cauca**



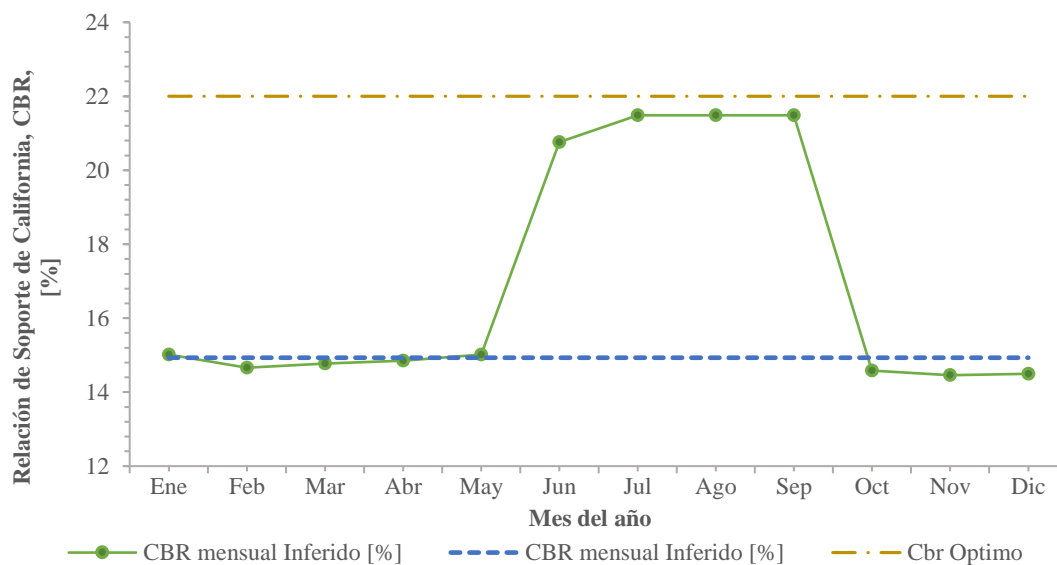
**Figura 99: CBR Muestra Ing. Civil N1-Serie histórica Estación Meteorológica Universidad del Cauca**



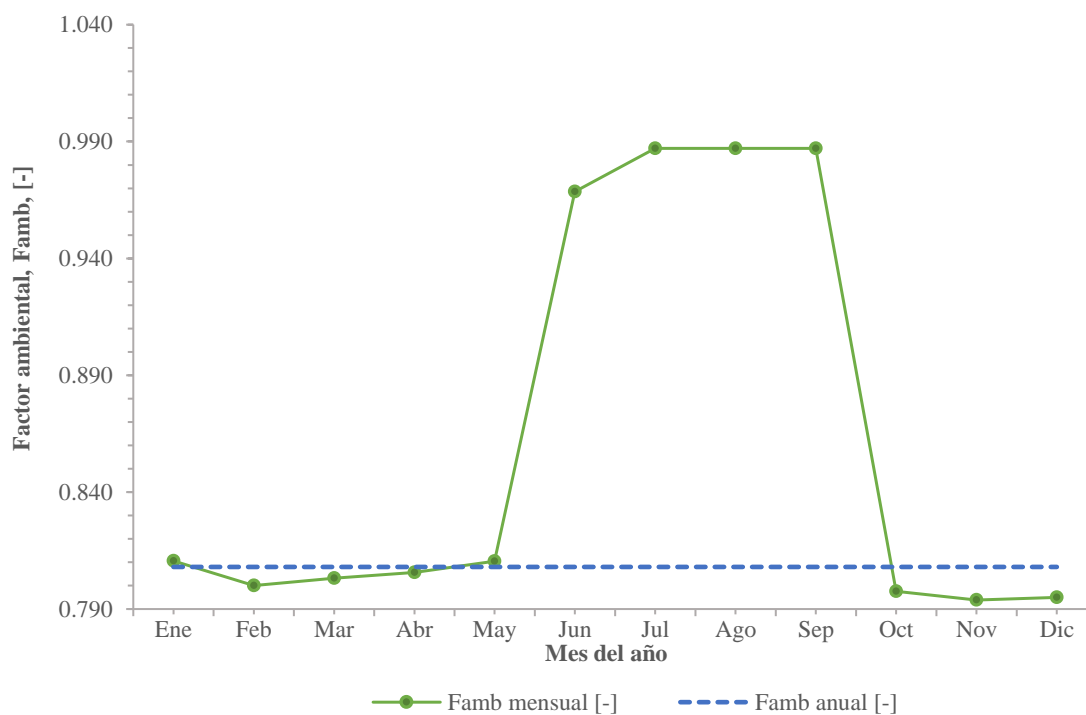
**Figura 100:  $F_{amb}$  Muestra Ing. Civil N1-Serie histórica Estación Meteorológica Universidad del Cauca**



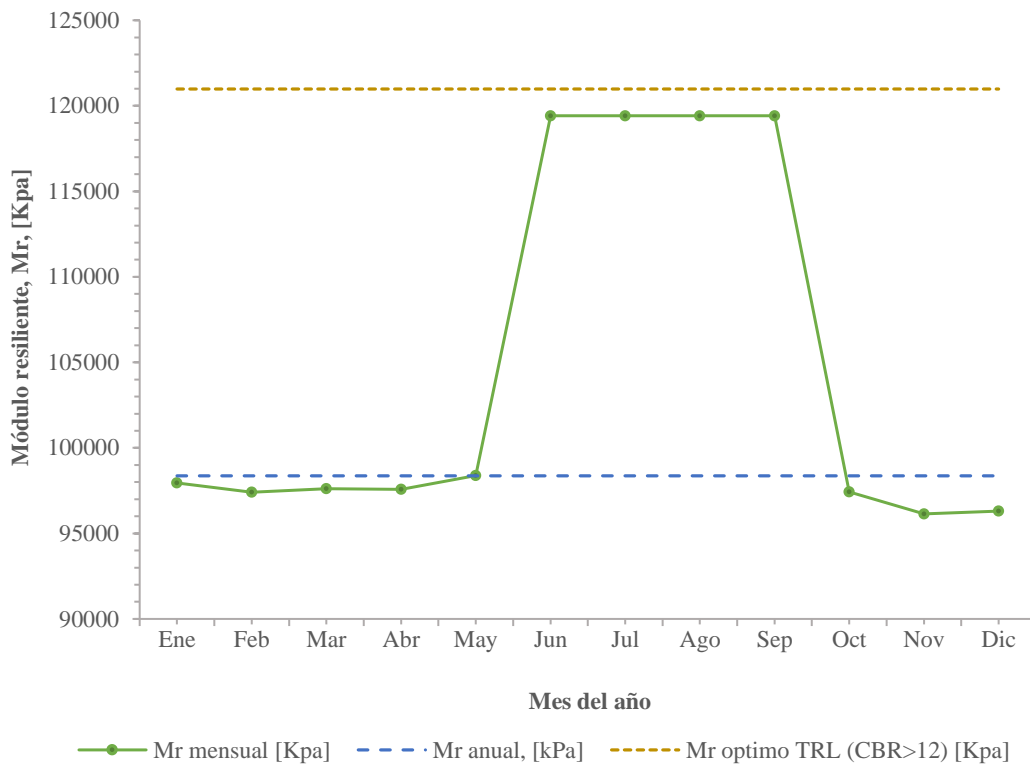
**Figura 101: Mr Muestra Ing. Civil N1-Serie histórica Estación Meteorológica Aeropuerto Guillermo Leon Valencia**



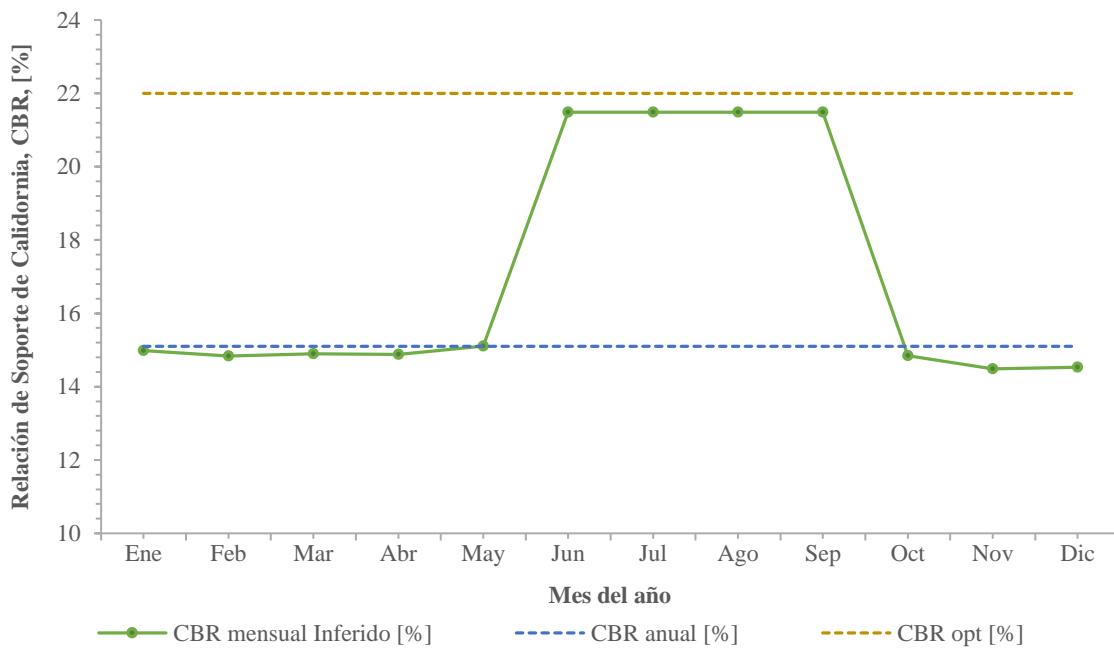
**Figura 102: CBR Muestra Ing. Civil N1-Serie histórica Estación Meteorológica Aeropuerto Guillermo Leon Valencia**



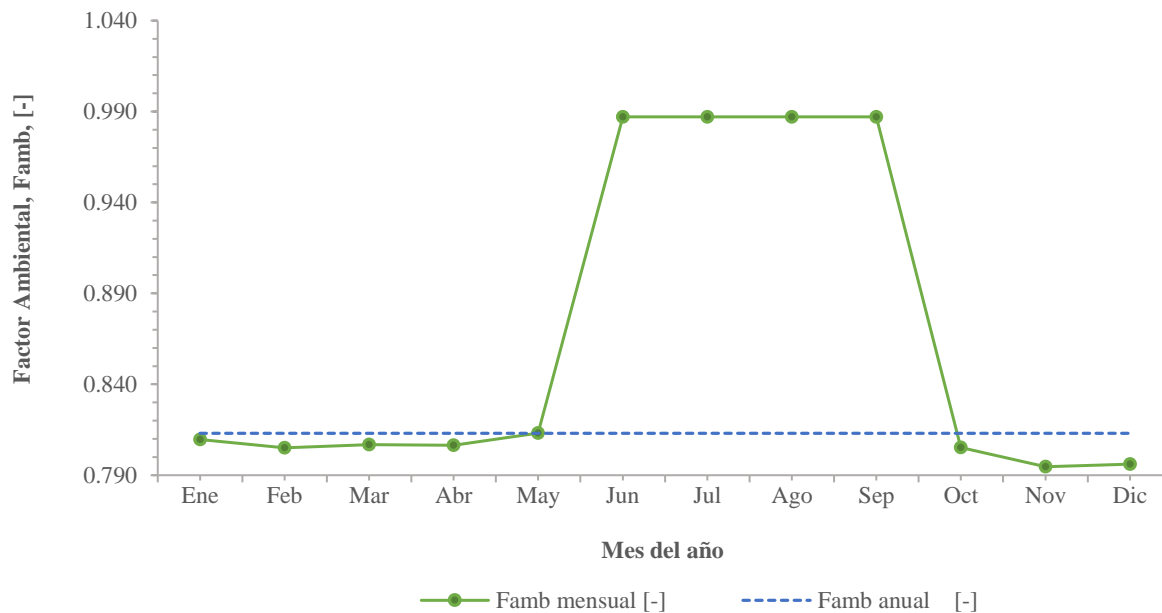
**Figura 103: F<sub>amb</sub> Muestra Ing. Civil N1-Serie histórica Estación Meteorológica Aeropuerto Guillermo Leon Valencia**



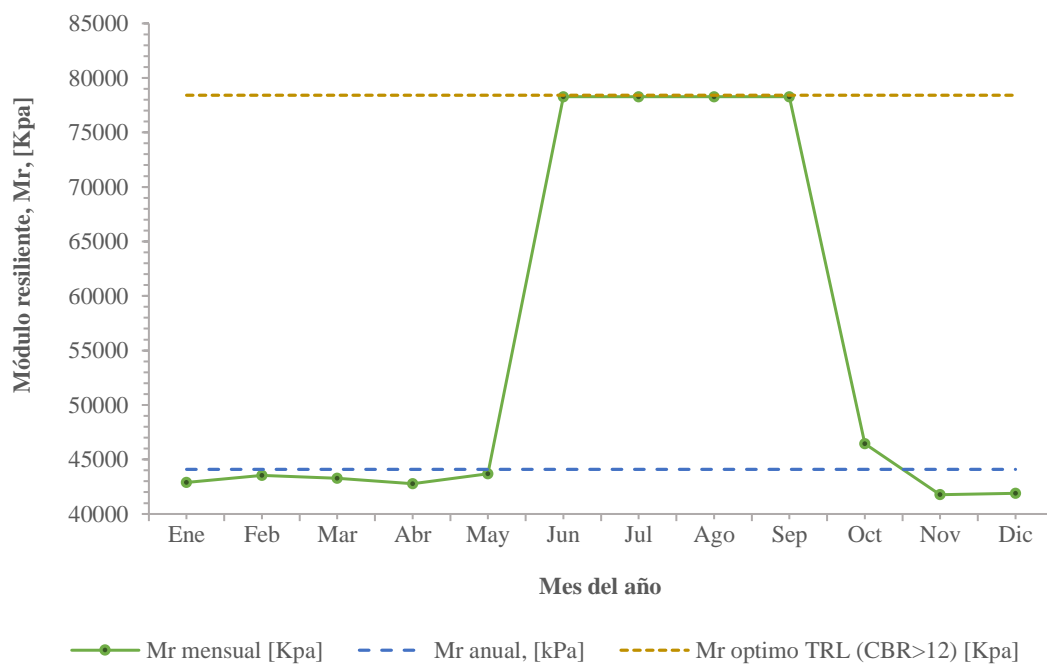
**Figura 104: Mr Muestra Ing. Civil N1- Promedio Series Históricas**



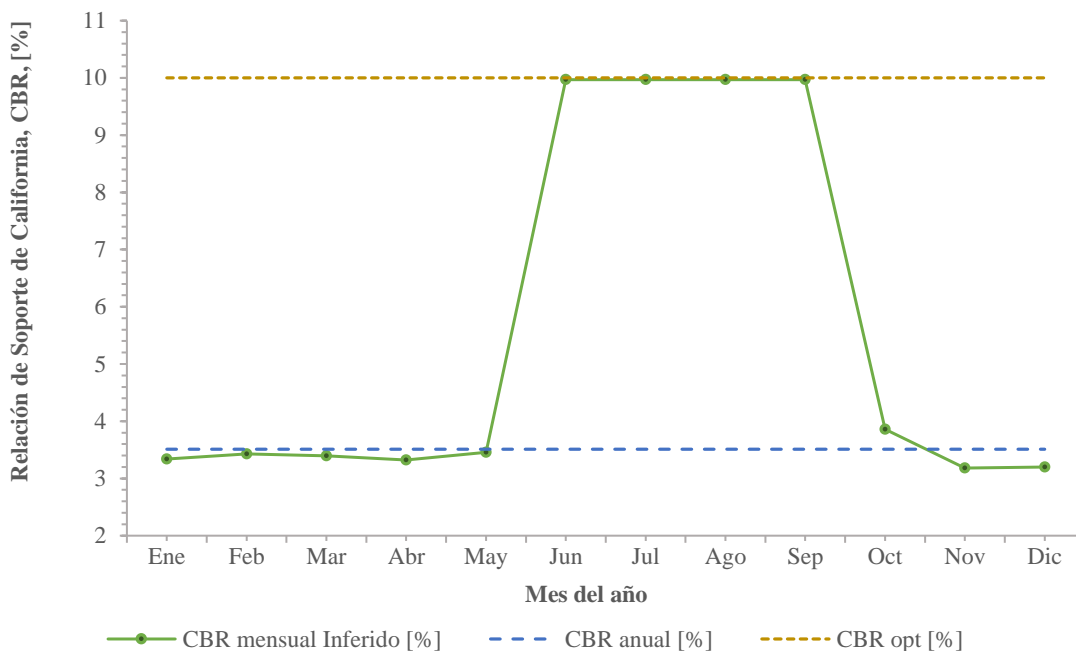
**Figura 105: CBR Muestra Ing. Civil N1- Promedio Series Históricas**



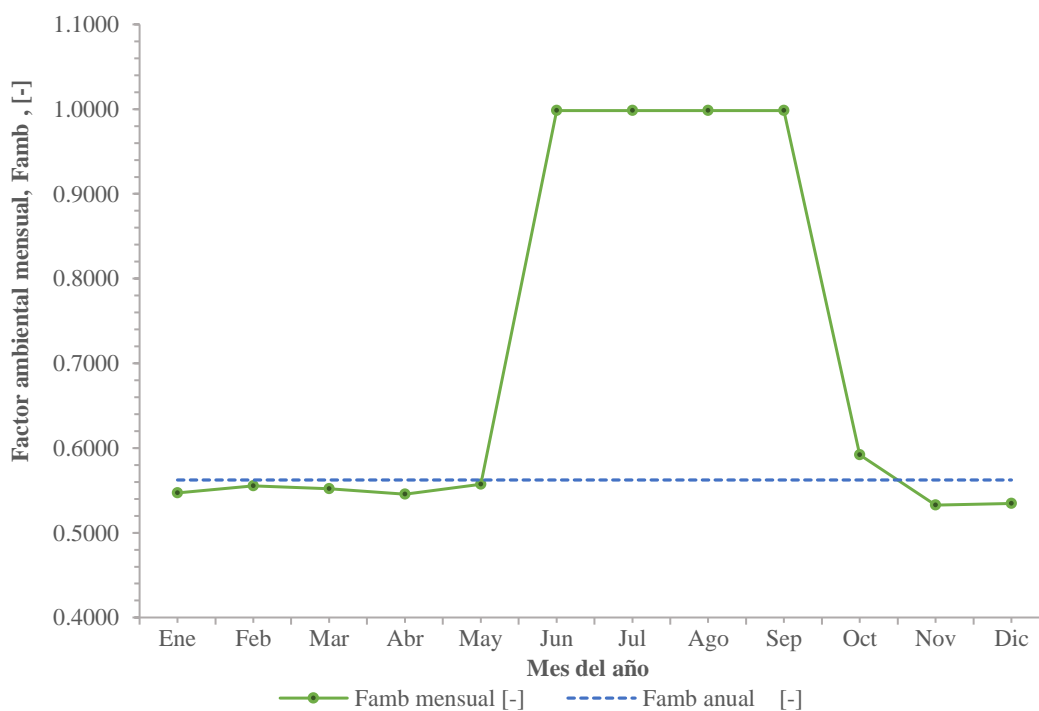
**Figura 106: Famb Muestra Ing. Civil N1- Promedio Series Históricas**



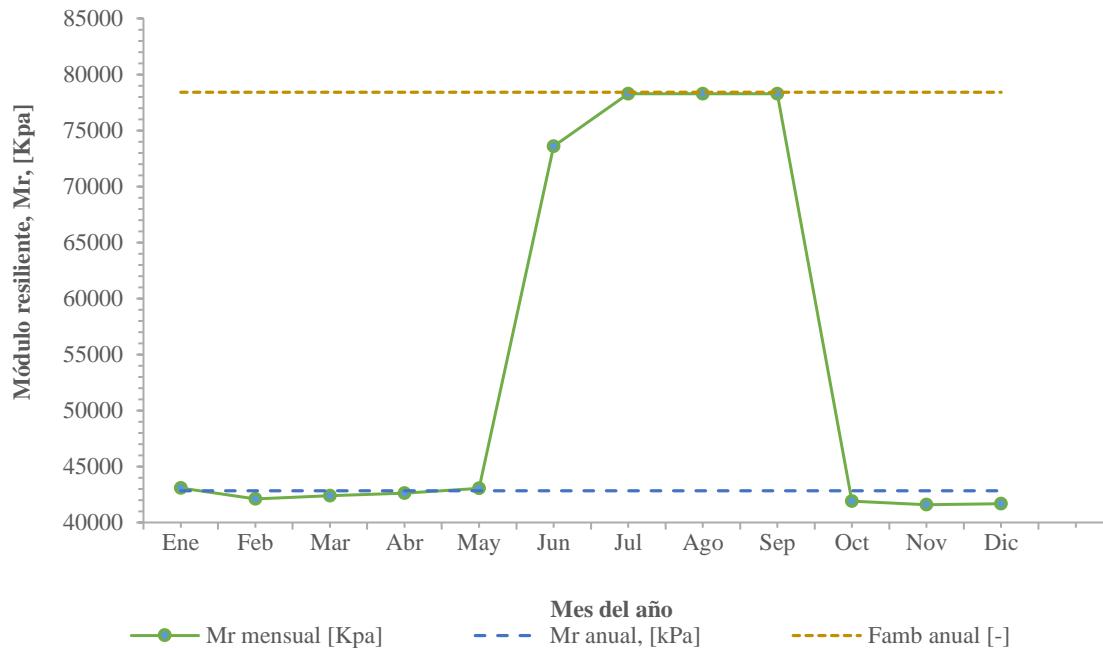
**Figura 107: Mr Muestra de la ladrillera N1 - Serie histórica Estación Meteorológica Universidad del Cauca**



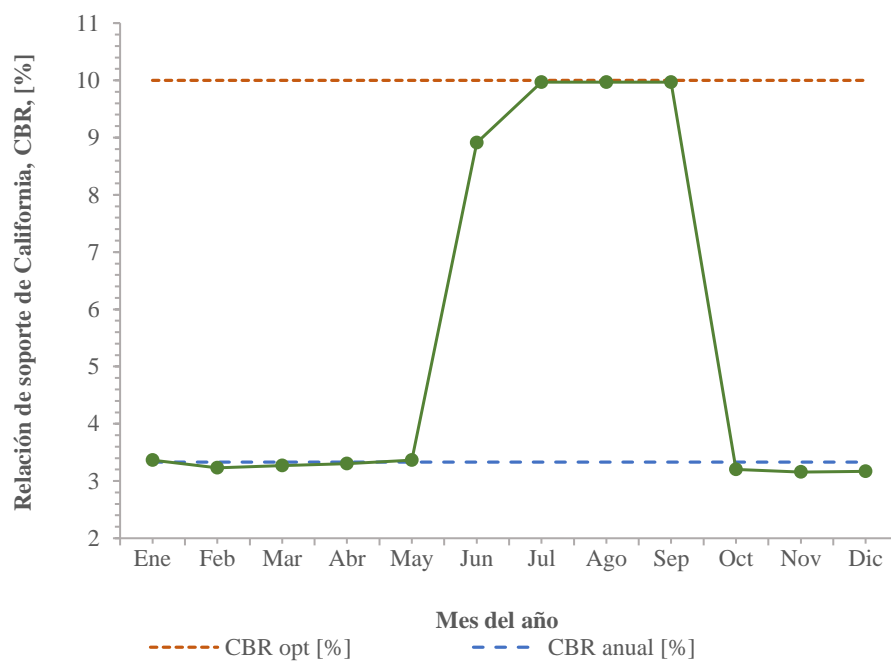
**Figura 108: CBR Muestra de la ladrillera N1 - Serie histórica Estación Meteorológica Universidad del Cauca**



**Figura 109: Famb Muestra de la ladrillera N1 - Serie histórica Estación Meteorológica Universidad del Cauca**

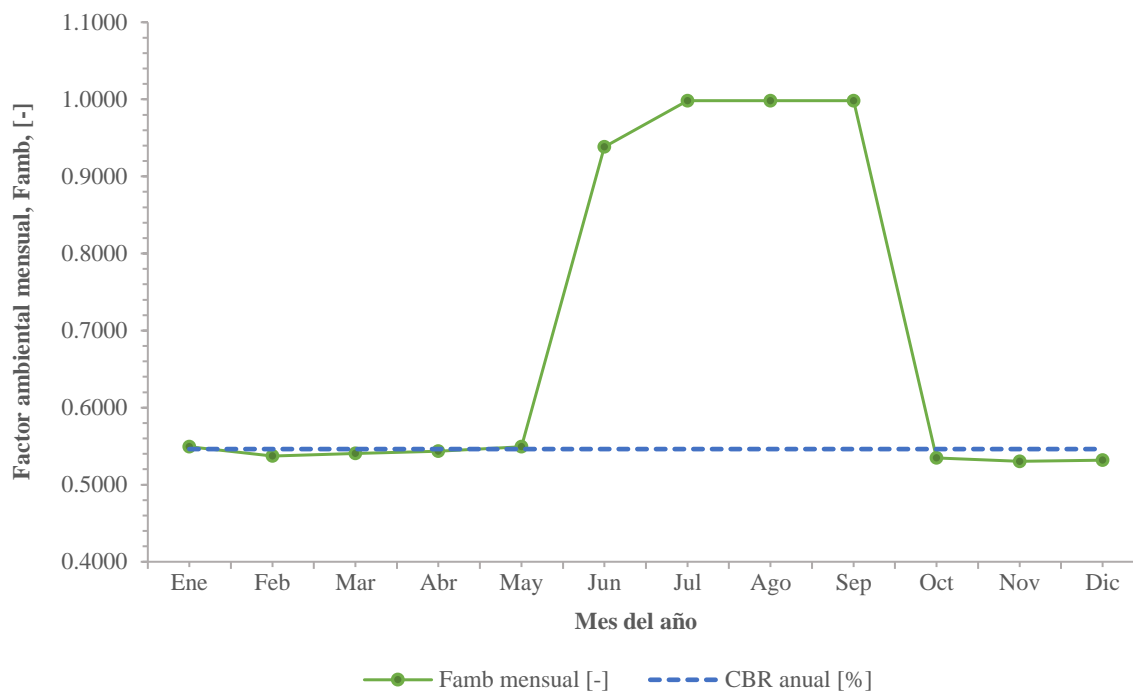


**Figura 110: Mr Muestra de la ladrillera N1 - Serie histórica Estación Meteorológica Aeropuerto Guillermo Leon Valencia**

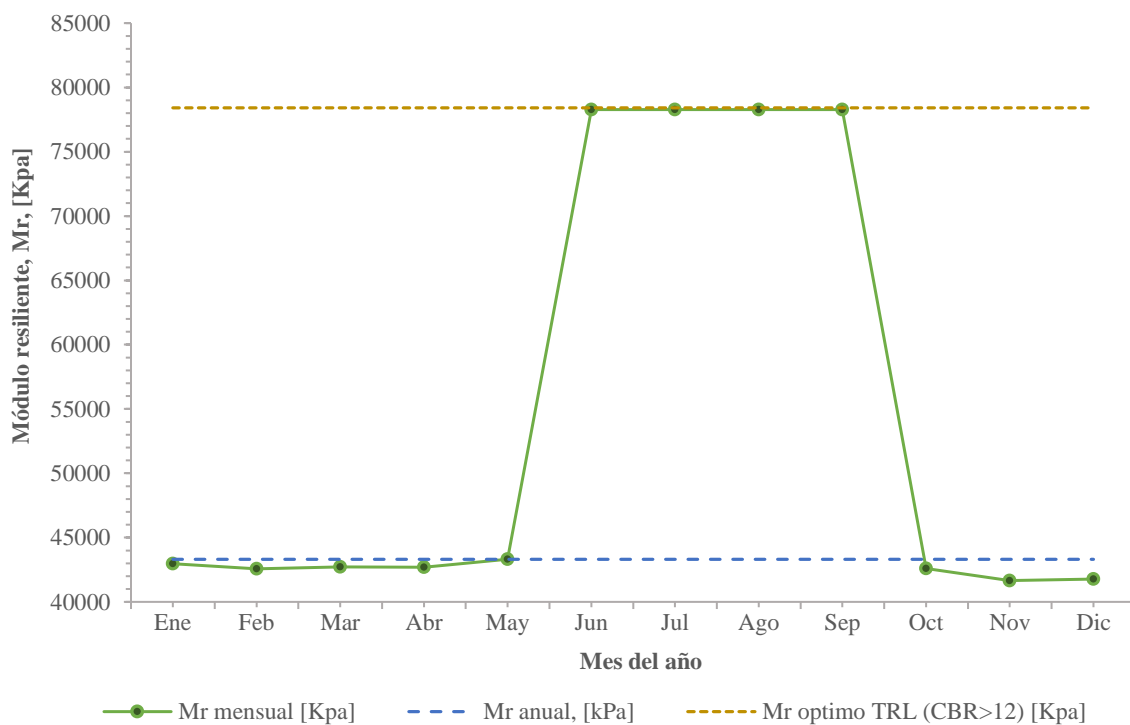


**Figura 111: CBR Muestra de la ladrillera N1 - Serie histórica Estación Meteorológica Aeropuerto Guillermo Leon Valencia**

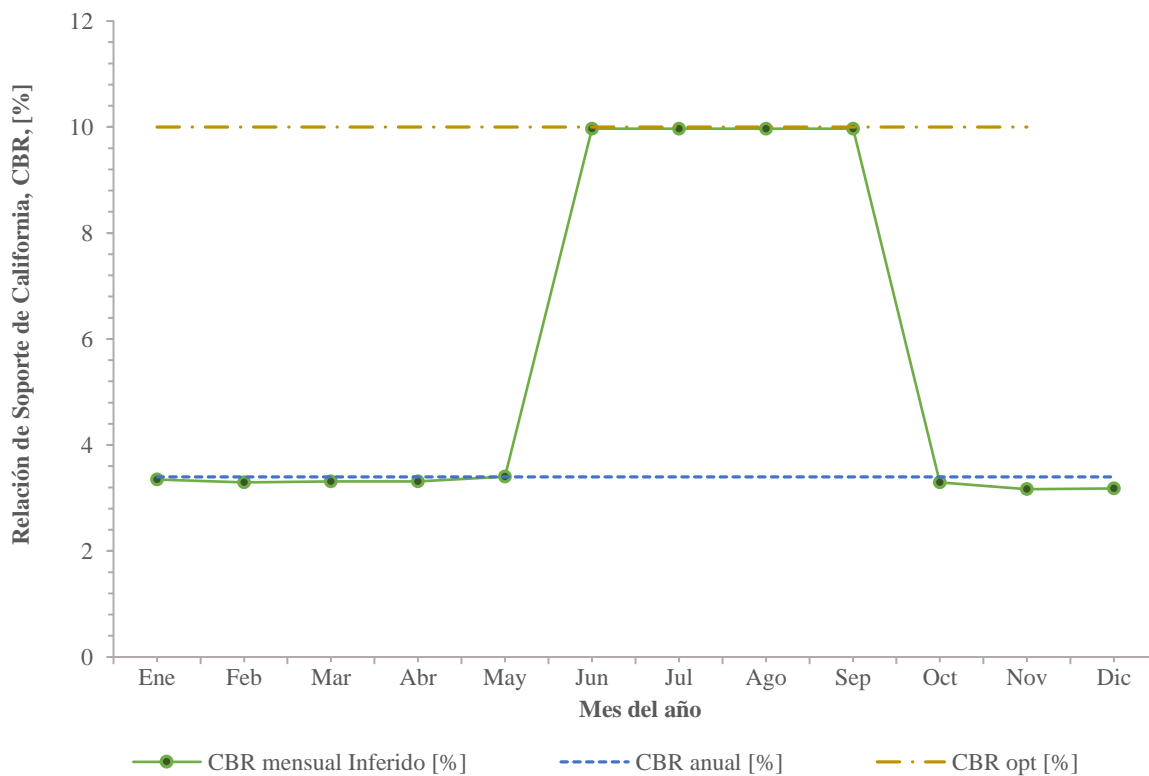




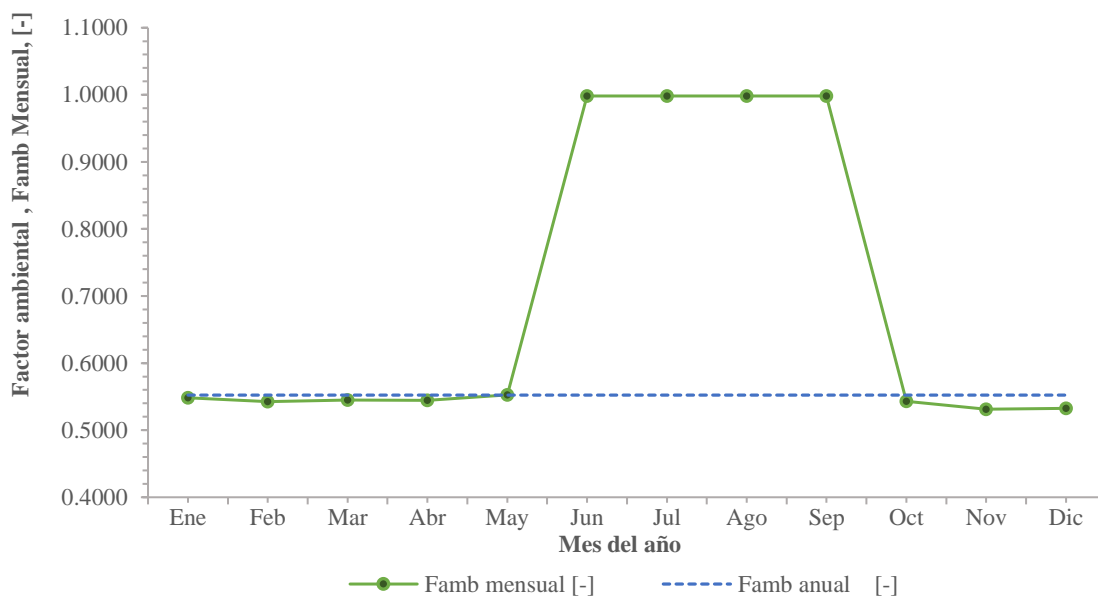
**Figura 112: Famb Muestra de la ladrillera N1 - Serie histórica Estación Meteorológica Aeropuerto Guillermo Leon Valencia**



**Figura 113: Mr Muestra de la ladrillera N1 – Promedio Series históricas**



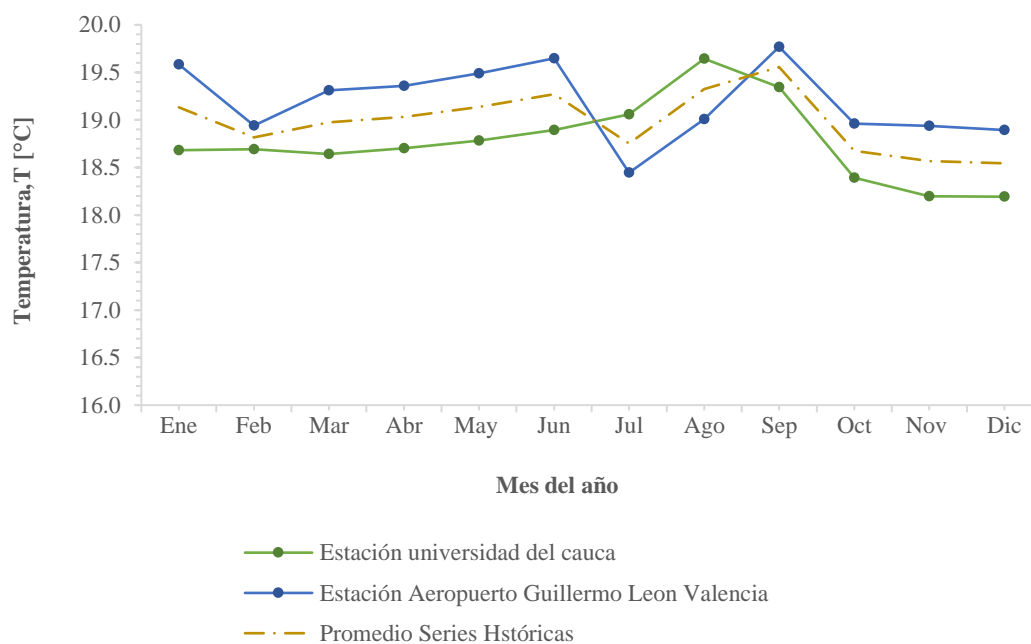
**Figura 114: CBR Muestra de la ladrillera N1 – Promedio Series históricas**



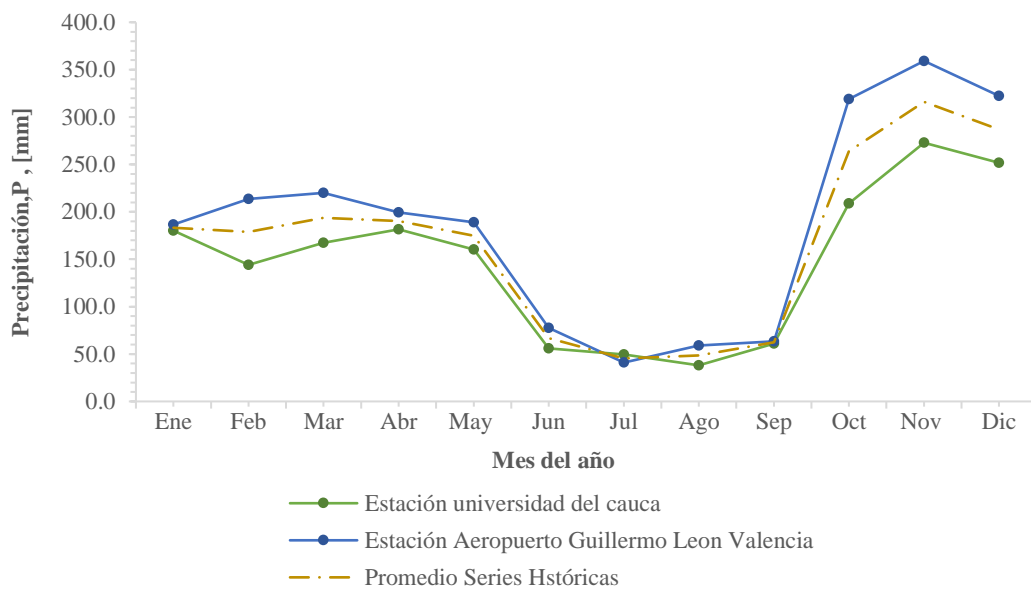
**Figura 115: Famb Muestra de la ladrillera N1 – Promedio Series históricas**

## 5 COMPARATIVA DE RESULTADOS

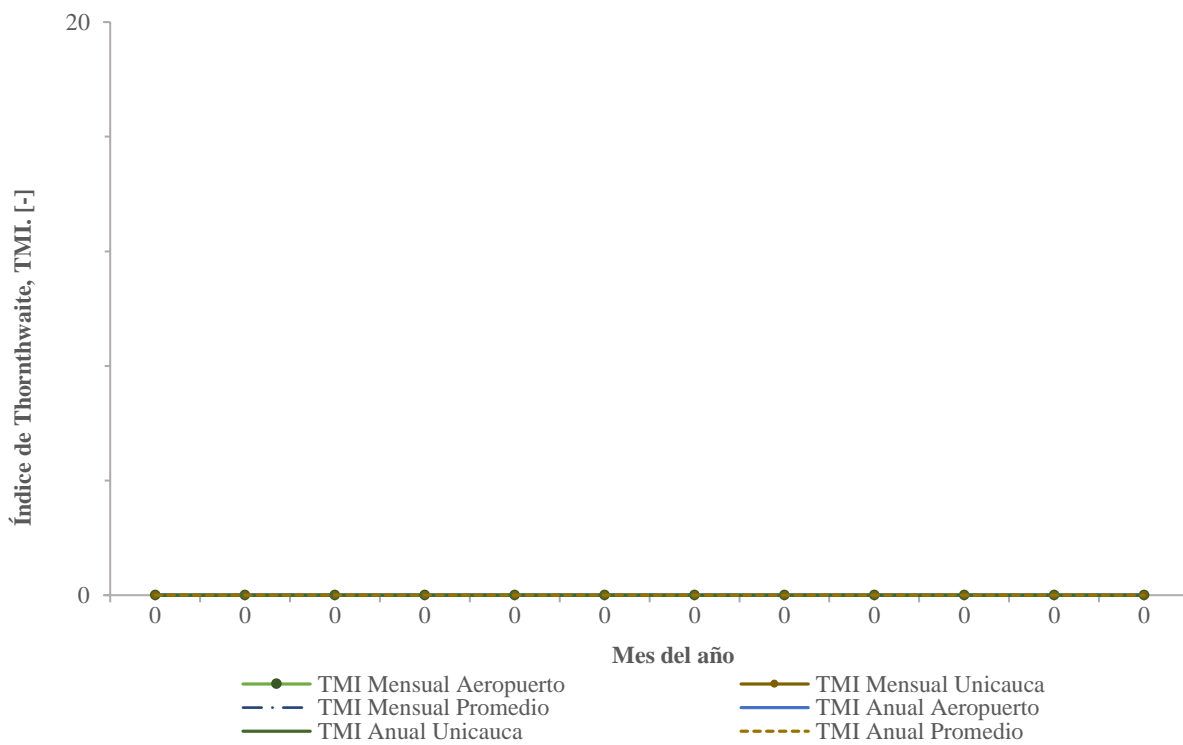
Luego de calcular, modelar y graficar los modelos del MEPDG y de clima, se hace una comparativa grafica de los datos utilizados, los resultados predichos por los modelos y los resultados obtenidos en el laboratorio para diferentes meses del año. El resumen de esto se presenta en las siguientes graficas.



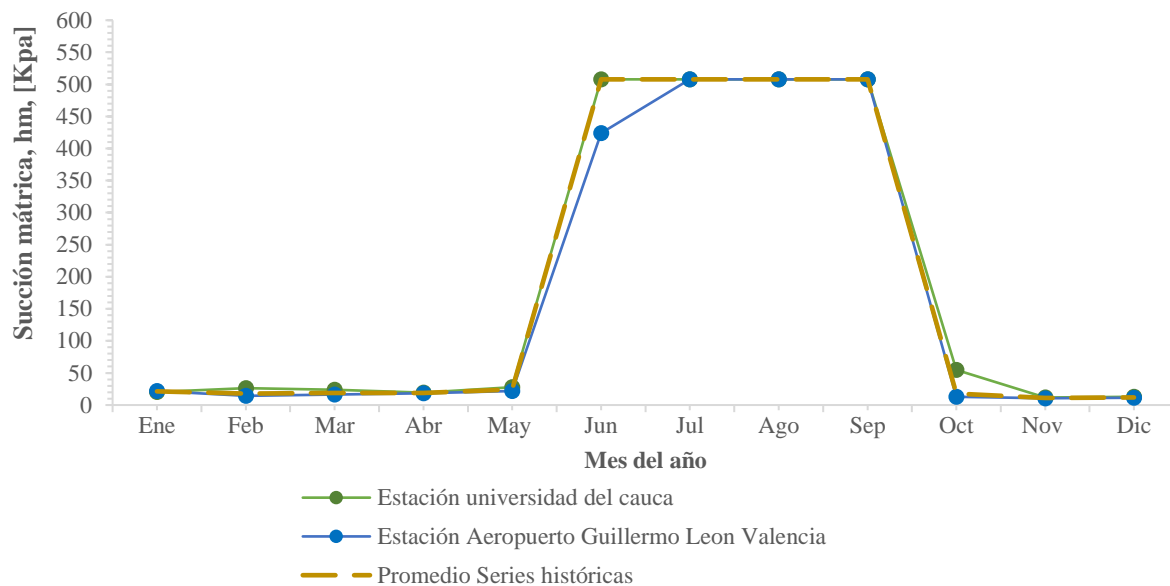
**Figura 116: Temperatura media mensual [°C] - Series históricas [2007-2016]**



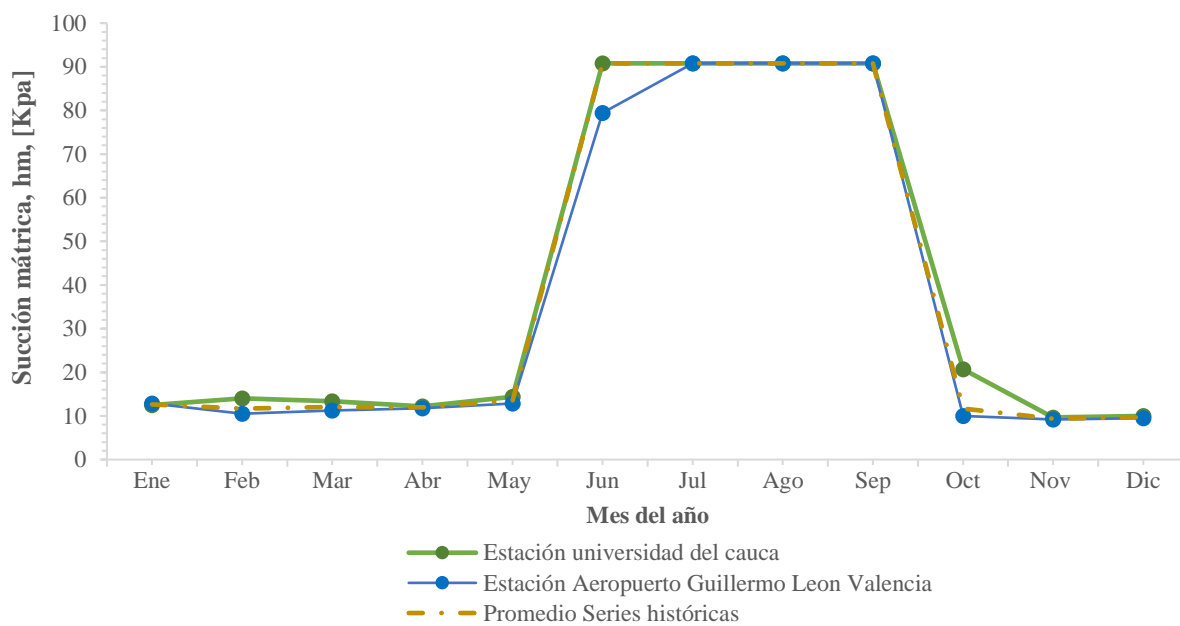
**Figura 117:Precipitación mensual [°C] - Series históricas [2007-2016]**



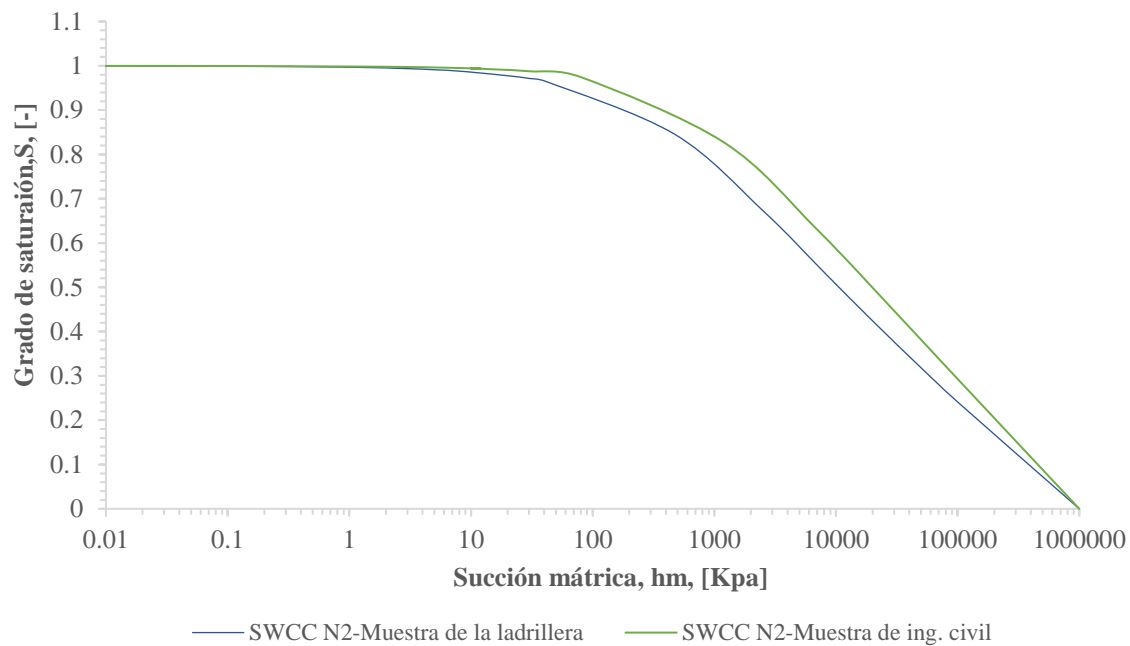
**Figura 118: TMI mensual y Anual- Series históricas [2007-2016]**



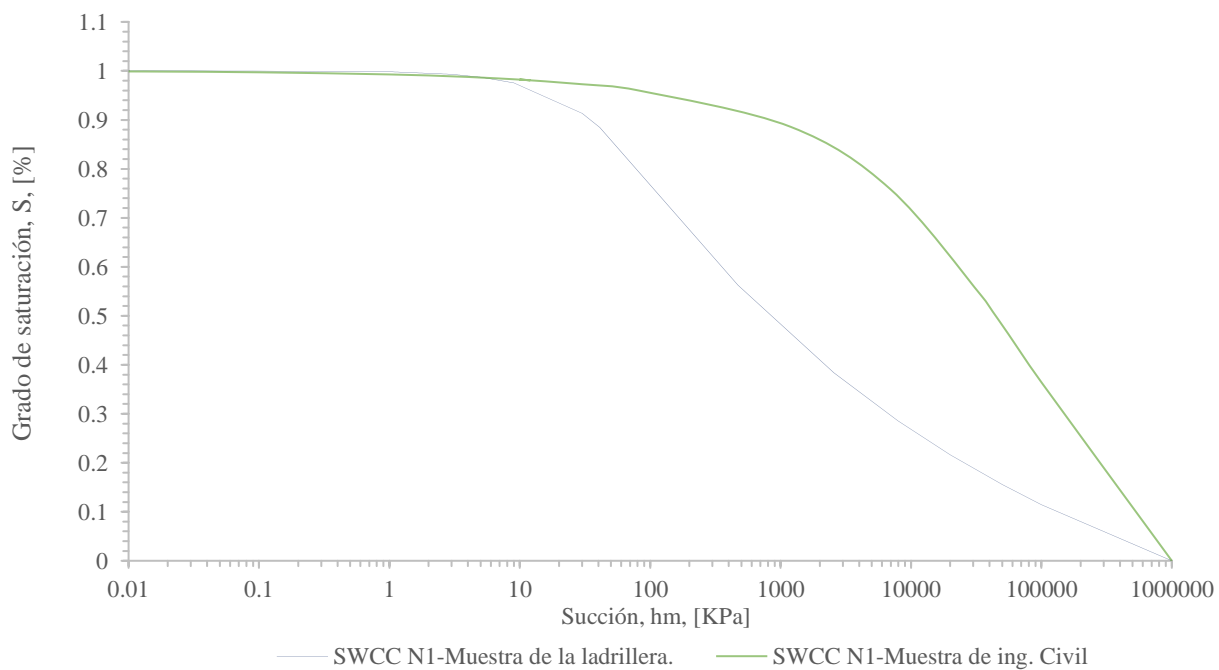
**Figura 119: Succión Matricial mensual Muestra de Ing. Civil**



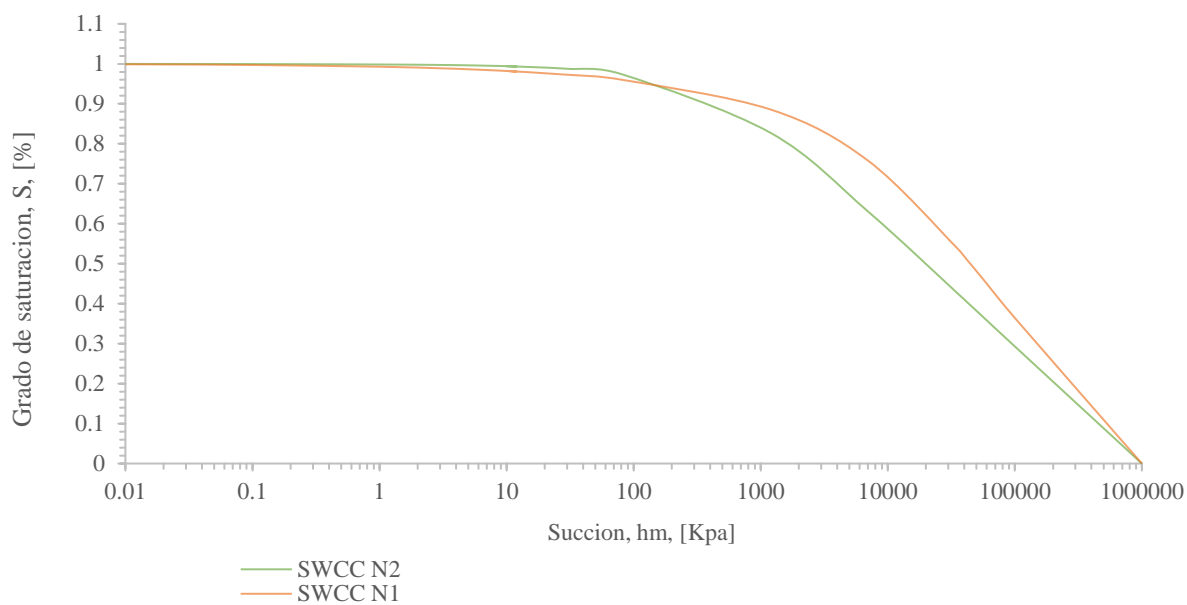
**Figura 120 Succión Matricial mensual Muestra de la ladrillera**



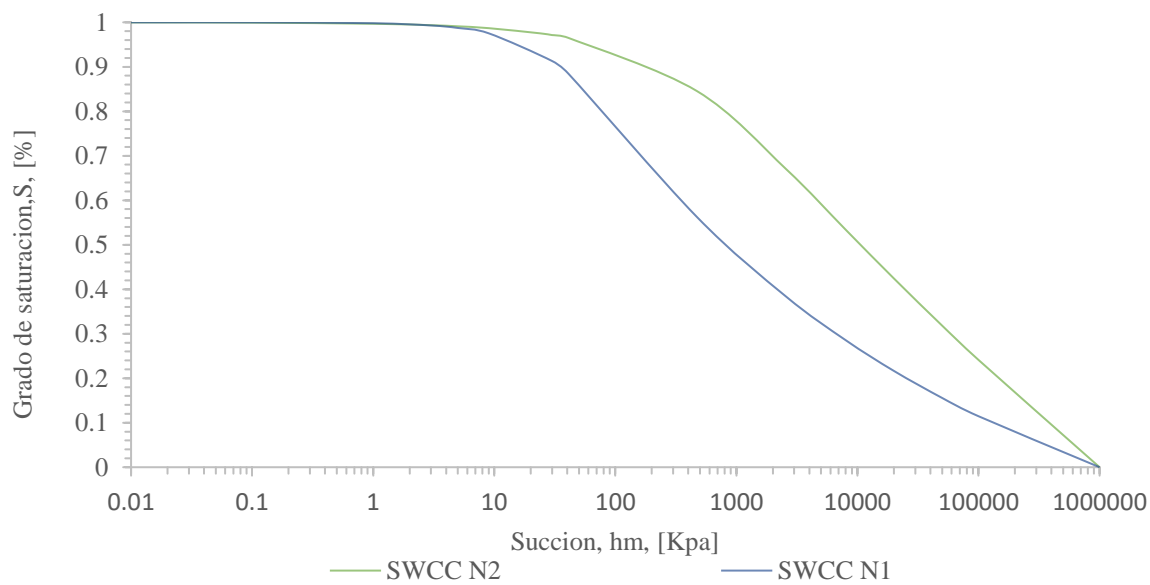
**Figura 121: SWCC-N2: Muestra Ing. civil y Muestra de la ladrillera.**



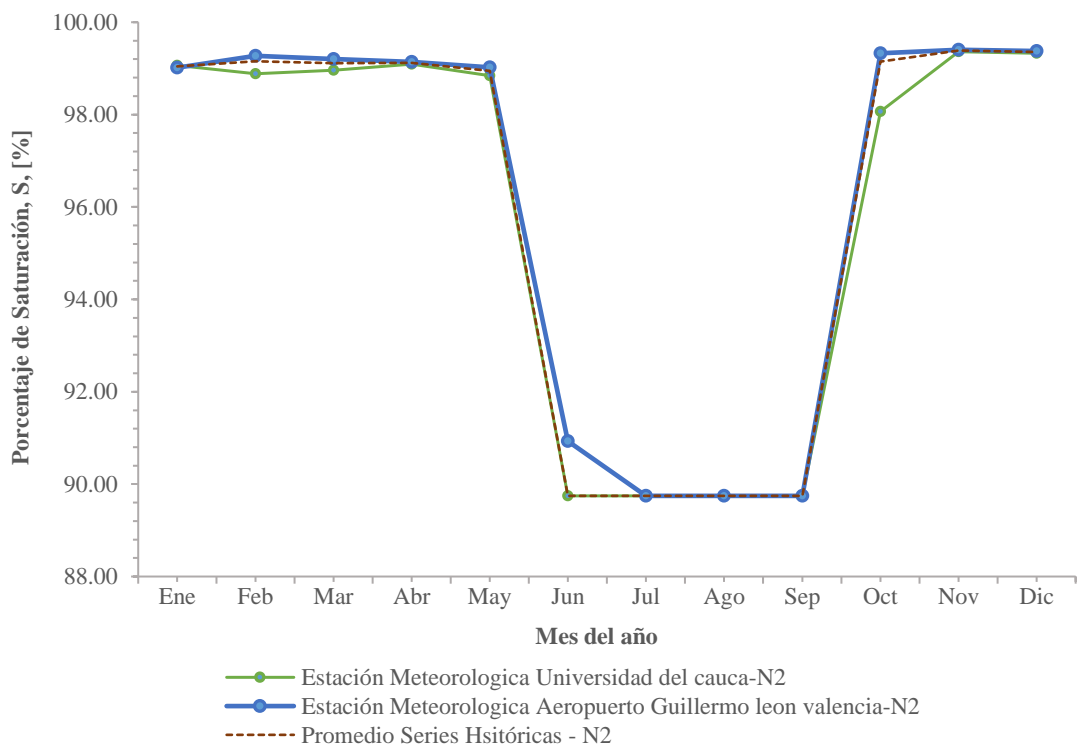
**Figura 122: SWCC N1 Muestra Ing. Civil y Muestra de la ladrillera.**



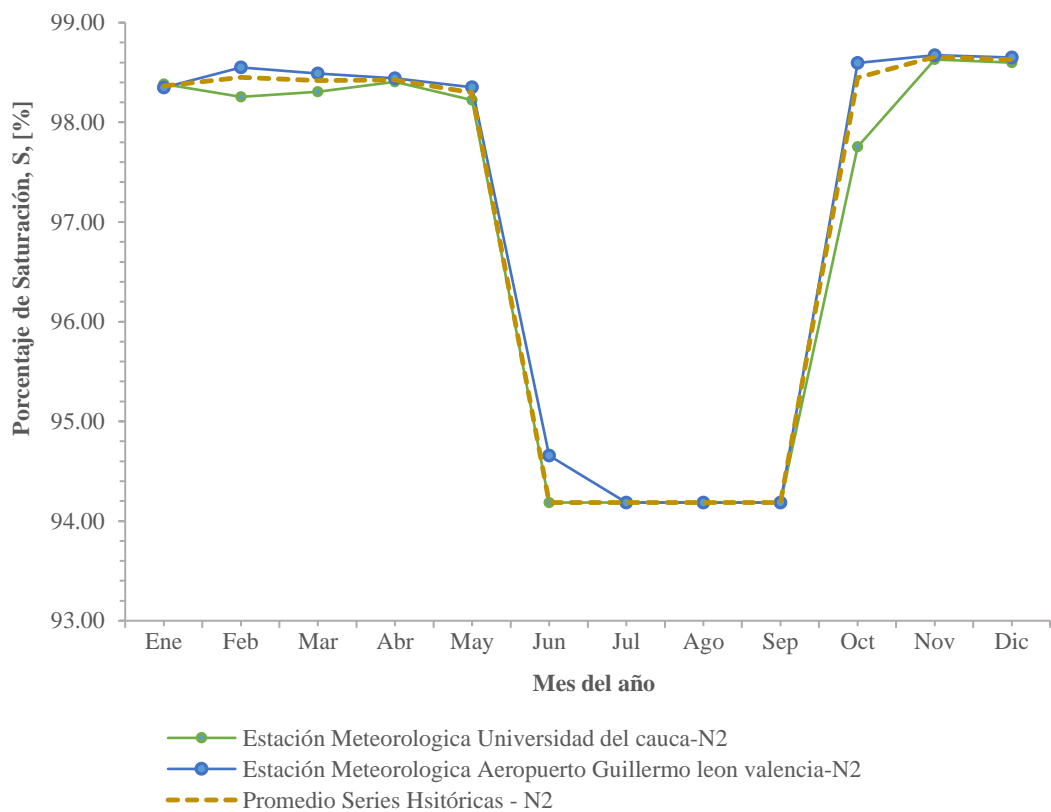
**Figura 123: SWCC N1 y SWCC N2 Muestra de ing. Civil.**



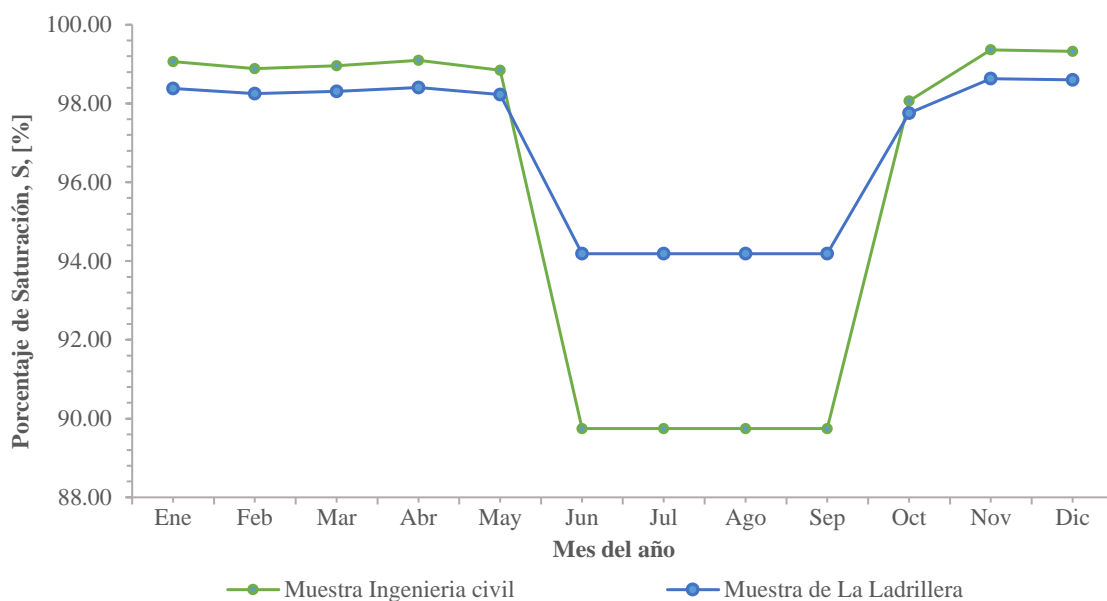
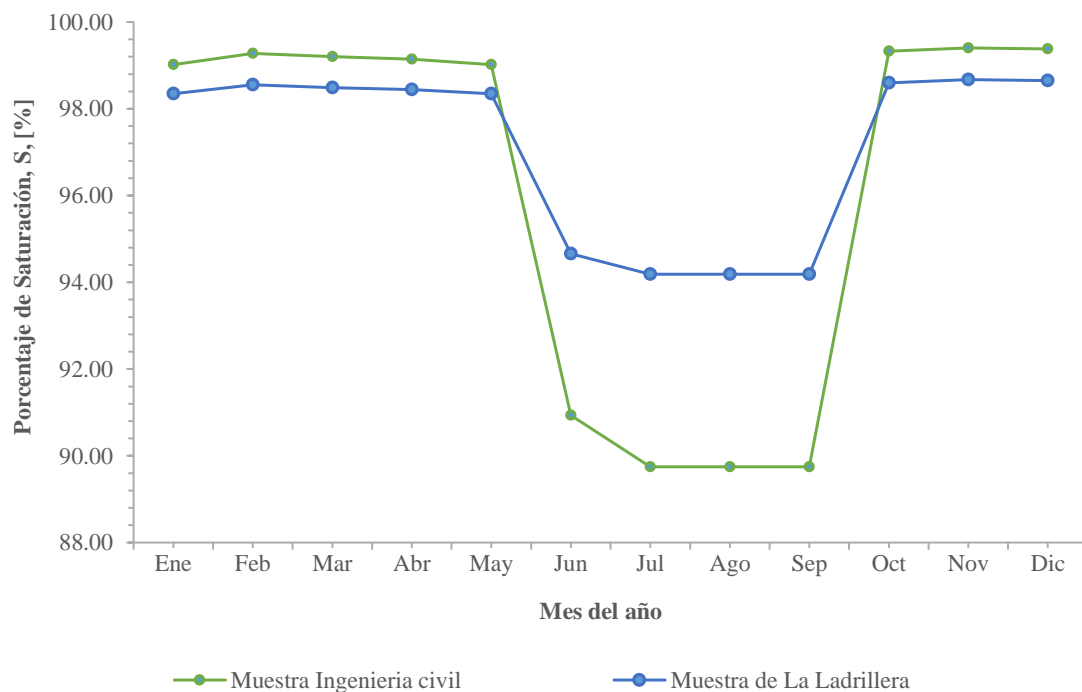
**Figura 124: SWCC N1 y SWCC N2 Muestra de La Ladrillera**

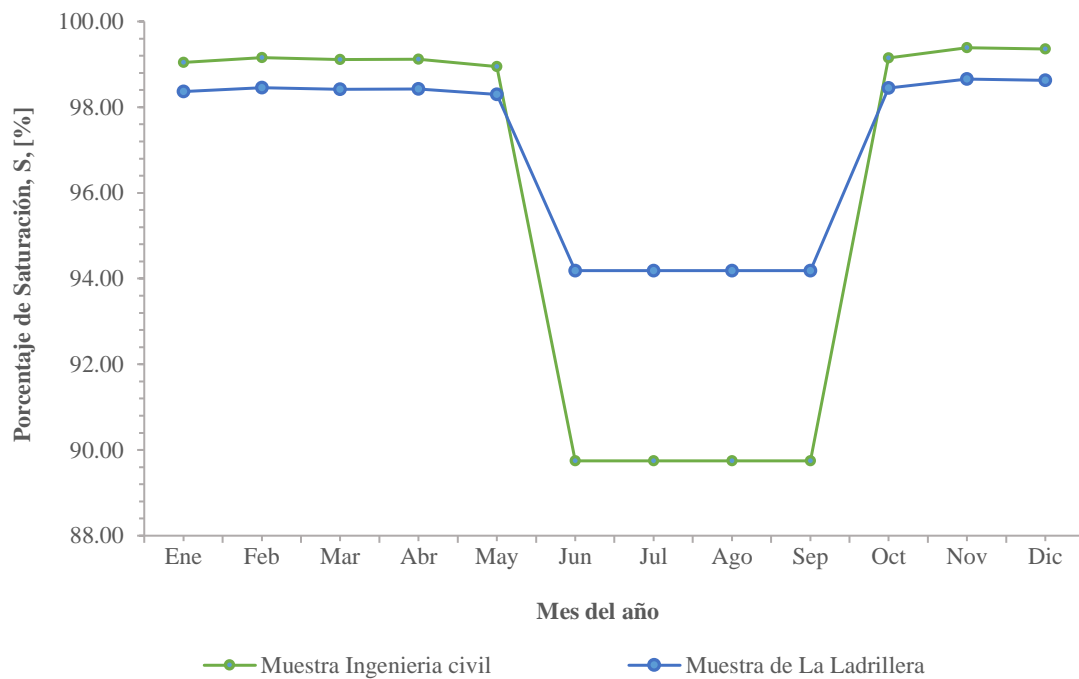


**Figura 125: % de saturación N2 - Muestra de Ing. Civil**

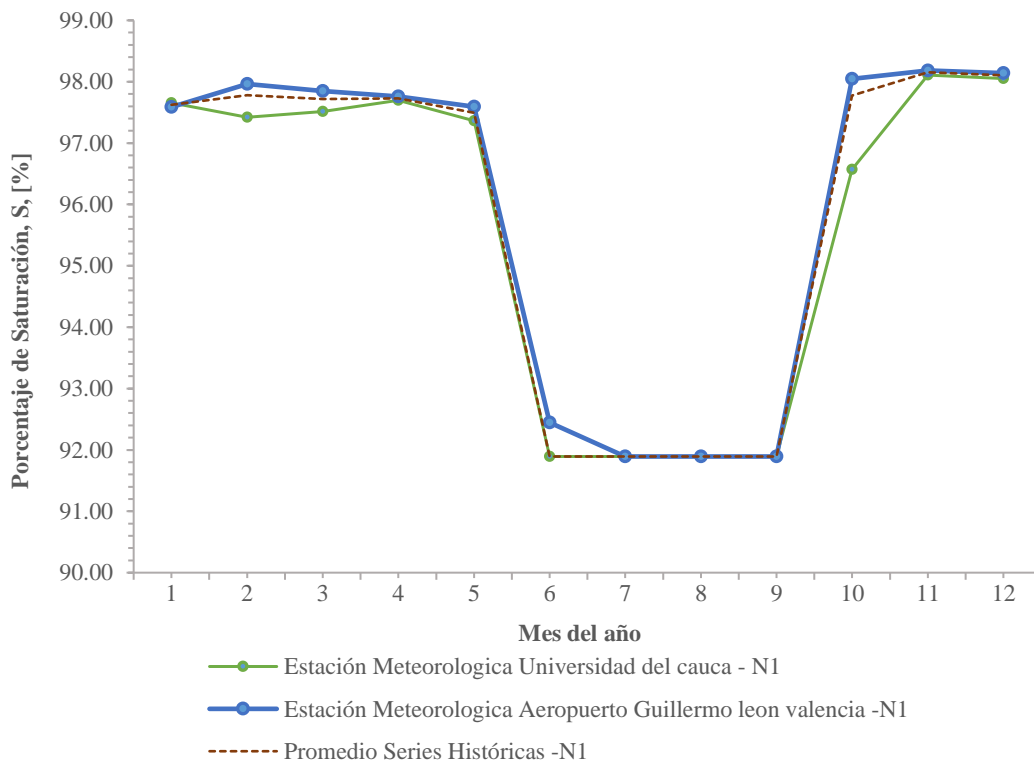




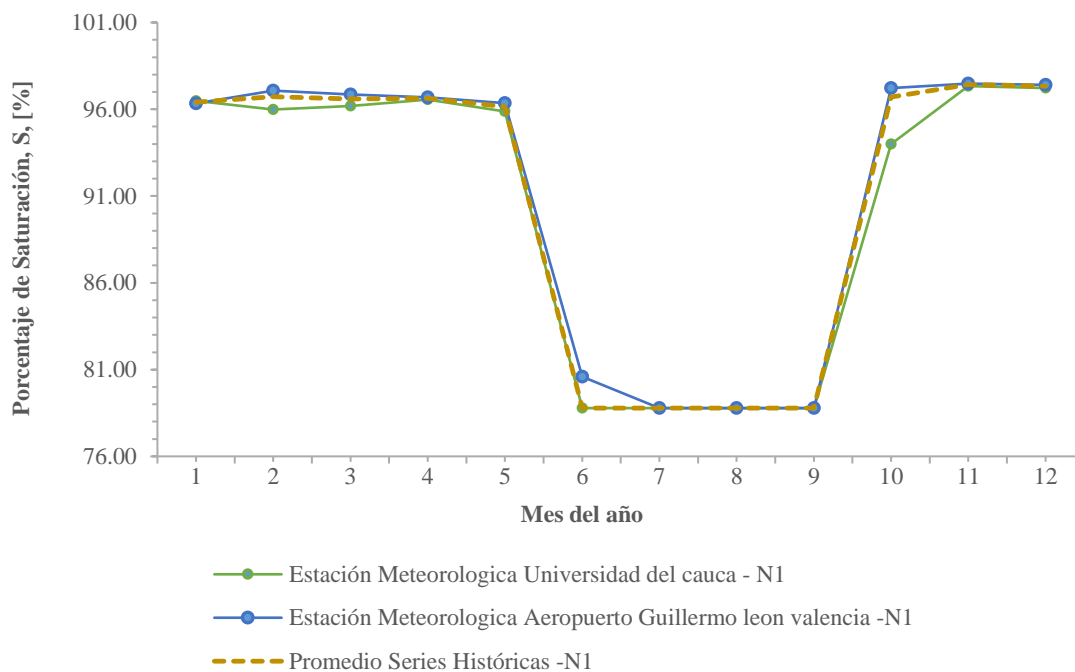
**Figura 126: % de saturación N2 - Muestra de La Ladrillera****Figura 127: % de saturación N2 Serie Histórica Estación Meteorológica Universidad del Cauca.****Figura 128: % de saturación N2 Serie Histórica Estación Meteorológica Aeropuerto Guillermo Leon Valencia.**



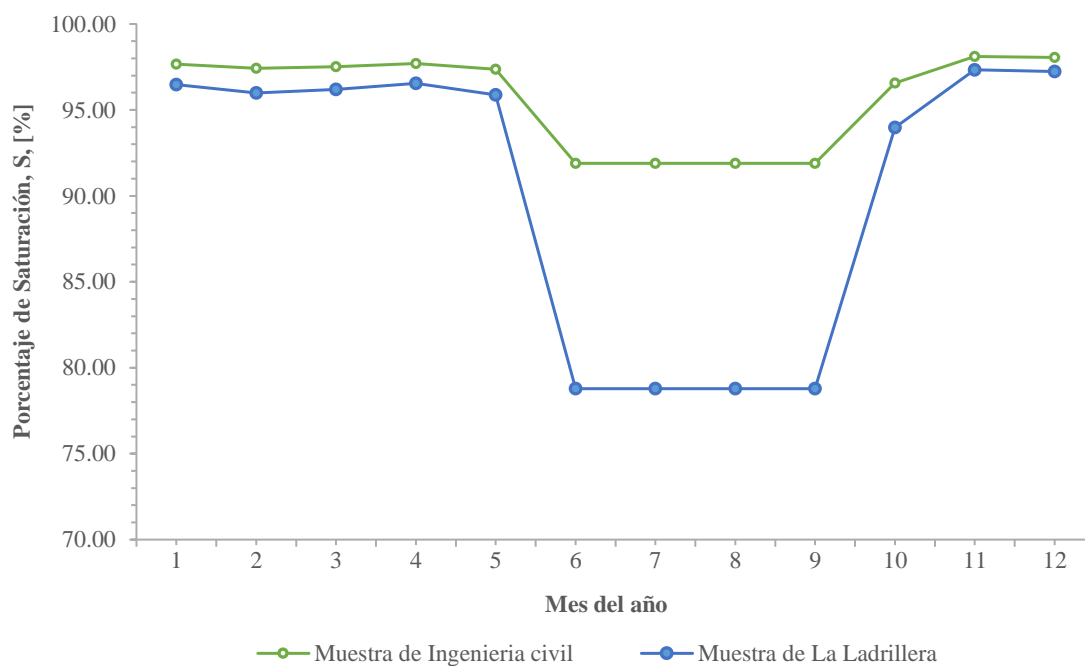
**Figura 129: % de saturación N2 Promedio Series Históricas.**



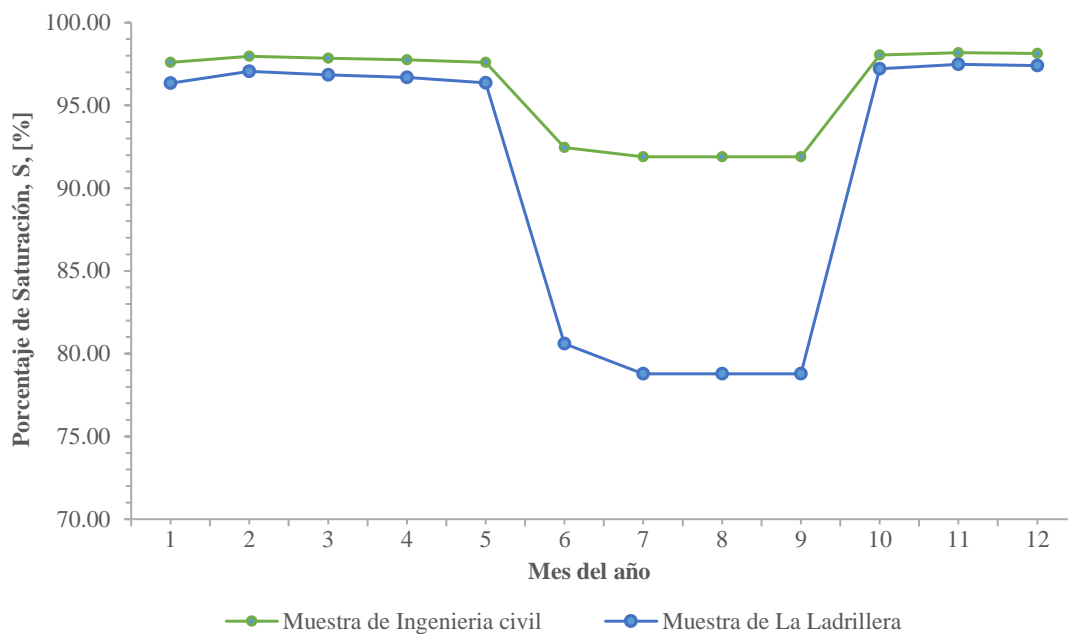
**Figura 130: % de saturación – N1 Muestra Ing. Civil.**



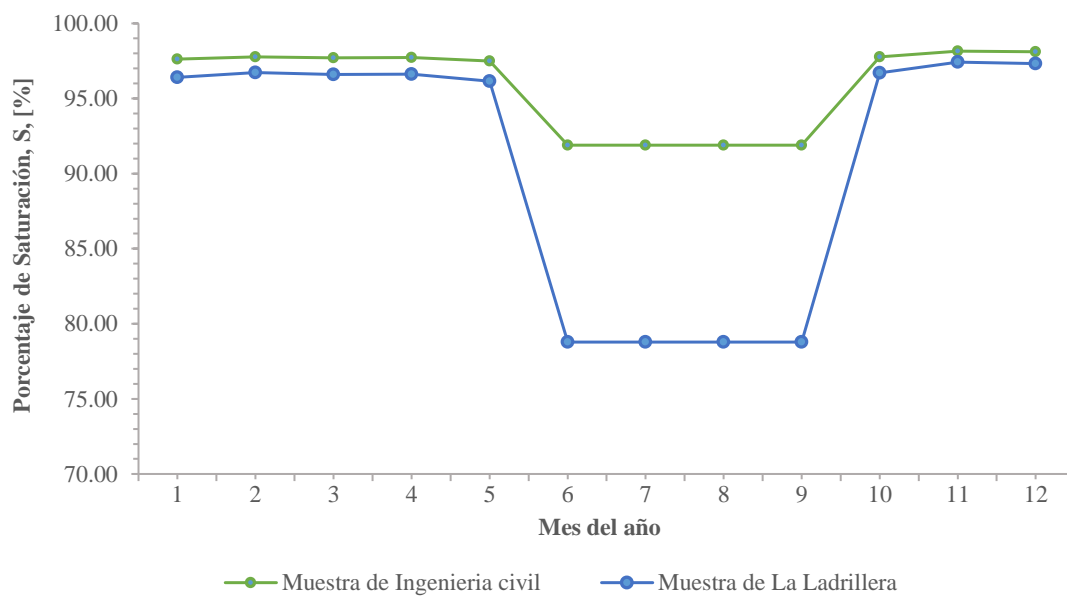
**Figura 131: % de saturación – N1 Muestra de la Ladrillera.**



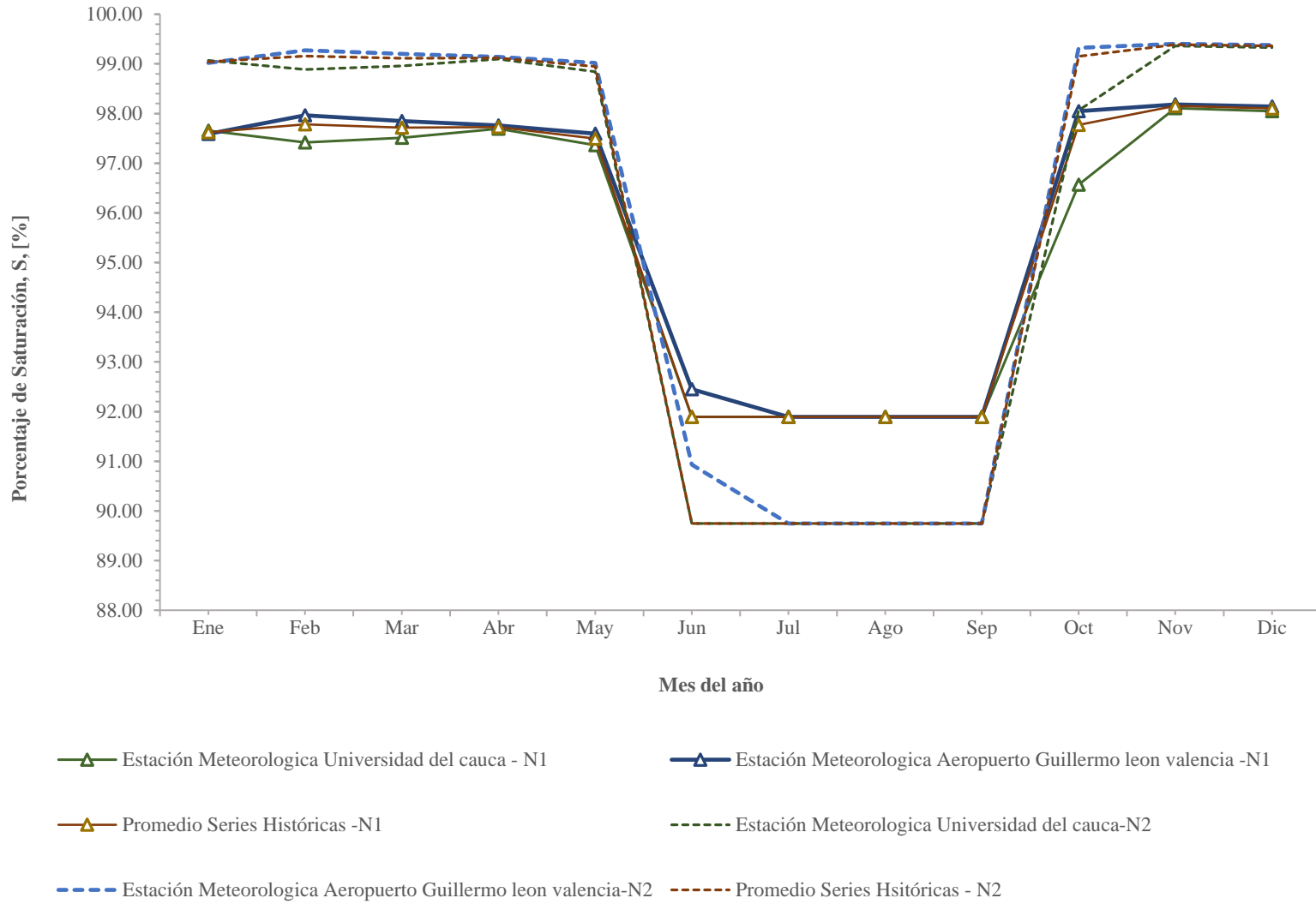
**Figura 132: % de saturación N1 Serie Histórica Estación Meteorológica Universidad del Cauca.**



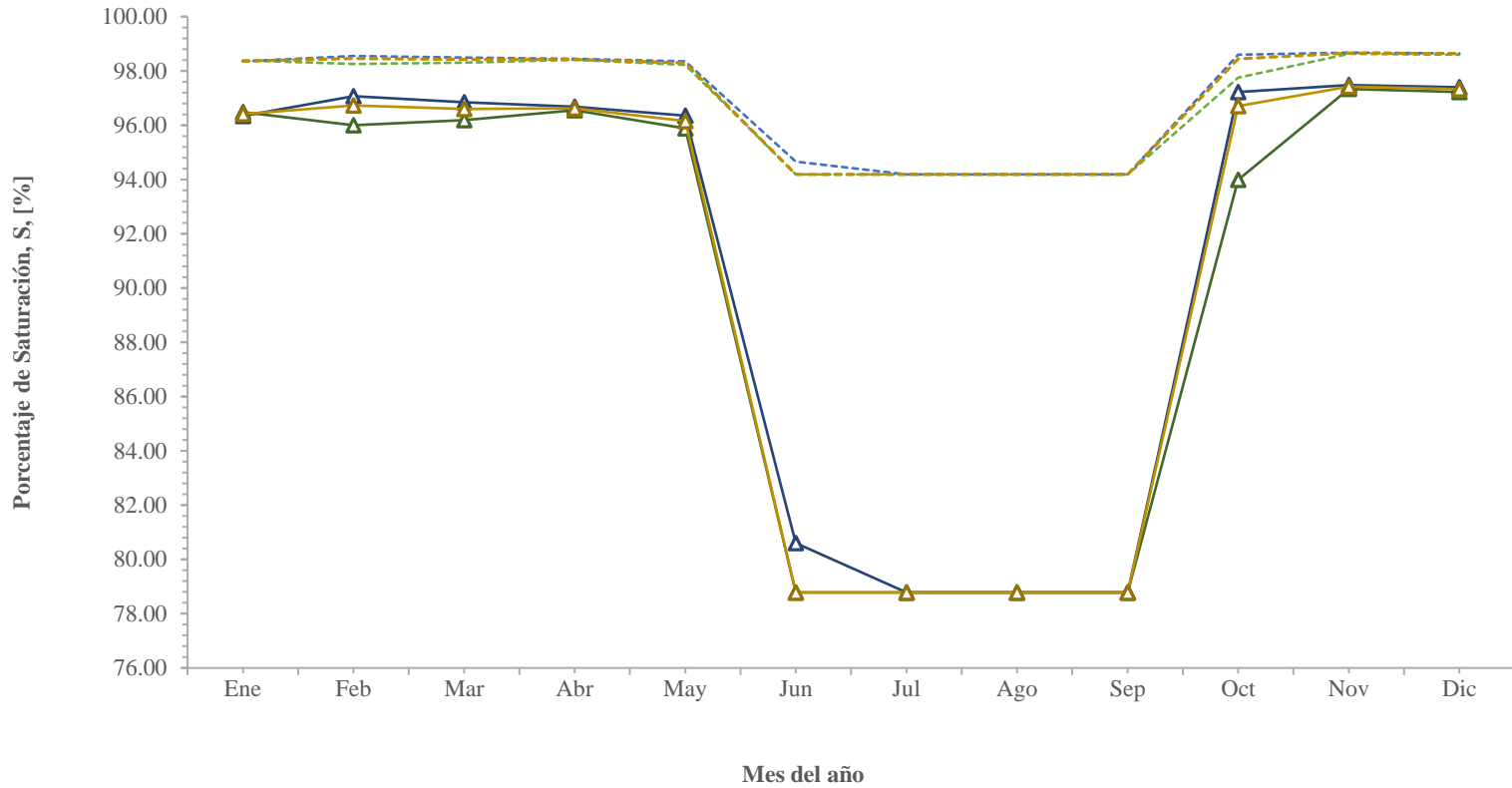
**Figura 133: % de saturación N1 Serie Histórica Estación Meteorológica Aeropuerto Guillermo Leon Valencia.**



**Figura 134: % de saturación N1 Promedio Series Históricas**

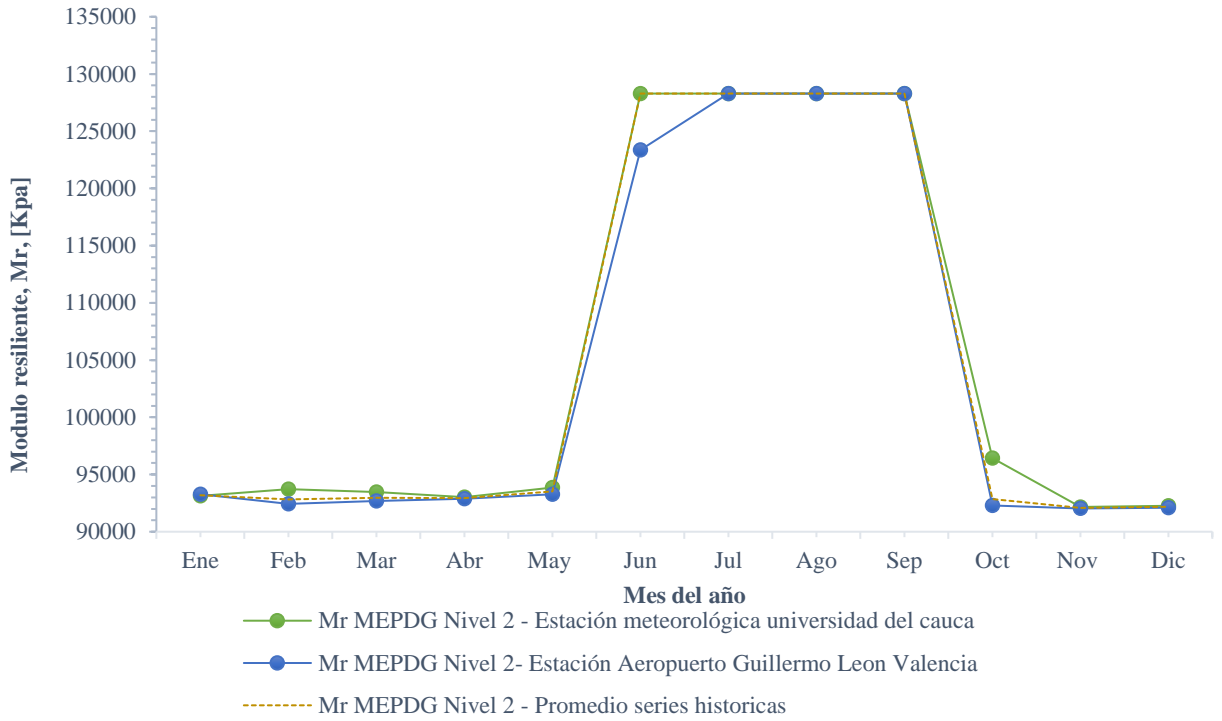


**Figura 135: % de saturación Muestras Ing. Civil.**

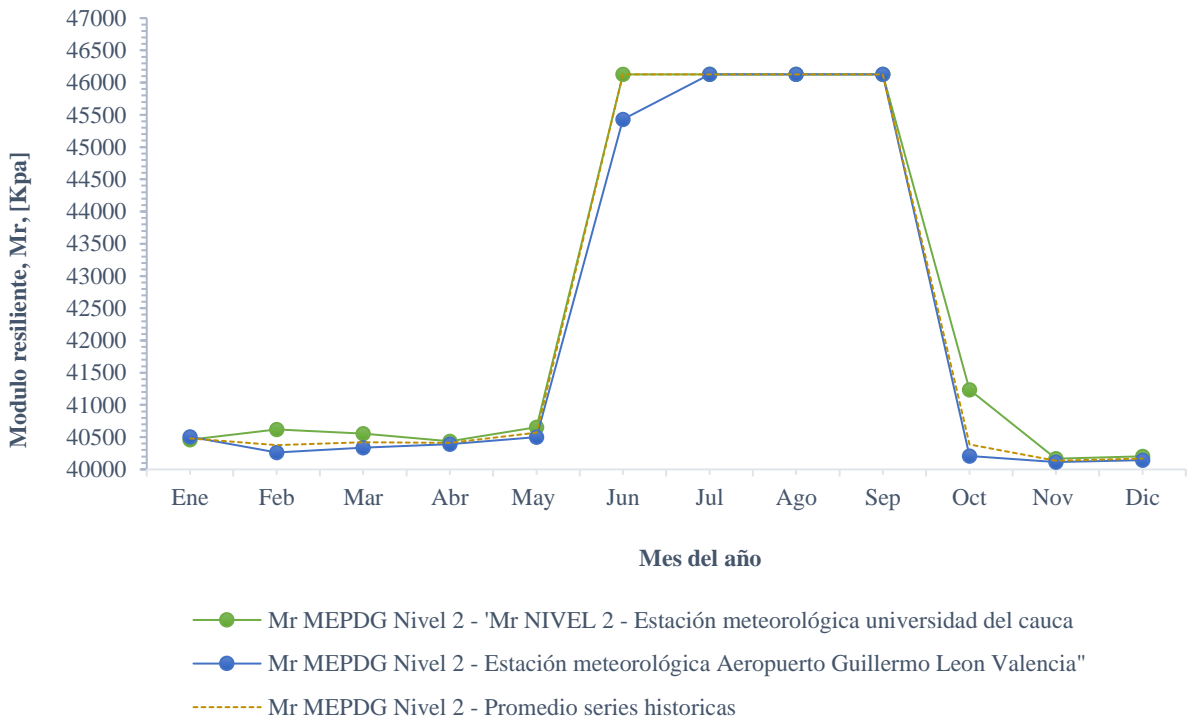


- △— Estación Meteorologica Universidad del cauca - N1
- △— Estación Meteorologica Aeropuerto Guillermo leon valencia -N1
- △— Promedio Series Históricas -N1
- △— Estación Meteorologica Universidad del cauca-N2
- △— Estación Meteorologica Aeropuerto Guillermo leon valencia-N2
- △— Promedio Series Hsitóricas - N2

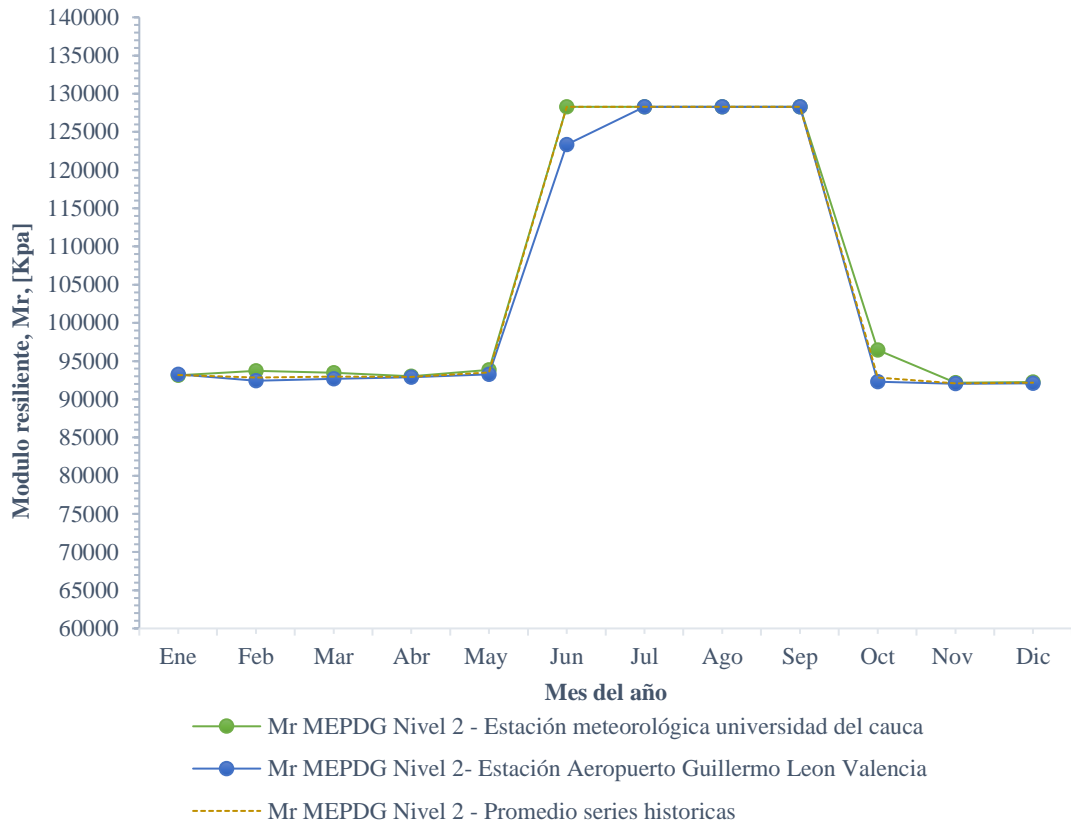
**Figura 136: % de saturación Muestra de la ladrillera.**



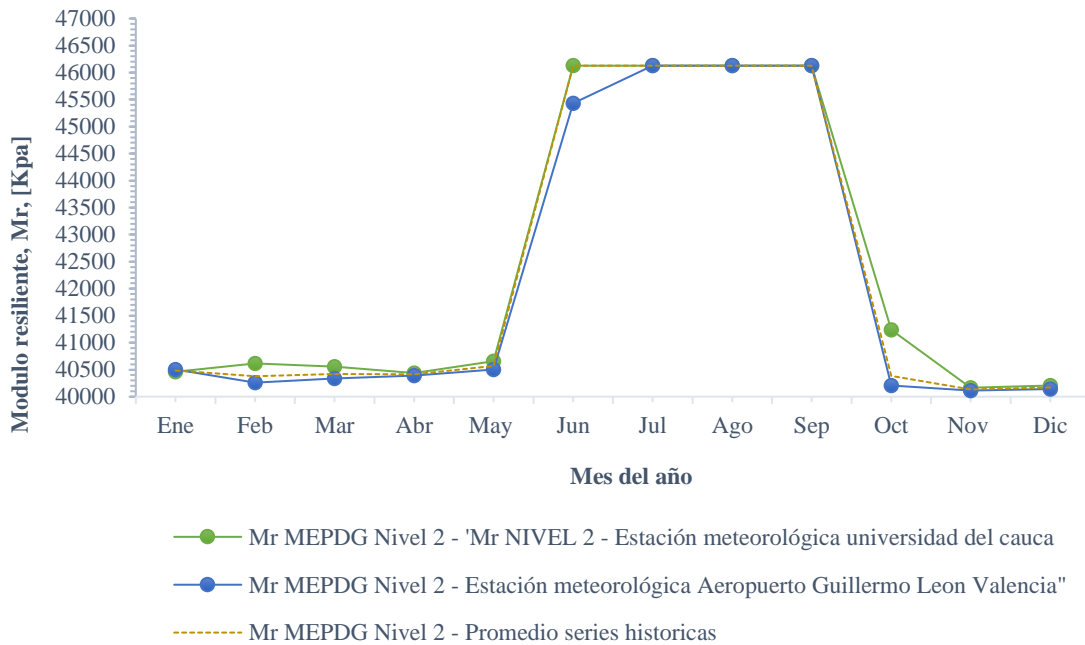
**Figura 137: Mr N2 – Muestra de Ing. Civil**



**Figura 138: Mr N2 – Muestra de La Ladrillera**



**Figura 139: Mr N1 – Muestra de Ing. Civil**



**Figura 140: Mr N1 – Muestra de La ladrillera**

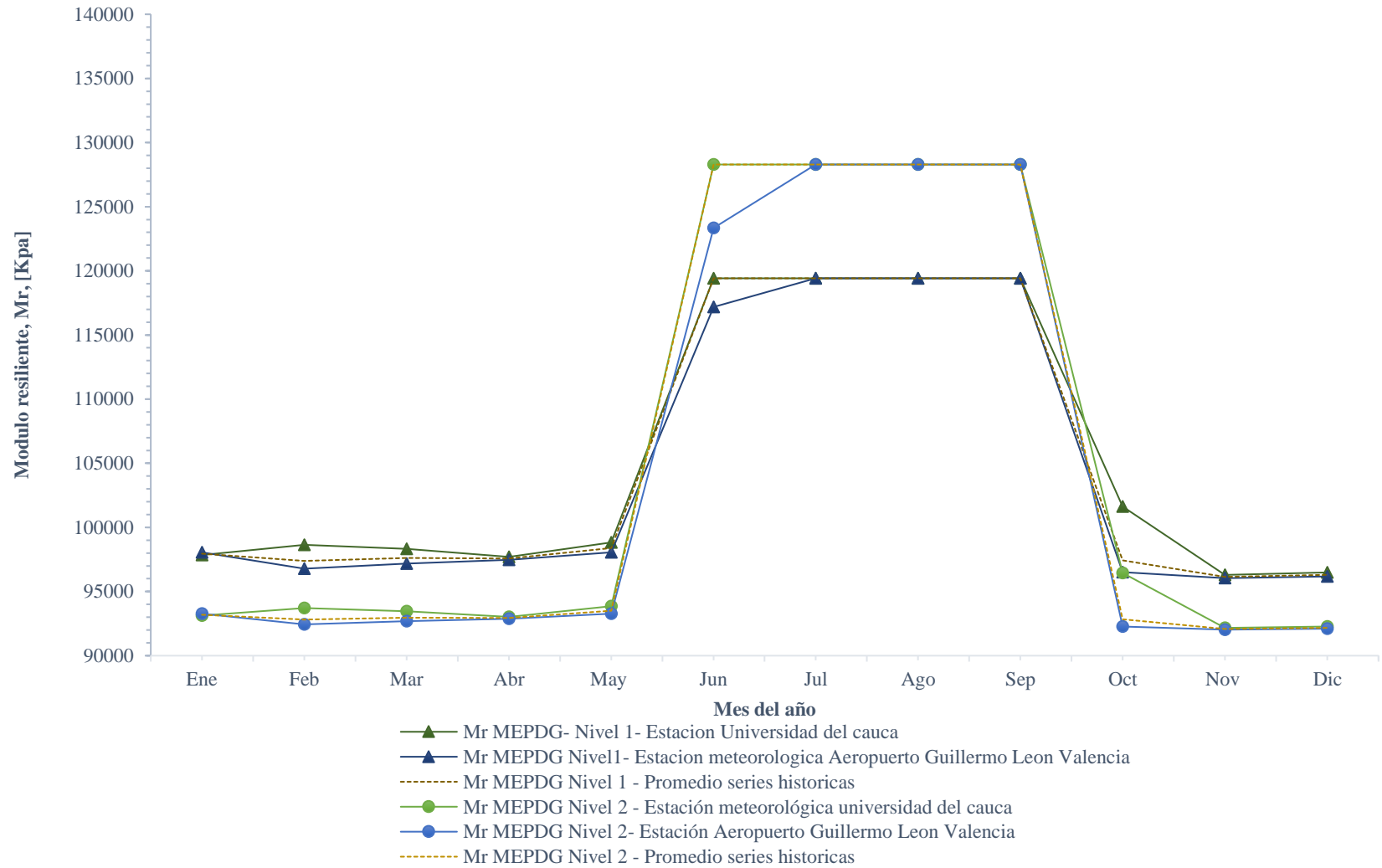


**Tabla 81: Tabla Resumen Mr modelo MEPDG- Muestra de Ing. Civil**

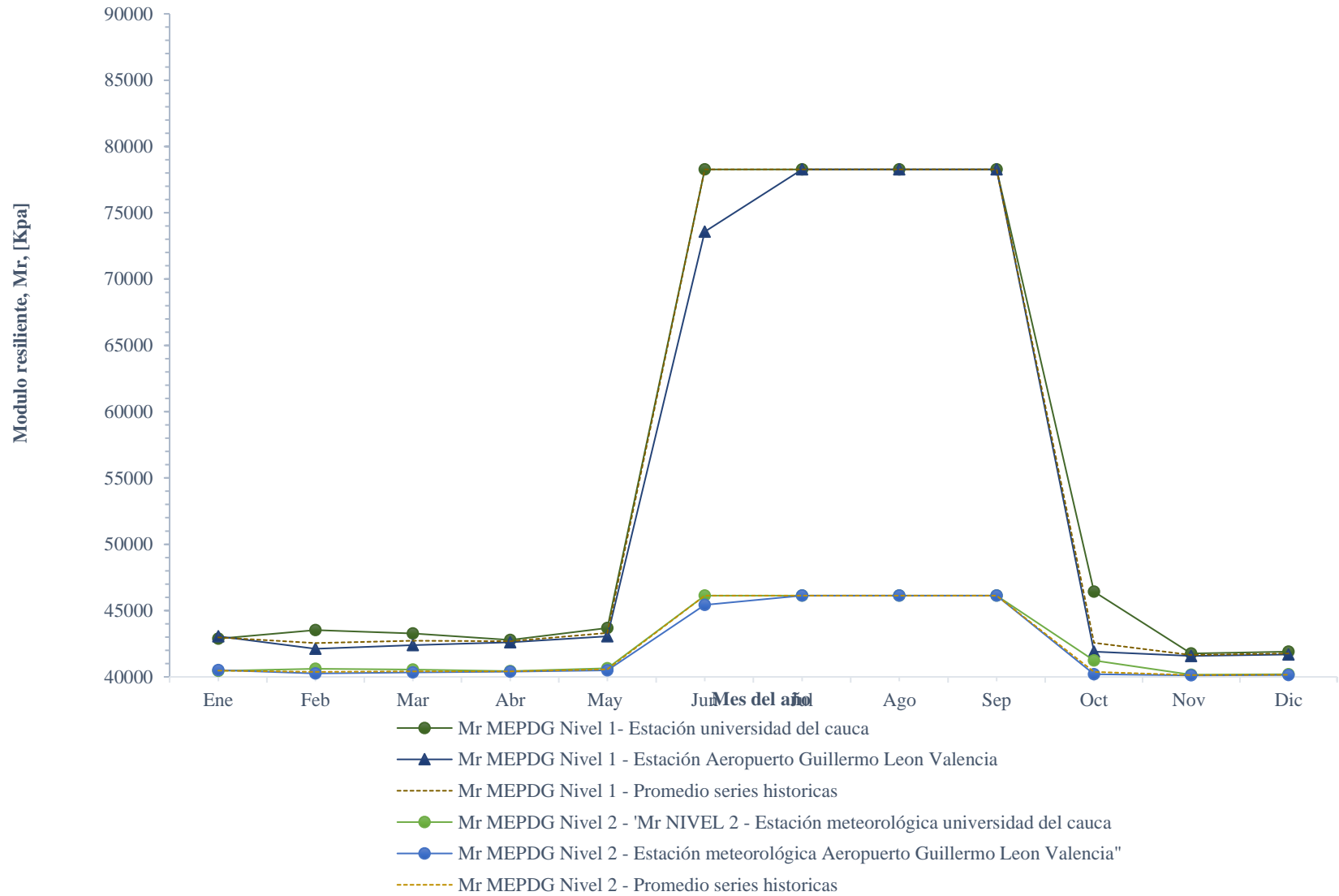
Mes	Estación Meteorológica Universidad del Cauca		Estación Meteorológica Aeropuerto Guillermo León Valencia		Promedio Estaciones meteorológicas	
	N1	N2	N1	N2	N1	N2
<b>Ene</b>	97837	93119	98065	93279	97947	93195
<b>Feb</b>	98647	93710	96785	92444	97399	92825
<b>Mar</b>	98327	93468	97174	92682	97620	92971
<b>Abr</b>	97700	93026	97476	92876	97579	92944
<b>May</b>	98834	93855	98047	93266	98388	93514
<b>Jun</b>	119419	128289	117187	123349	119419	128289
<b>Jul</b>	119419	128289	119419	128289	119419	128289
<b>Ago</b>	119419	128289	119419	128289	119419	128289
<b>Sep</b>	119419	128289	119419	128289	119419	128289
<b>Oct</b>	101626	96442	96503	92281	97429	92845
<b>Nov</b>	96296	92166	96043	92029	96142	92082
<b>Dic</b>	96493	92275	96186	92106	96309	92173
<b>Anual</b>	99287	94222	97756	93064	98366	93497

**Tabla 82: Tabla Resumen Mr modelo MEPDG- Muestra de La ladrillera**

Mes	Estación Meteorológica Universidad del Cauca		Estación Meteorológica Aeropuerto Guillermo León Valencia		Promedio Estaciones meteorológicas	
	N1	N2	N1	N2	N1	N2
<b>Ene</b>	42892	40466	43069	40510	42977	40487
<b>Feb</b>	43541	40623	42116	40266	42561	40383
<b>Mar</b>	43278	40561	42396	40340	42726	40425
<b>Abr</b>	42787	40440	42618	40398	42695	40417
<b>May</b>	43699	40660	43056	40507	43328	40573
<b>Jun</b>	78278	46133	73582	45434	78278	46133
<b>Jul</b>	78278	46133	78278	46133	78278	46133
<b>Ago</b>	78278	46133	78278	46133	78278	46133
<b>Sep</b>	78278	46133	78278	46133	78278	46133
<b>Oct</b>	46435	41240	41915	40211	42583	40389
<b>Nov</b>	41768	40170	41585	40118	41657	40139
<b>Dic</b>	41908	40209	41689	40148	41777	40173
<b>Anual</b>	44094	40750	42830	40451	43310	40568



**Figura 141: Mr modelo Climático MEPDG Muestra Ing. Civil**



**Figura 142: Mr modelo Climático MEPDG Muestra de a ladrillera**

Teniendo Como base el Factor ambiental obtenido para cada mes y el valor de Mr real obtenido en función del valor de CBR inalterado de laboratorio se dedujo el Mr optimo y los resultados se presentan de la Tabla 83 a la Tabla 86

**Tabla 83: Mr óptimo inferido- Muestra de la Ing. Civil**

Mes	Estación Meteorológica Universidad del Cauca				Estación Meteorológica Aeropuerto Guillermo León Valencia				Promedio Estaciones meteorológicas			
	N1		N2		N1		N2		N1		N2	
	Famb	Mr opt inferido [Kpa]	Famb	Mr opt inferido [Kpa]	Famb	Mr opt inferido [Kpa]	Famb	Mr opt inferido [Kpa]	Famb	Mr opt inferido [Kpa]	Famb	Mr opt inferido [Kpa]
Feb	0.815	188514.90	0.775	198447.877	0.800	192142.543	0.764	201163.631	0.805	190931.652	0.767	200338.252
Mar	0.813	156156.85	0.773	164273.79	0.803	158009.606	0.766	165667.803	0.807	157288.103	0.768	165152.533
Abr	0.808	205260.76	0.769	215576.051	0.806	205734.185	0.768	215923.747	0.807	205516.638	0.768	215765.5
May	0.817	84900.52	0.776	89404.6369	0.810	85581.6343	0.771	89968.8063	0.813	85285.2682	0.773	89730.7036
Mr Óptimo promedio Inferido [Kpa]	183310.84		192765.91		185295.44		194251.73		184578.80		193752.10	

**Tabla 84: Mr óptimo inferido- Muestra de la Ladrillera**

Mes	Estación Meteorológica Universidad del Cauca				Estación Meteorológica Aeropuerto Guillermo León Valencia				Promedio Estaciones meteorológicas			
	N1		N2		N1		N2		N1		N2	
	Famb	Mr opt inferido [Kpa]	Famb	Mr opt inferido [Kpa]	Famb	Mr opt inferido [Kpa]	Famb	Mr opt inferido [Kpa]	Famb	Mr opt inferido [Kpa]	Famb	Mr opt inferido [Kpa]
Mar	0.552	308705.75	0.517	329389.673	0.541	315132.919	0.514	331190.138	0.545	312695.759	0.516	330495.722
Abr	0.546	303776.61	0.516	321406.623	0.544	304983.047	0.515	321747.263	0.544	304431.463	0.515	321590.966
May	0.557	72565.74	0.519	77989.4985	0.549	73649.5631	0.517	78284.0675	0.553	73186.7692	0.517	78157.0996
Mr Óptimo promedio Inferido [Kpa]	306241.18		325398.15		310057.98		326468.70		308563.61		326043.34	

**Tabla 85: % de Variación del Mr óptimo inferido con respecto al Mr óptimo real - Muestra de la Ing. Civil**

	<b>CBR Óptimo Real [%]</b>	<b>Mr Óptimo Real [KPa]</b>	<b>Nivel</b>	<b>Mr Óptimo promedio Inferido [KPa]</b>	<b>CBR Óptimo promedio Inferido [%]</b>	<b>Variación [%]</b>
<b>Estación Meteorológica Universidad del Cauca</b>	22	120983.11	N1	183310.84	47	52
			N2	192765.91	51	59
<b>Estación Meteorológica Aeropuerto Guillermo León Valencia</b>			N1	185295.44	48	53
			N2	194251.73	52	61
<b>Promedio Estaciones meteorológicas</b>			N1	184578.8	47	53
			N2	193752.1	52	60

**Tabla 86: % de Variación del Mr óptimo inferido con respecto al Mr óptimo real - Muestra de la Ladrillera**

	<b>CBR Óptimo Real [%]</b>	<b>Mr Óptimo Real [KPa]</b>	<b>Nivel</b>	<b>Mr Óptimo promedio Inferido [KPa]</b>	<b>CBR Óptimo promedio Inferido [%]</b>	<b>Variación [%]</b>
<b>Estación Meteorológica Universidad del Cauca</b>	10	78413.759	N1	306241.18	119	291
			N2	325398.15	133	315
<b>Estación Meteorológica Aeropuerto Guillermo León Valencia</b>			N1	310057.98	122	295
			N2	326468.7	134	316
<b>Promedio Estaciones meteorológicas</b>			N1	308563.61	121	294
			N2	326043.34	133	316

**Tabla 87: Comparativa Mr Modelo MEPDG y Mr en Función de CBR- Serie Histórica estación meteorológica Universidad del Cauca-Nivel 2-Muestra Ing. Civil.**

Mes	Mr Mensual MEPDG-Nivel 2 [Kpa]	CBR mensual Real [%]	Mr Mensual-Modelo TRL (CBR >12) [Kpa]	Famb [-]	Mr Optimo Mensual -Modelo TRL (CBR >12) [Kpa]	CBR Optimo Mensual -Modelo TRL (CBR >12), [%]	Mr óptimo [Kpa]	Mr anual [Kpa]	Mr Optimo promedio inferido [Kpa]	Mr Mensual inferido a partir del Mr opt [Kpa]	Error Mr optimo inferido	Mr Optimo real
Ene	93119						120983.11	94222	189924.92			
Feb	93710	34	153711.26	0.774567413	198447.88	54.10	120983.11	94222	189924.92	147109.65	4.3%	64.0%
Mar	93468	24	126913.69	0.772574161	164273.79	38.37	120983.11	94222	189924.92	146731.09	15.6%	35.8%
Abr	93026	39	165759.26	0.768913162	215576.05	62.89	120983.11	94222	189924.92	146035.77	11.9%	78.2%
May	93855	8	69357.23	0.775767753	89404.64	12.69	120983.11	94222	189924.92	147337.63	112.4%	26.1%
Jun	128289						120983.11	94222	189924.92			
Jul	128289						120983.11	94222	189924.92			
Ago	128289						120983.11	94222	189924.92			
Sep	128289						120983.11	94222	189924.92			
Oct	96442						120983.11	94222	189924.92			
Nov	92166						120983.11	94222	189924.92			
Dic	92275						120983.11	94222	189924.92			
Valor Promedio [Kpa]					189924.9							

**Tabla 88: Comparativa Mr Modelo MEPDG y Mr en Función de CBR- Serie Histórica estación meteorológica Universidad del Cauca-Nivel 2-Muestra de la ladrillera.**

Mes	Mr Mensual MEPDG-Nivel 2 [Kpa]	CBR mensual Real [%]	Mr Mensual-Modelo TRL (CBR >12) [Kpa]	Famb [-]	Mr Optimo Mensual -Modelo TRL (CBR >12) [Kpa]	CBR Optimo Mensual -Modelo TRL (CBR >12), [%]	Mr óptimo [Kpa]	Mr anual [Kpa]	Mr Optimo promedio inferido [Kpa]	Mr Mensual inferido a partir del Mr opt [Kpa]	Error Mr optimo inferido	Mr Optimo real
Ene	40466						78413.76	40750	325398.15			
Feb	40623						78413.76	40750	325398.15			
Mar	40561	41	170381.88	0.517265384	329389.67	135.93	78413.76	40750	325398.15	168317.20	1.2%	320.1%
Abr	40440	39	165759.26	0.515730702	321406.62	130.00	78413.76	40750	325398.15	167817.82	1.2%	309.9%
May	40660	3	40439.80	0.518528744	77989.50	9.90	78413.76	40750	325398.15	168728.29	317.2%	0.5%
Jun	46133						78413.76	40750	325398.15			
Jul	46133						78413.76	40750	325398.15			
Ago	46133						78413.76	40750	325398.15			
Sep	46133						78413.76	40750	325398.15			
Oct	41240						78413.76	40750	325398.15			
Nov	40170						78413.76	40750	325398.15			
Dic	40209						78413.76	40750	325398.15			
Mr Óptimo Inferido [Kpa]					325398.1							

**Tabla 89: Comparativa Mr Modelo MEPDG y Mr en Función de CBR- Serie Histórica estación meteorológica Aeropuerto Guillermo Leon Valencia-Nivel 2-Muestra Ing. Civil**

Mes	Mr modelo MEPDG - N2 [Kpa]	CBR Mensual Real [%]	Mr mensual, TRL(CBR>12) [Kpa]	Famb [-]	Mr óptimo Mensual calculado, TRL (CBR>12)	CBR Óptimo Mensual, TRL (CBR>12)	Mr Óptimo (CBR:22) [Kpa]	Mr anual [Kpa]	Mr Optimo promedio inferido [Kpa]	Mr Mensual a partir del Mr inferido opt [Kpa]	Error Mr optimo inferido	Mr Optimo real
Ene	93279						120983.11	93064	194251.73			
Feb	92444	34	153711.26	0.764110577	201163.63	55.45	120983.11	93064	194251.73	148429.80	3.4%	66.3%
Mar	92682	24	126913.69	0.766073331	165667.80	38.96	120983.11	93064	194251.73	148811.07	17.3%	36.9%
Abr	92876	39	165759.26	0.767675004	215923.75	63.07	120983.11	93064	194251.73	149122.20	10.0%	78.5%
May	93266	8	69357.23	0.770903128	89968.81	12.84	120983.11	93064	194251.73	149749.26	115.9%	25.6%
Jun	123349						120983.11	93064	194251.73			
Jul	128289						120983.11	93064	194251.73			
Ago	128289						120983.11	93064	194251.73			
Sep	128289						120983.11	93064	194251.73			
Oct	92281						120983.11	93064	194251.73			
Nov	92029						120983.11	93064	194251.73			
Dic	92106						120983.11	93064	194251.73			
<b>Mr Óptimo Inferido [Kpa]</b>					194251.7							

**Tabla 90: Comparativa Mr Modelo MEPDG y Mr en Función de CBR- Serie Histórica estación meteorológica Aeropuerto Guillermo Leon Valencia-Nivel 2-Muestra de la Ladrillera**

Mes	Mr Mensual MEPDG-Nivel 2 [Kpa]	CBR mensual Real [%]	Mr Mensual-Modelo TRL (CBR >12) [Kpa]	Famb [-]	Mr Optimo Mensual -Modelo TRL (CBR >12) [Kpa]	CBR Optimo Mensual -Modelo TRL (CBR >12), [%]	Mr óptimo [Kpa]	Mr anual [Kpa]	Mr Optimo promedio inferido [Kpa]	Mr Mensual a partir del Mr inferido opt [Kpa]	Error Mr optimo inferido	Mr Optimo real
Ene	40510						78413.76	40451	326468.70			
Feb	40266						78413.76	40451	326468.70			
Mar	40340	41	170381.88	0.51445335	331190.14	137.28	78413.76	40451	326468.70	167952.92	1.4%	322.4%
Abr	40398	39	165759.26	0.51518469	321747.26	130.25	78413.76	40451	326468.70	168191.68	1.5%	310.3%
May	40507	3	40439.80	0.51657761	78284.07	9.97	78413.76	40451	326468.70	168646.42	317.0%	0.2%
Jun	45434						78413.76	40451	326468.70			
Jul	46133						78413.76	40451	326468.70			
Ago	46133						78413.76	40451	326468.70			
Sep	46133						78413.76	40451	326468.70			
Oct	40211						78413.76	40451	326468.70			
Nov	40118						78413.76	40451	326468.70			
Dic	40148						78413.76	40451	326468.70			
<b>Mr Óptimo Inferido [Kpa]</b>					326468.7							

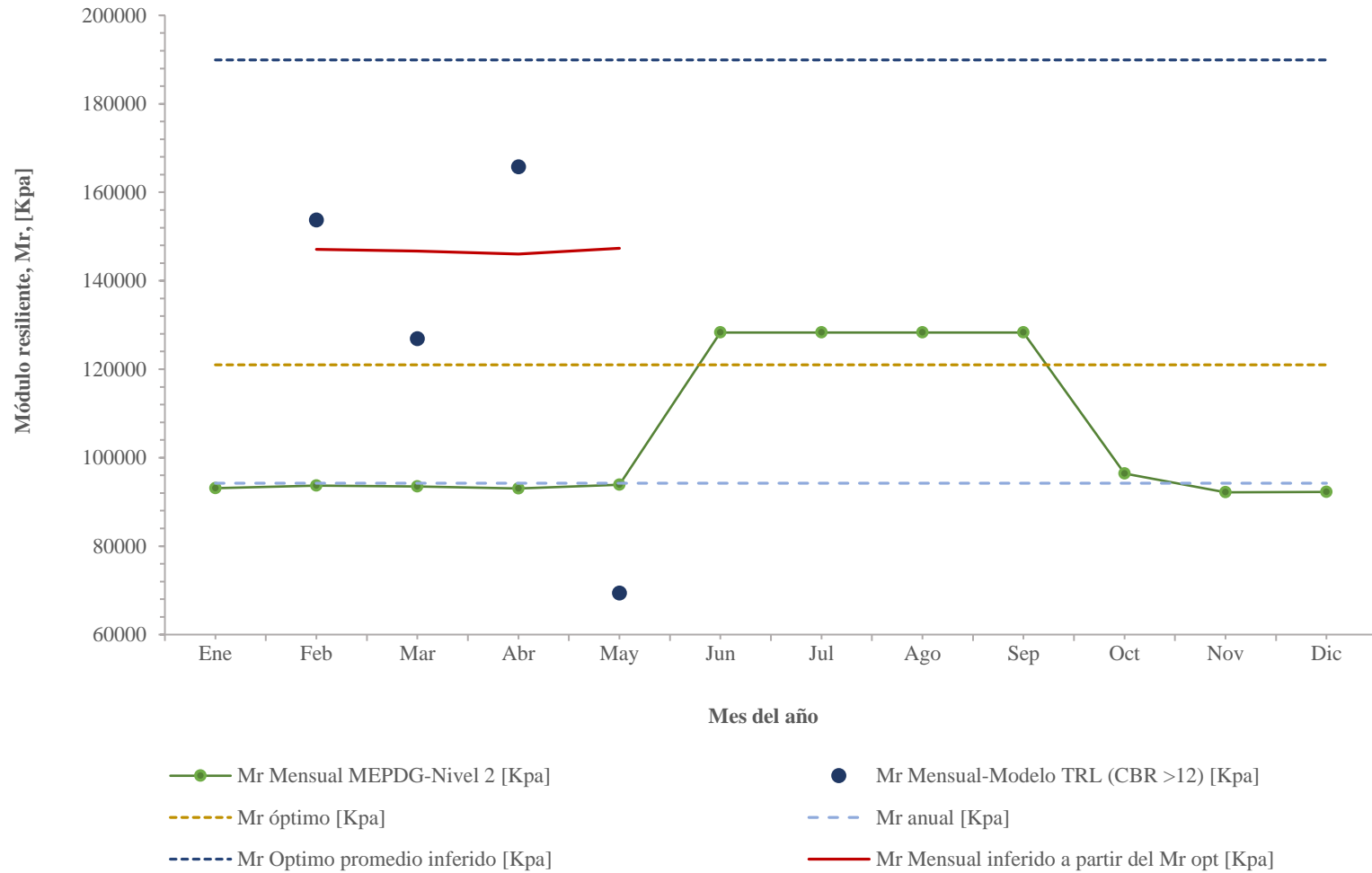
**Tabla 91: Comparativa Mr Modelo MEPDG y Mr en Función de CBR- Promedio Series Históricas - Nivel 2-Muestra Ing. Civil**

Mes	Mr modelo MEPDG - N2 [Kpa]	CBR Mensual Real [%]	Mr mensual, TRL(CBR>12) [Kpa]	Famb [-]	Mr óptimo Mensual calculado, TRL (CBR>12) [Kpa]	CBR Óptimo Mensual, TRL (CBR>12) [%]	Mr Optimo (CBR:22) [Kpa]	Mr anual [Kpa]	Mr Optimo promedio inferido [Kpa]	Mr Mensual MEPDG-Nivel 2 a partir del Mr inferido opt [Kpa]	Error Mr optimo inferido	Mr Optimo real
Ene	93195						120983.11	93497	193752.10			
Feb	92825	34	153711.26	0.76725866	200338.25	55.04	120983.11	93497	193752.10	148657.97	3.3%	65.6%
Mar	92971	24	126913.69	0.768463451	165152.53	38.74	120983.11	93497	193752.10	148891.40	17.3%	36.5%
Abr	92944	39	165759.26	0.768238031	215765.50	62.99	120983.11	93497	193752.10	148847.73	10.2%	78.3%
May	93514	8	69357.23	0.77294874	89730.70	12.78	120983.11	93497	193752.10	149760.44	115.9%	25.8%
Jun	128289						120983.11	93497	193752.10			
Jul	128289						120983.11	93497	193752.10			
Ago	128289						120983.11	93497	193752.10			
Sep	128289						120983.11	93497	193752.10			
Oct	92845						120983.11	93497	193752.10			
Nov	92082						120983.11	93497	193752.10			
Dic	92173						120983.11	93497	193752.10			
<b>Mr Óptimo Inferido [Kpa]</b>					193752.1							

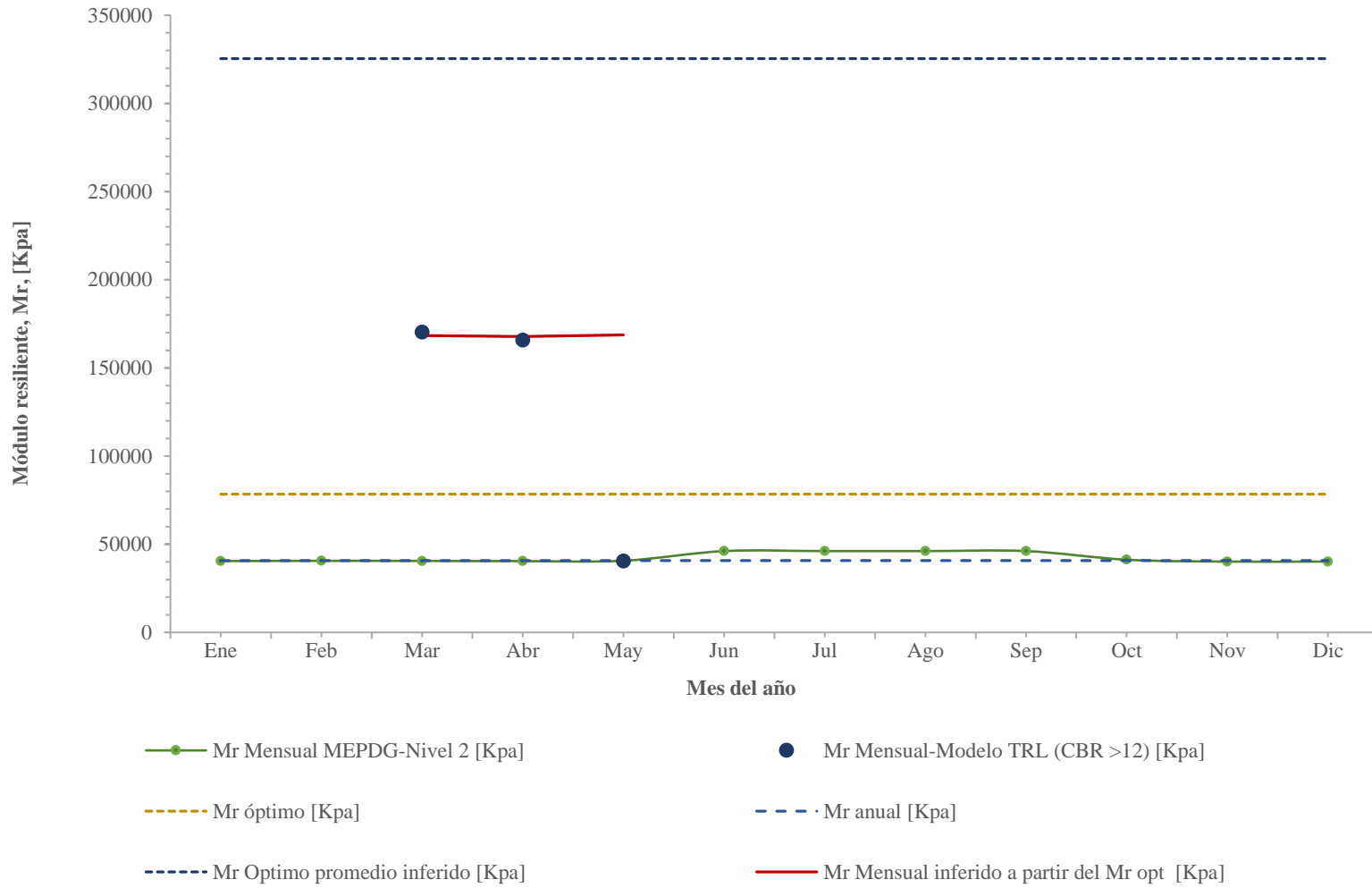
**Tabla 92: Comparativa Mr Modelo MEPDG y Mr en Función de CBR- Promedio Series Históricas - Nivel 2-Muestra de La ladrillera**

Mes	Mr modelo MEPDG - N2 [Kpa]	CBR Mensual Real [%]	Mr mensual, TRL(CBR>12) [Kpa]	Famb [-]	Mr óptimo Mensual calculado, TRL (CBR>12) [Kpa]	CBR Óptimo Mensual, TRL (CBR>12) [%]	Mr Optimo (CBR:10) [Kpa]	Mr anual [Kpa]	Mr Optimo promedio inferido [Kpa]	Mr Mensual MEPDG-Nivel 2 a partir del Mr inferido opt [Kpa]	Error Mr optimo inferido	Mr Optimo real
Ene	40487						78413.76	40568	326043.34			
Feb	40383						78413.76	40568	326043.34			
Mar	40425	41	170381.88	0.515534284	330495.72	136.76	78413.76	40568	326043.34	168086.52	1.3%	321.5%
Abr	40417	39	165759.26	0.515435074	321590.97	130.13	78413.76	40568	326043.34	168054.18	1.4%	310.1%
May	40573	3	40439.80	0.517416805	78157.10	9.94	78413.76	40568	326043.34	168700.31	317.2%	0.3%
Jun	46133						78413.76	40568	326043.34			
Jul	46133						78413.76	40568	326043.34			
Ago	46133						78413.76	40568	326043.34			
Sep	46133						78413.76	40568	326043.34			
Oct	40389						78413.76	40568	326043.34			
Nov	40139						78413.76	40568	326043.34			
Dic	40173						78413.76	40568	326043.34			
<b>Mr Óptimo Inferido [Kpa]</b>					326043.3							

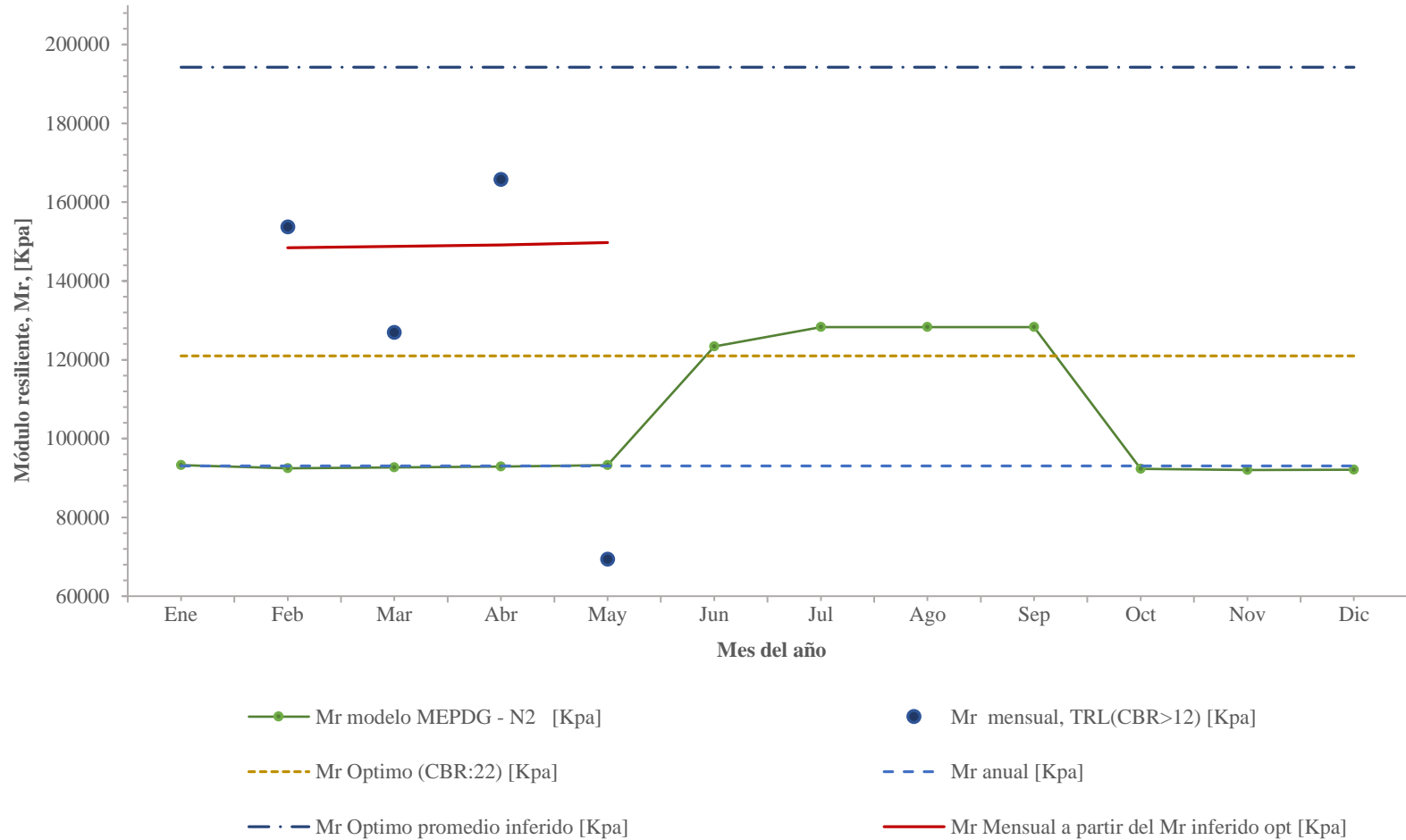




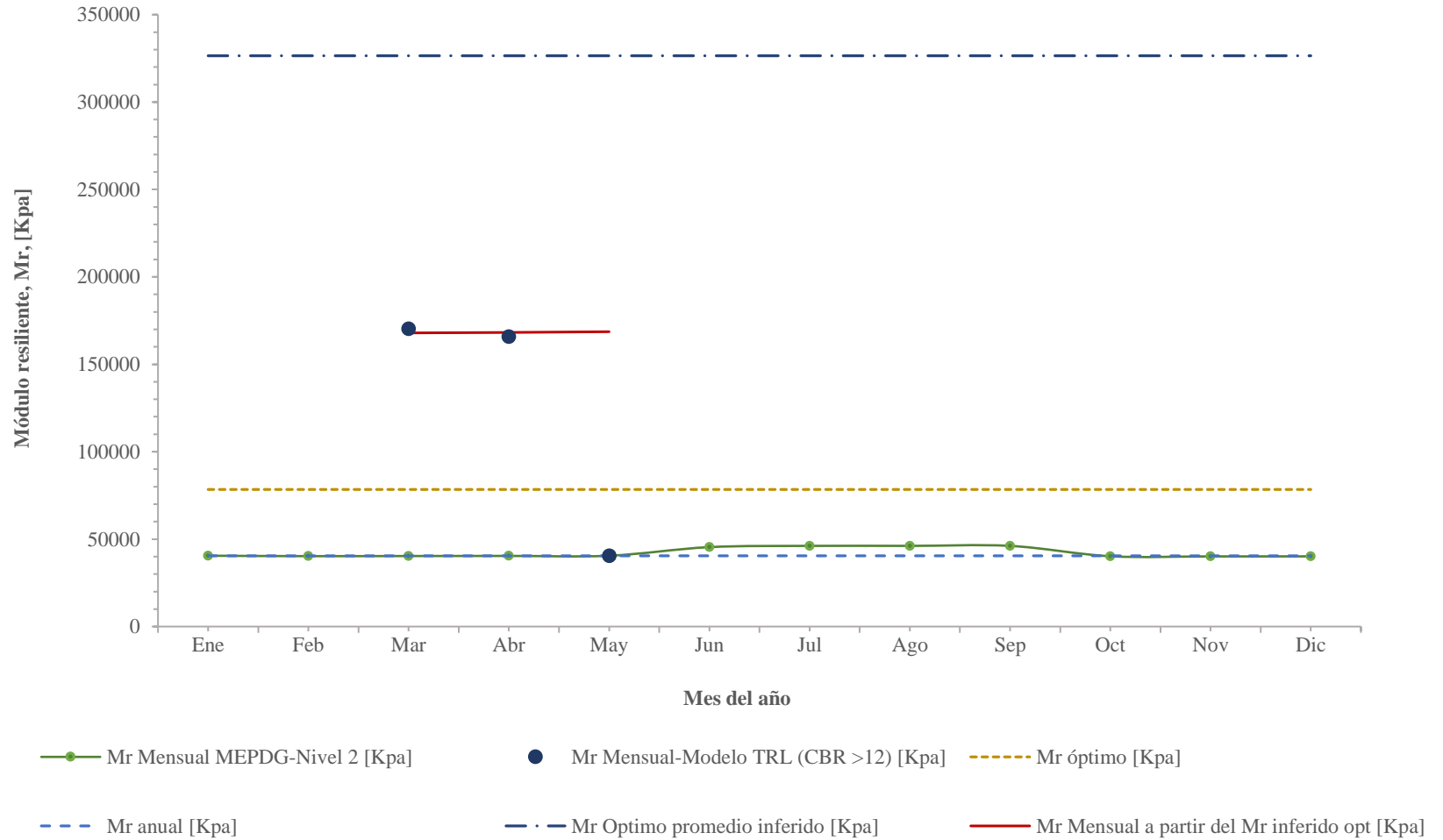
**Figura 143: Comparativa Mr Modelo MEPDG y Mr en Función de CBR- Serie Histórica estación meteorológica Universidad del Cauca-Nivel 2-Muestra Ing. Civil.**



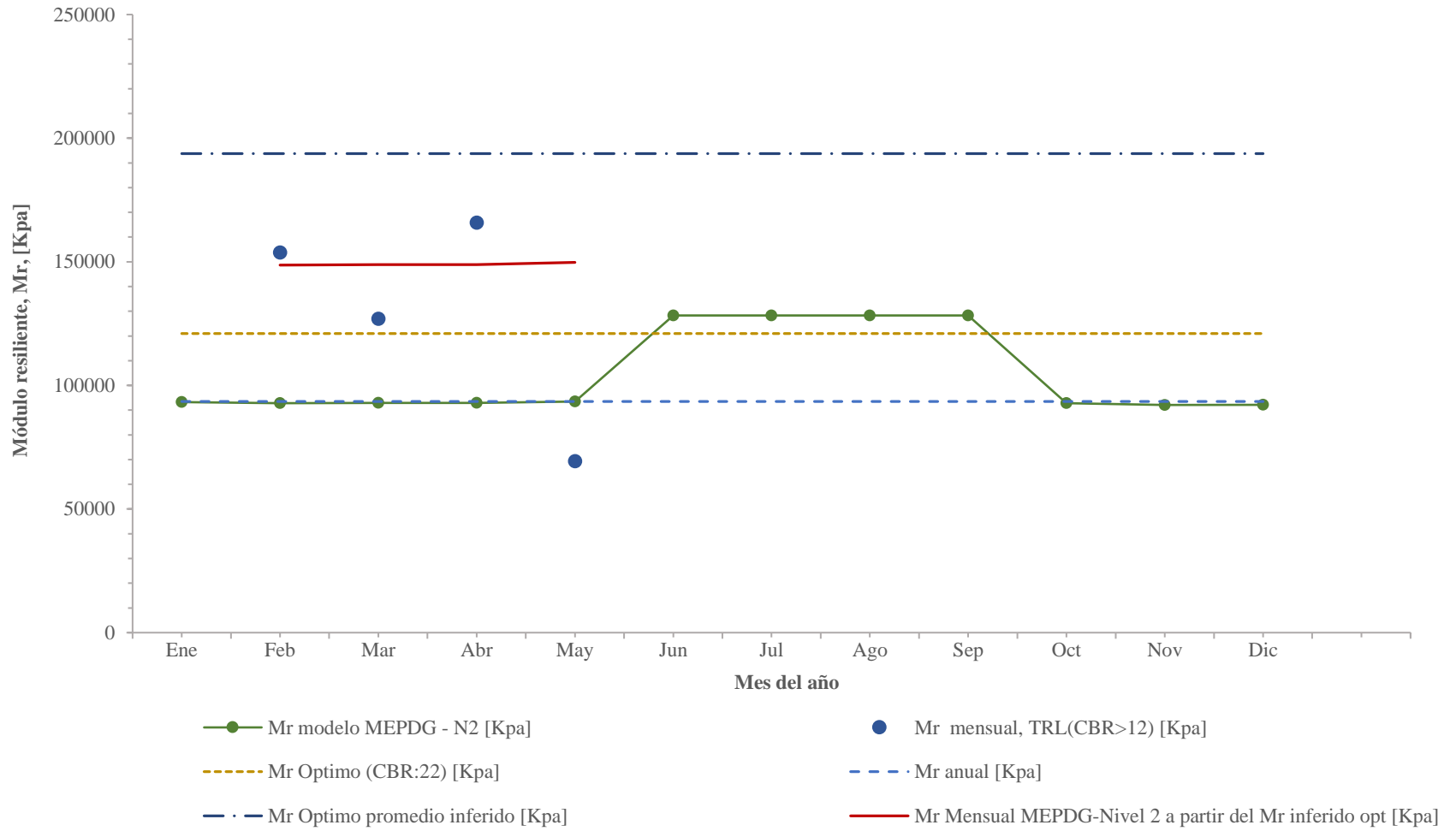
**Figura 144: Comparativa Mr Modelo MEPDG y Mr en Función de CBR- Serie Histórica estación meteorológica Universidad del Cauca-Nivel 2-Muestra de la ladrillera.**



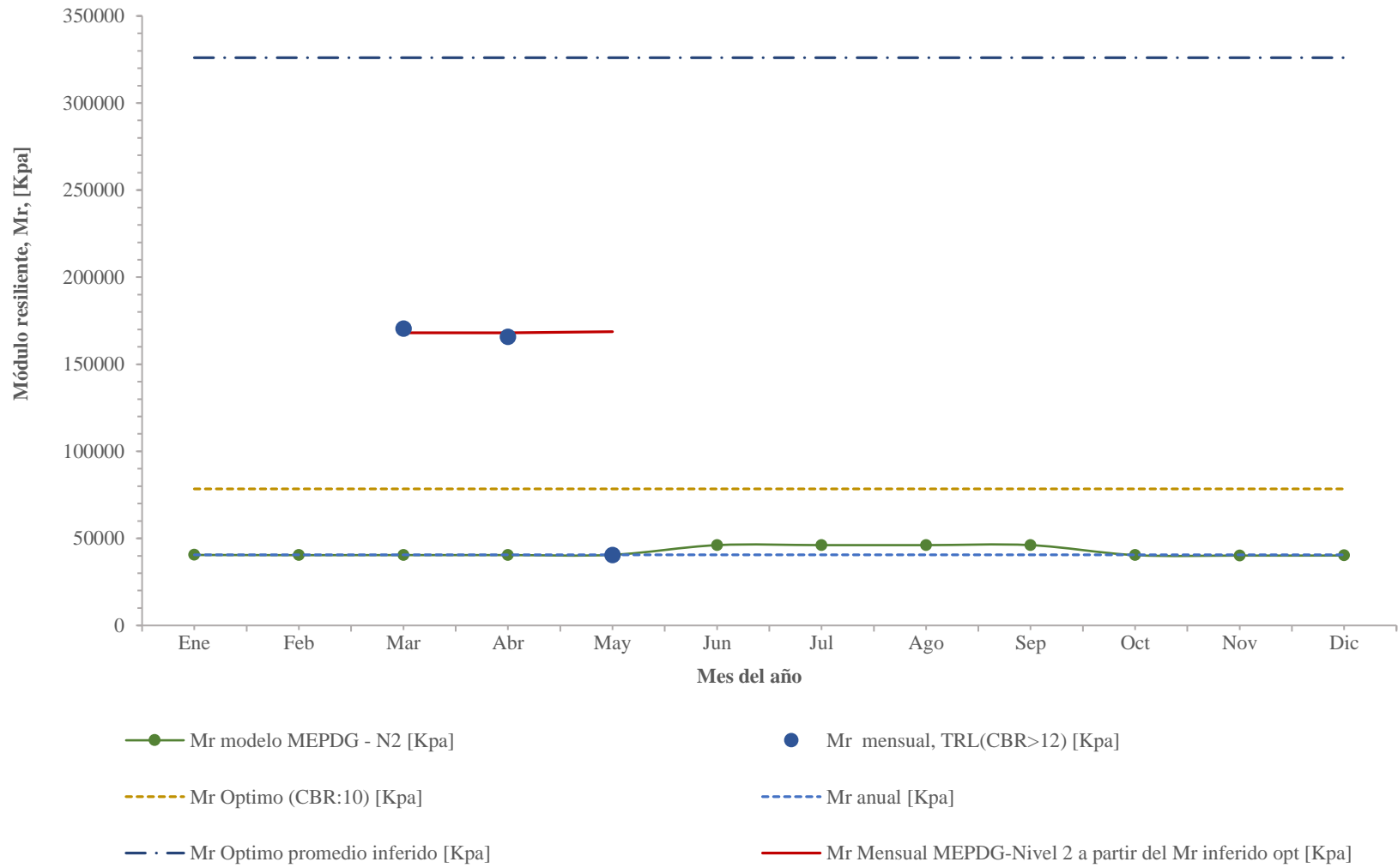
**Tabla 93: Comparativa Mr Modelo MEPDG y Mr en Función de CBR- Serie Histórica estación meteorológica Aeropuerto Guillermo Leon Valencia-Nivel 2-Muestra Ing. Civil**



**Tabla 94: Comparativa Mr Modelo MEPDG y Mr en Función de CBR- Serie Histórica estación meteorológica Aeropuerto Guillermo Leon Valencia-Nivel 2-Muestra de la Ladrillera.**



**Figura 145: Comparativa Mr Modelo MEPDG y Mr en Función de CBR- Promedio Series Históricas -Nivel 2-Muestra Ing. Civil.**



**Figura 146: Comparativa Mr Modelo MEPDG y Mr en Función de CBR- Promedio Series Históricas -Nivel 2-Muestra de la ladrillera**

**Tabla 95: Comparativa Mr Modelo MEPDG y Mr en Función de CBR- Serie Histórica estación meteorológica Universidad del Cauca-Nivel 1-Muestra Ing. Civil.**

Mes	Mr Mensual MEPDG-Nivel 1 [Kpa]	CBR mensual Real [%]	Mr Mensual-Modelo TRL (CBR >12, medido) [Kpa]	Famb [-]	Mr Optimo inferido a partir de mensual - Modelo TRL (CBR >12) [Kpa]	CBR Optimo Mensual -Modelo TRL (CBR >12), [%]	Mr óptimo [Kpa]	Mr anual [Kpa]	Mr Optimo promedio inferido [Kpa]	Mr Mensual MEPDG-Nivel 1 a partir del Mr inferido opt [Kpa]	Error Mr optimo inferido	Mr Optimo real
Ene	97837						120983.11	99287	180708.80			
Feb	98647	34	153711.26	0.815379881	188514.90	49.28	120983.11	99287	180708.80			
Mar	98327	24	126913.69	0.812732099	156156.85	34.99	120983.11	99287	180708.80	146867.85	15.7%	29.1%
Abr	97700	39	165759.26	0.807554575	205260.76	57.52	120983.11	99287	180708.80	145932.22	12.0%	69.7%
May	98834	8	69357.23	0.816923537	84900.52	11.55	120983.11	99287	180708.80	147625.28	112.8%	29.8%
Jun	119419						120983.11	99287	180708.80			
Jul	119419						120983.11	99287	180708.80			
Ago	119419						120983.11	99287	180708.80			
Sep	119419						120983.11	99287	180708.80			
Oct	101626						120983.11	99287	180708.80			
Nov	96296						120983.11	99287	180708.80			
Dic	96493						120983.11	99287	180708.80			
Mr Óptimo Inferido [Kpa]					180708.8							

**Tabla 96: Comparativa Mr Modelo MEPDG y Mr en Función de CBR- Serie Histórica estación meteorológica Universidad del Cauca-Nivel 1-Muestra de la ladrillera.**

Mes	Mr Mensual MEPDG-Nivel 1 [Kpa]	CBR mensual Real [%]	Mr Mensual-Modelo TRL (CBR >12, medido) [Kpa]	Famb [-]	Mr Optimo inferido a partir de mensual - Modelo TRL (CBR >12) [Kpa]	CBR Optimo Mensual -Modelo TRL (CBR >12), [%]	Mr óptimo [Kpa]	Mr anual [Kpa]	Mr Optimo promedio inferido [Kpa]	Mr Mensual MEPDG-Nivel 1 a partir del Mr inferido opt [Kpa]	Error Mr optimo inferido	Mr Optimo real
Ene	42892						78413.76	44094	306241.18			
Feb	43541						78413.76	44094	306241.18			
Mar	43278	41	170381.88	0.551923232	308705.75	120.81	78413.76	44094	306241.18	169021.62	0.8%	293.7%
Abr	42787	39	165759.26	0.54566171	303776.61	117.32	78413.76	44094	306241.18	167104.09	0.8%	287.4%
May	43699	3	40439.80	0.557284968	72565.74	8.69	78413.76	44094	306241.18	170663.61	322.0%	7.5%
Jun	78278						78413.76	44094	306241.18			
Jul	78278						78413.76	44094	306241.18			
Ago	78278						78413.76	44094	306241.18			
Sep	78278						78413.76	44094	306241.18			
Oct	46435						78413.76	44094	306241.18			
Nov	41768						78413.76	44094	306241.18			
Dic	41908						78413.76	44094	306241.18			
Mr Óptimo Inferido [Kpa]					306241.2							

**Tabla 97: Comparativa Mr Modelo MEPDG y Mr en Función de CBR- Serie Histórica estación meteorológica Aeropuerto Guillermo Leon Valencia-Nivel 1-Muestra Ing. Civil**

Mes	Mr Mensual MEPDG-Nivel 1 [Kpa]	CBR mensual Real [%]	Mr Mensual-Modelo TRL (CBR >12) [Kpa]	Famb [-]	Mr Optimo Mensual -Modelo TRL (CBR >12) [Kpa]	CBR Optimo Mensual -Modelo TRL (CBR >12), [%]	Mr óptimo [Kpa]	Mr anual [Kpa]	Mr Optimo promedio inferido [Kpa]	Mr Mensual MEPDG-Nivel 1 a partir del Mr inferido opt [Kpa]	Error Mr optimo inferido	Mr Optimo real
Ene	98065						120983.11	97756	185295.44			
Feb	96785	34	153711.26	0.799985551	192142.54	51.01	120983.11	97756	185295.44	148233.68		
Mar	97174	24	126913.69	0.803202344	158009.61	35.75	120983.11	97756	185295.44	148829.74	17.3%	30.6%
Abr	97476	39	165759.26	0.80569626	205734.18	57.76	120983.11	97756	185295.44	149291.85	9.9%	70.1%
May	98047	8	69357.23	0.810421941	85581.63	11.72	120983.11	97756	185295.44	150167.49	116.5%	29.3%
Jun	117187						120983.11	97756	185295.44			
Jul	119419						120983.11	97756	185295.44			
Ago	119419						120983.11	97756	185295.44			
Sep	119419						120983.11	97756	185295.44			
Oct	96503						120983.11	97756	185295.44			
Nov	96043						120983.11	97756	185295.44			
Dic	96186						120983.11	97756	185295.44			
<b>Mr Óptimo Inferido [Kpa]</b>					185295.4							

**Tabla 98: Comparativa Mr Modelo MEPDG y Mr en Función de CBR- Serie Histórica estación meteorológica Aeropuerto Guillermo Leon Valencia-Nivel 1-Muestra de la Ladrillera**

Mes	Mr Mensual MEPDG-Nivel 1 [Kpa]	CBR mensual Real [%]	Mr Mensual-Modelo TRL (CBR >12) [Kpa]	Famb [-]	Mr Optimo Mensual -Modelo TRL (CBR >12) [Kpa]	CBR Optimo Mensual -Modelo TRL (CBR >12), [%]	Mr óptimo [Kpa]	Mr anual [Kpa]	Mr Optimo promedio inferido [Kpa]	Mr Mensual MEPDG-Nivel 1 a partir del Mr inferido opt [Kpa]	Error Mr optimo inferido	Mr Optimo real
Ene	43069						78414	42830	310057.98			
Feb	42116						78414	42830	310057.98			
Mar	42396	41	170381.88	0.5406667	315132.92	125.42	78414	42830	310057.98	167638.03	1.6%	301.9%
Abr	42618	39	165759.26	0.543503204	304983.05	118.17	78414	42830	310057.98	168517.51	1.7%	288.9%
May	43056	3	40439.80	0.549084	73649.56	8.92	78414	42830	310057.98	170247.88	321.0%	6.1%
Jun	73582						78414	42830	310057.98			
Jul	78278						78414	42830	310057.98			
Ago	78278						78414	42830	310057.98			
Sep	78278						78414	42830	310057.98			
Oct	41915						78414	42830	310057.98			
Nov	41585						78414	42830	310057.98			
Dic	41689						78414	42830	310057.98			
<b>Mr Óptimo Inferido [Kpa]</b>					310058.0							

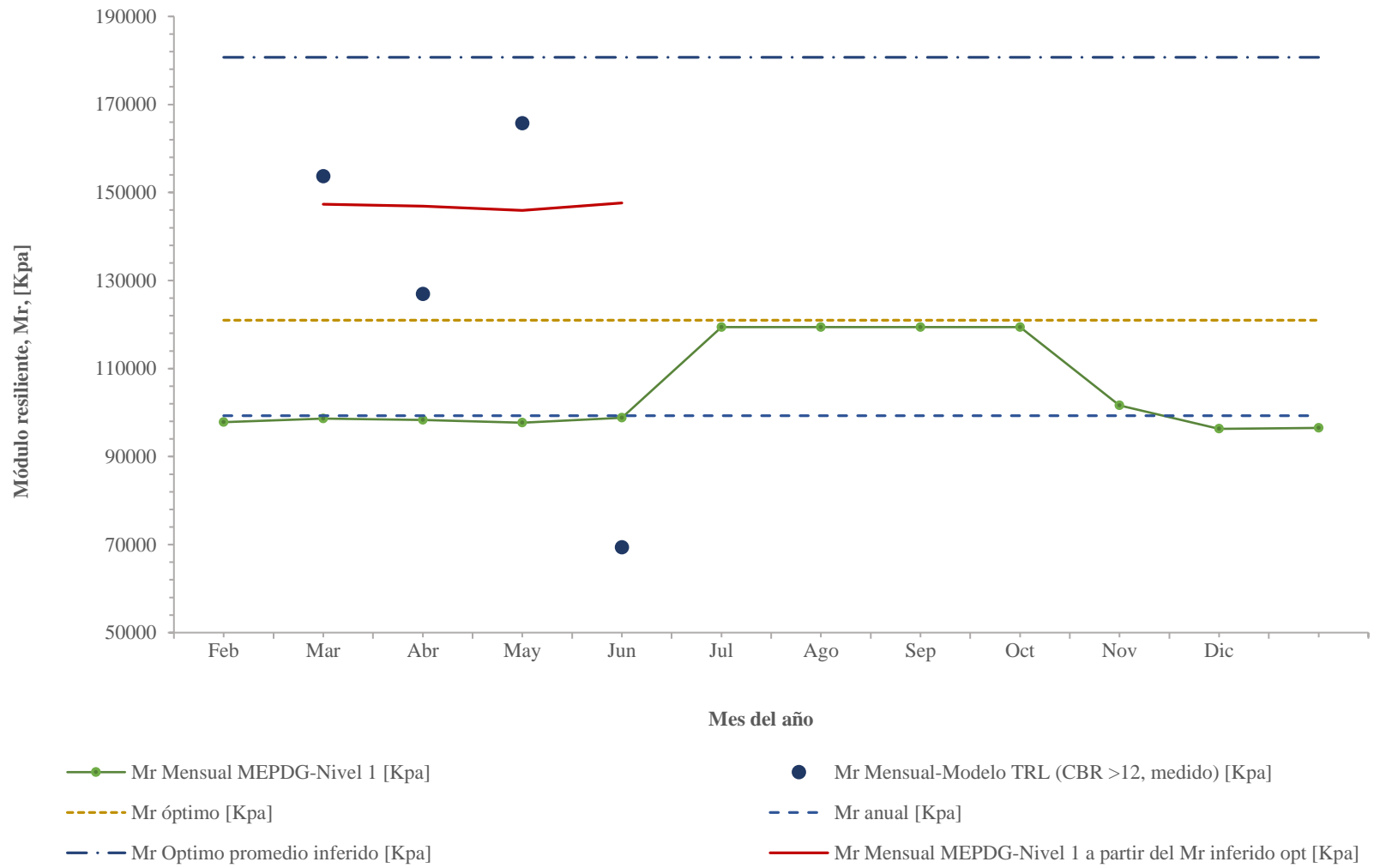


**Tabla 99: Comparativa Mr Modelo MEPDG y Mr en Función de CBR- Promedio Series Históricas - Nivel 1-Muestra Ing. Civil**

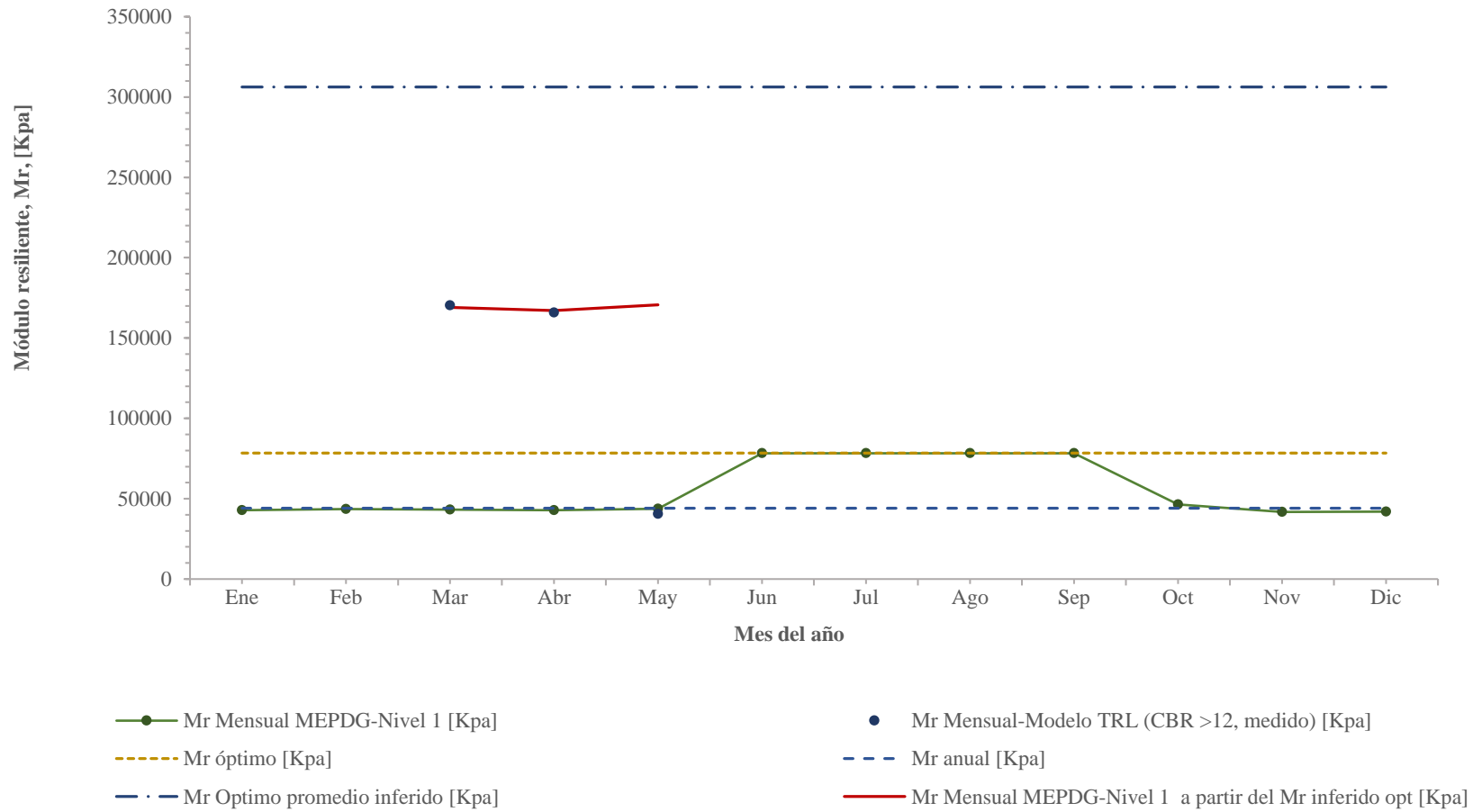
Mes	Mr Mensual MEPDG-Nivel 1 [Kpa]	CBR mensual Real [%]	Mr Mensual-Modelo TRL (CBR >12) [Kpa]	Famb [-]	Mr Optimo Mensual -Modelo TRL (CBR >12) [Kpa]	CBR Optimo Mensual -Modelo TRL (CBR >12), [%]	Mr óptimo [Kpa]	Mr anual [Kpa]	Mr Optimo promedio inferido [Kpa]	Mr Mensual MEPDG-Nivel 1 a partir del Mr inferido opt [Kpa]	Error Mr óptimo inferido	Mr Optimo real
Ene	97947						120983.11	98366	184578.80			
Feb	97399	34	153711.26	0.80505907	190931.65	50.43	120983.11	98366	184578.80	148596.84	3.3%	57.8%
Mar	97620	24	126913.69	0.806886747	157288.10	35.45	120983.11	98366	184578.80	148934.19	17.4%	30.0%
Abr	97579	39	165759.26	0.806549118	205516.64	57.65	120983.11	98366	184578.80	148871.87	10.2%	69.9%
May	98388	8	69357.23	0.813238156	85285.27	11.65	120983.11	98366	184578.80	150106.52	116.4%	29.5%
Jun	119419						120983.11	98366	184578.80			
Jul	119419						120983.11	98366	184578.80			
Ago	119419						120983.11	98366	184578.80			
Sep	119419						120983.11	98366	184578.80			
Oct	97429						120983.11	98366	184578.80			
Nov	96142						120983.11	98366	184578.80			
Dic	96309						120983.11	98366	184578.80			
<b>Mr Óptimo Inferido [Kpa]</b>					184578.8							

**Tabla 100: Comparativa Mr Modelo MEPDG y Mr en Función de CBR- Promedio Series Históricas - Nivel 1-Muestra de La ladrillera**

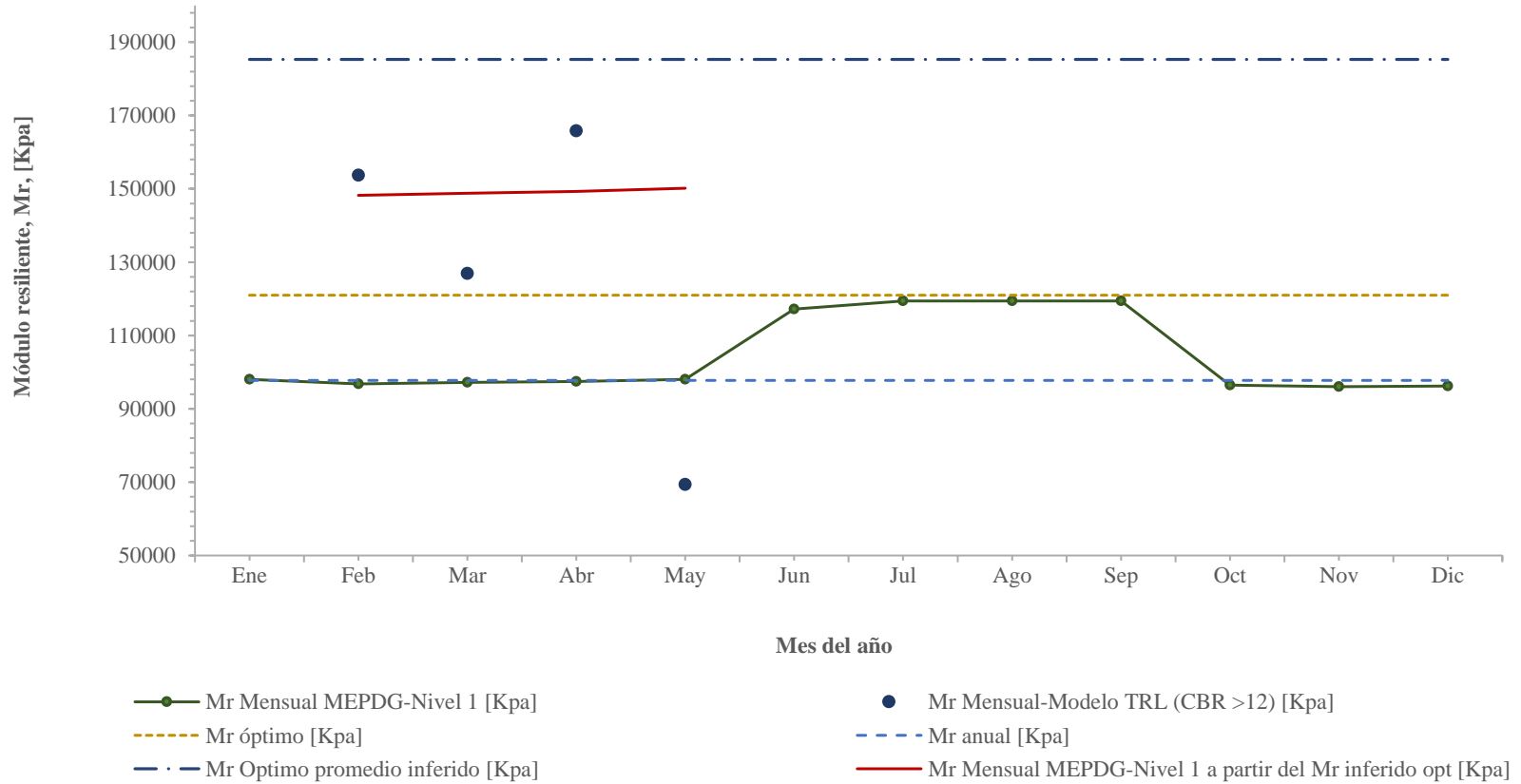
Mes	Mr Mensual MEPDG-Nivel 1 [Kpa]	CBR mensual Real [%]	Mr Mensual-Modelo TRL (CBR >12) [Kpa]	Famb [-]	Mr Optimo Mensual -Modelo TRL (CBR >12) [Kpa]	CBR Optimo Mensual -Modelo TRL (CBR >12), [%]	Mr óptimo [Kpa]	Mr anual [Kpa]	Mr Optimo promedio inferido [Kpa]	Mr Mensual MEPDG-Nivel 1 a partir del Mr inferido opt [Kpa]	Error Mr óptimo inferido	Mr Optimo real
Ene	42977						78413.76	43310	308563.61			
Feb	42561						78413.76	43310	308563.61			
Mar	42726	41	170381.88	0.544880674	312695.76	123.66	78413.76	43310	308563.61	168130.35	1.3%	298.8%
Abr	42695	39	165759.26	0.54448795	304431.46	117.78	78413.76	43310	308563.61	168009.17	1.4%	288.2%
May	43328	3	40439.80	0.552556113	73186.77	8.82	78413.76	43310	308563.61	170498.71	321.6%	6.7%
Jun	78278						78413.76	43310	308563.61			
Jul	78278						78413.76	43310	308563.61			
Ago	78278						78413.76	43310	308563.61			
Sep	78278						78413.76	43310	308563.61			
Oct	42583						78413.76	43310	308563.61			
Nov	41657						78413.76	43310	308563.61			
Dic	41777						78413.76	43310	308563.61			
<b>Mr Óptimo Inferido [Kpa]</b>					308563.6							



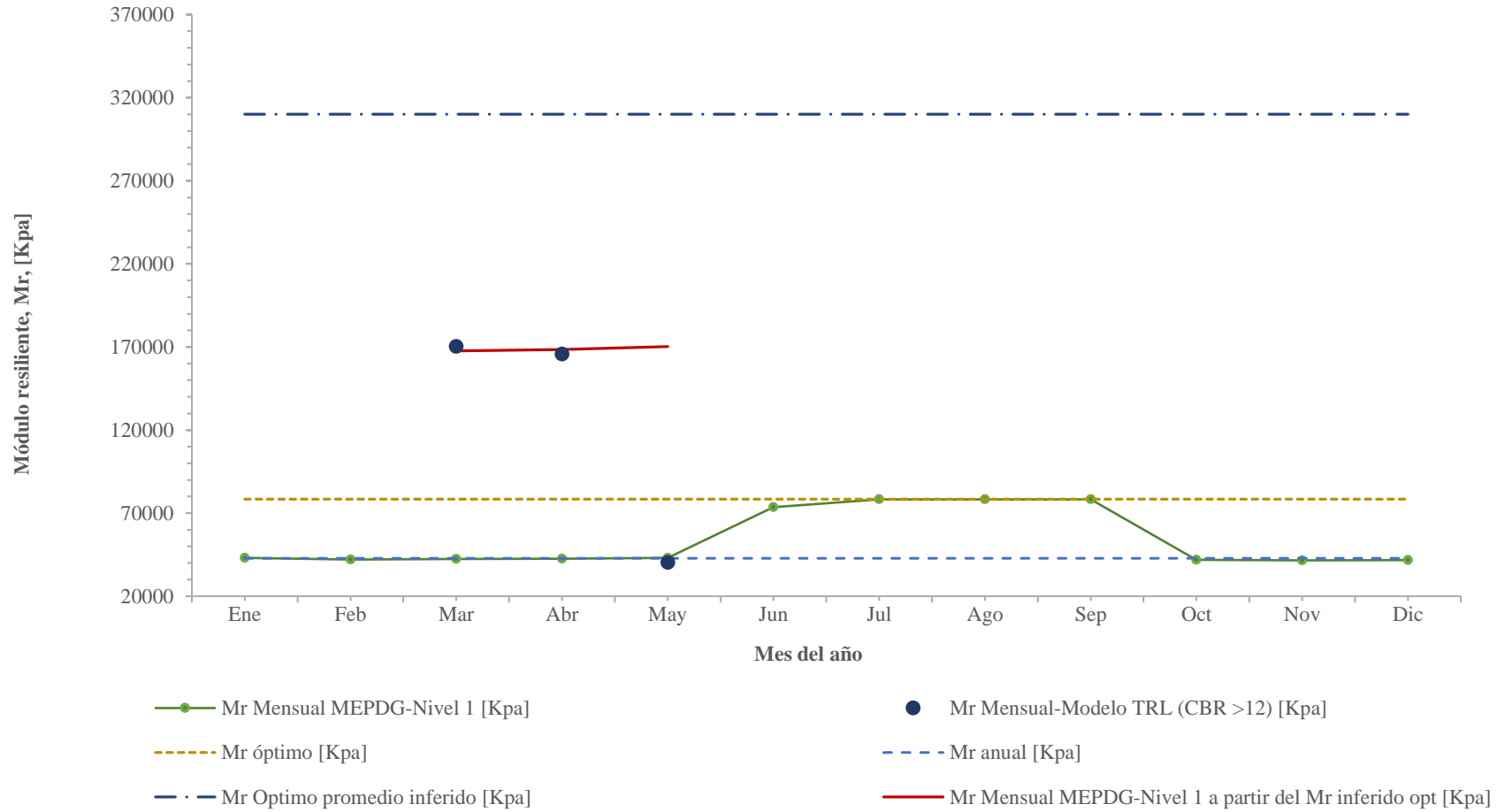
**Figura 147: Comparativa Mr Modelo MEPDG y Mr en Función de CBR- Serie Histórica estación meteorológica Universidad del Cauca-Nivel 1-Muestra Ing. Civil.**



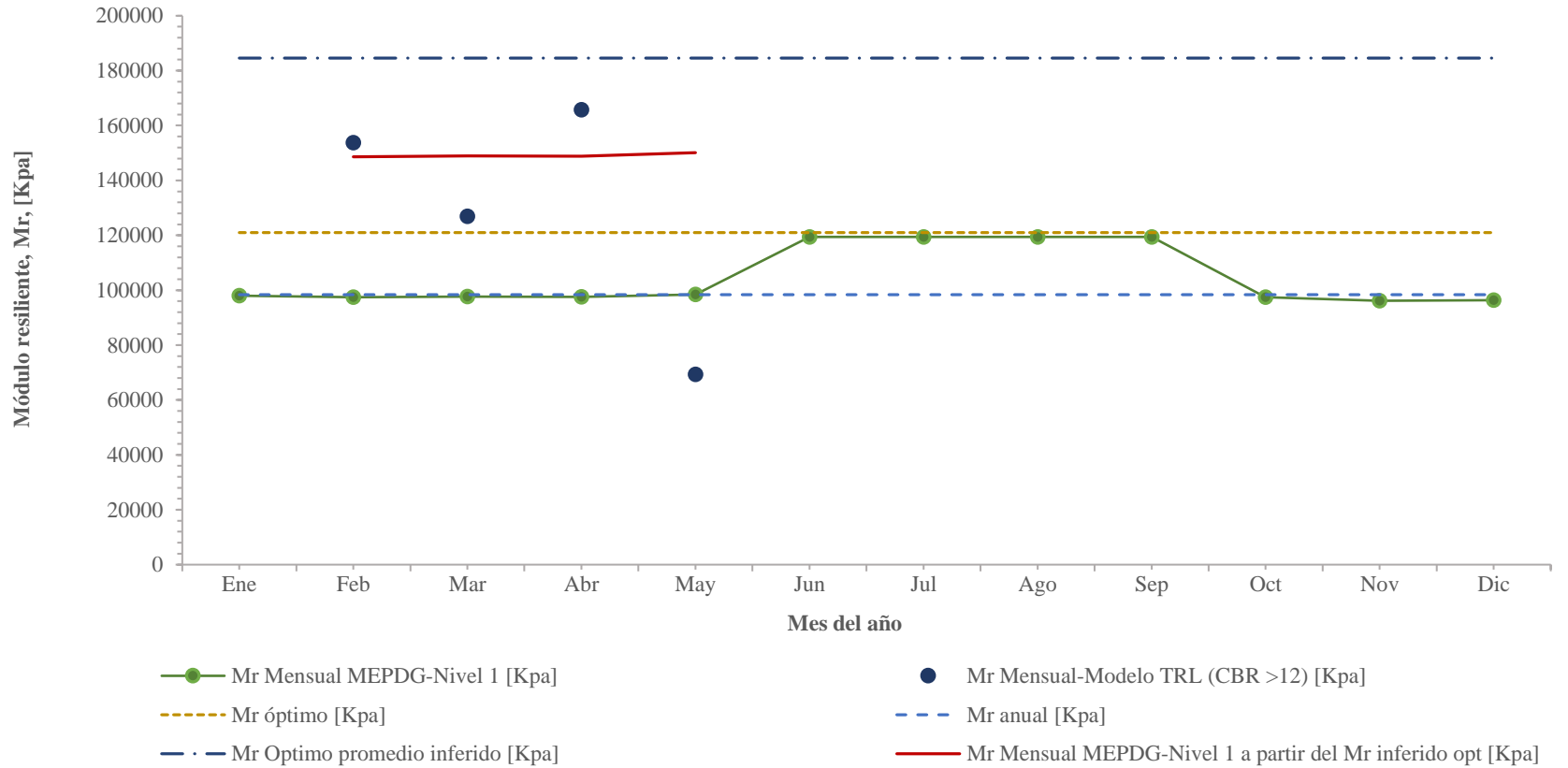
**Figura 148: Comparativa Mr Modelo MEPDG y Mr en Función de CBR- Serie Histórica estación meteorológica Universidad del Cauca-Nivel 1-Muestra de la ladrillera.**



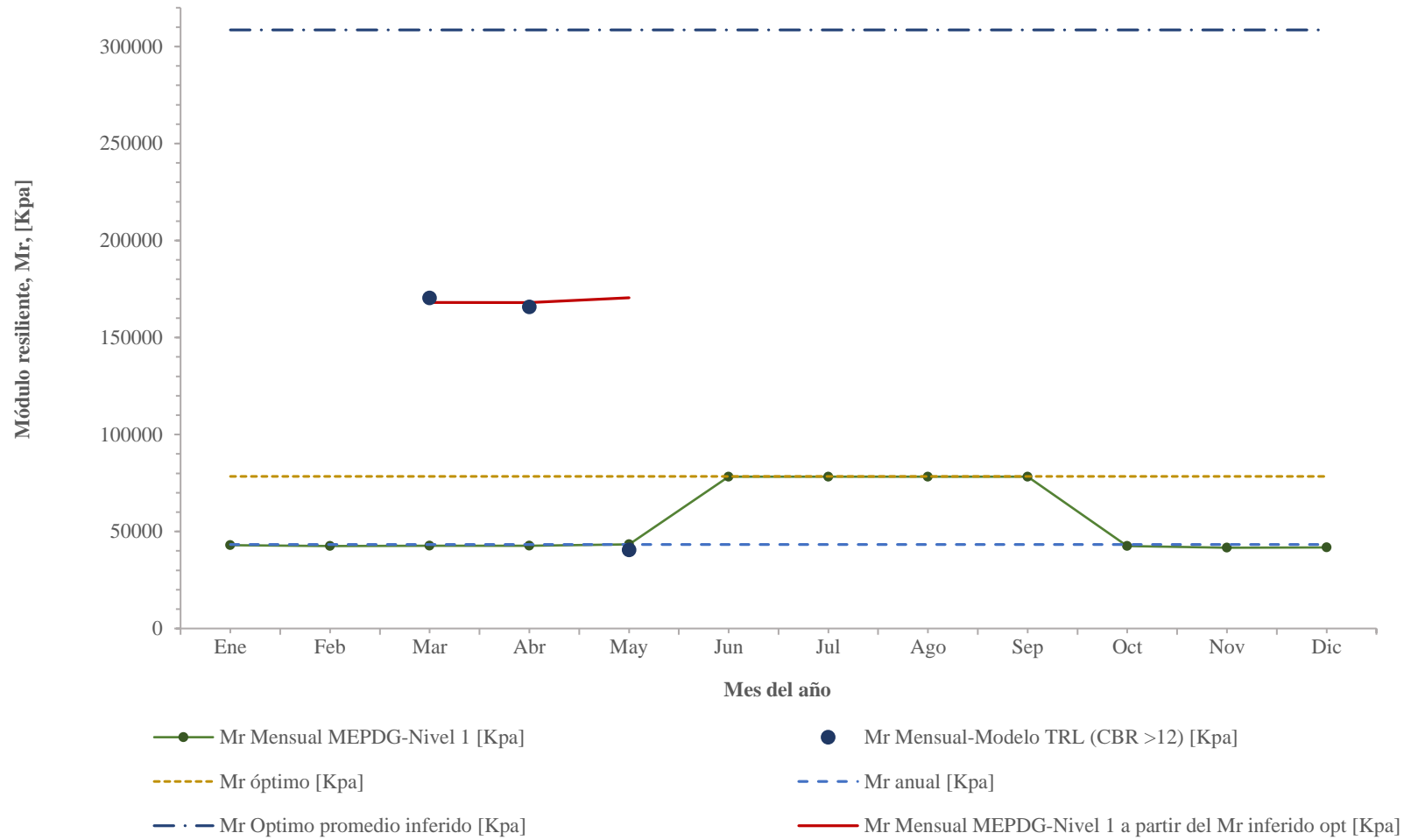
**Figura 149: Comparativa Mr Modelo MEPDG y Mr en Función de CBR- Serie Histórica estación meteorológica Aeropuerto Guillermo Leon Valencia-Nivel 1-Muestra Ing. Civil**



**Figura 150: Comparativa Mr Modelo MEPDG y Mr en Función de CBR- Serie Histórica estación meteorológica Aeropuerto Guillermo Leon Valencia-Nivel 1-Muestra de la Ladrillera**



**Figura 151: Comparativa Mr Modelo MEPDG y Mr en Función de CBR- Promedio Series Históricas - Nivel 1-Muestra Ing Civil.**



1

**Figura 152: Comparativa Mr Modelo MEPDG y Mr en Función de CBR- Promedio Series Históricas - Nivel 1-Muestra de La Ladrillera**

## **6 . ANALISIS DE RESULTADOS**

Los registros históricos de precipitación y temperatura, de la estación meteorológica de la Universidad del Cauca y de la estación meteorológica del aeropuerto presentan un patrón de comportamiento similar, sin embargo, los datos muestran porcentajes de variación bastante altos, principalmente los de precipitación. La variación de los valores de temperatura y precipitación de la estación del aeropuerto, con respecto a los de la Universidad del Cauca, en temperatura varían desde 1.3% hasta 4.6%, que representan diferencias realmente bajas, sin embargo, en precipitación los porcentajes se encuentran entre 3.4% y 35.6%, variaciones que se consideran altas.

De acuerdo a los registros históricos de las estaciones meteorológicas se logra identificar que entre los meses de enero y mayo se presenta el primer periodo húmedo del año, continuando en los meses de junio a septiembre con un periodo seco y finalizando con un periodo aún más húmedo que el de principios de año, que comprende los meses de octubre a diciembre, este fenómeno representa el comportamiento y los cambios en el Módulo resiliente de la subrasante, Teniendo en cuenta que los periodos húmedos se presentan los valores más críticos que corresponderán a los valores más bajos, mientras que en los periodos secos del año se dan los valores más altos.

Los valores de TMI mensuales para las estaciones se encuentran entre valores de 0 a 360, y los anuales alrededor de 160, esto indica que: Popayán, se clasifica como tipo climático Subhúmedo u húmedo en los periodos más secos, y muy húmedo llegando hasta excesivamente húmedo para la temporada del año más húmeda.

Los valores de Succión matricial mensual arrojados por el modelo de La, muestran claramente Una diferencia muy alta con los valores de succión matricial obtenidos mediante



ensayos de papel filtro realizados mensualmente. Lo que es un indicativo de que el modelo representa menos sensibilidad a los cambios climáticos, de como sucede en realidad.

La SWCC obtenida para la muestra de Ing. civil, presenta características muy similares tanto para nivel 1 como para nivel 2, mientras que para la muestra de la ladrillera, se presentan diferencias notables entre los dos niveles, representando la curva para nivel 2, un material más fino, esto se debe a que para nivel 2, el valor de  $h_r$ , parámetro relacionado con el valor de entrada de aire se trata de una constante, lo implica que la pendiente de la curva se defina únicamente mediante los parámetros  $b_f$  y  $c_f$ , que si resultan valores negativos, como en el caso se forjan a tomar como valor 0.03. lo que representa una menor curvatura en la gráfica.

Como era de esperarse en los meses de enero a mayo y septiembre a octubre correspondientes a los dos periodos húmedos del año, se presentan los porcentajes de saturación más altos en el año, mientras que en los meses de junio a septiembre se presentan los más bajos, sin embargo, a pesar de marcarse esta diferencia, ésta es muy baja, siendo más marcada en la de la muestra de ing. Civil, lo que implica que igual la resistencia de las muestras de suelo se presente baja variabilidad durante el año.

El modelo se centra en evaluar los cambios de succión en el suelo, y el comportamiento de éste con respecto a la saturación es adecuado, debido a que en los meses en los que la saturación optima es menor que la saturación mensual termina representando un valor de  $M_r$  optimo mayor que el  $M_r$  Mensual.

Los porcentajes de saturación tanto para la muestra de ingeniería civil como la de la ladrillera, para nivel 1 y nivel 2, Muestran valores parecidos para la estación meteorológica de la Universidad del Cauca y la del aeropuerto, evidenciándose que el porcentaje de saturación promedio se acerca mayormente al obtenido con la serie histórica de la estación meteorológica de la Universidad del Cauca

Comparando los resultados de la saturación tanto para nivel 1 como para nivel 2, los porcentajes para nivel 1 son mayores, debido a la forma de la SWCC, resultando ser más significativo en la muestra de la ladrillera en donde las curvas de SWCC difieren de manera más relevante. De esta manera el modelo arroja valores de Modulo resiliente, inferiores para nivel 1, donde la saturación es mayor y resultara marcándose mayormente esta diferencia en la muestra de la ladrillera

.Al comparar los valores finales de Mr obtenidos a partir de la metodología del MEPDG Y los arrojados por la correlación de Mr en función del CBR, Se observa que existe una diferencia muy marcada presentándose valores muy inferiores con el modelo del MEPDG.

El Mr optimo es muy próximo al Mr de los meses más secos

El Mr anual es muy próximo al Mr de los meses más húmedos

Haciendo uso del Factor ambiental, se dedujo el valor del Mr óptimo para los resultados con correlaciones de Mr en función del CBR, Resultado que se aproxima mayormente a los valores reales, el cual es muy superior al arrojado mediante el Modelo de la MEPDG, y con este se estimó el Mr mensual, mostrándose una cercanía a los puntos obtenidos mediante correlaciones

El módulo resiente optimo inferido a partir de valores reales, muestra un valor muy superior al obtenido en función del CBR realizado en condiciones de humedad y compactación óptimas. Ésto reafirma la teoría de la pérdida de resistencia al corte de los suelos derivados de cenizas volcánicas al someterse a procedimientos de remoldeo y compactación,

El porcentaje de variación entre Mr optimo inferido a partir de correlaciones en función de datos de ensayos de CBR inalterados y Mr optimo del modelo, obtenido en condiciones de humedad y compactación óptimas, podría representar la pérdida de la resistencia por

efectos de remoldeo y compactación, que para el caso, haciendo uso de los resultados de laboratorio que se consideran más confiables, es mayor al 30% para la muestra de ing. Civil y mucho mayor al 100% para la muestra de la Ladrillera. Con lo cual se confirma que la estructura cementante de la muestra de Ing. civil es mucho fuerte que la de la muestra de la Ladrillera, en donde los efectos en la pérdida de la resistencia son mucho mayores,

Con la misma metodología, es decir utilizando el factor ambiental obtenidos mediante el modelo, se intentó trazar el posible modelo derivado a partir de datos reales, logrando observar que los puntos obtenidos para la muestra de ingeniería civil, no logran ajustarse a la curva, presentándose una dispersión bastante alta, lo que no sucede con la muestra de la ladrillera, en donde los resultados reales siguen la misma trayectoria del modelo que tiene como base la obtención del Mr óptimo promedio a partir de Mr óptimos inferidos a partir de valores reales. Con lo que se deduce que efectivamente el modelo resulta menos eficaz para suelos con estructuras de cementación bien formadas, como es el caso del suelo del talud de ing. Civil.

## 7 . CONCLUSIONES

1. El modelo climático creado por la MEPDG, que tiene en cuenta el efecto de la humedad y la temperatura, para la determinación del Mr, podría ser inadecuado para suelos derivados de cenizas volcánicas, debido a que, en éstos, el aporte a la resistencia por parte de la estructura cementante es bastante alto y omitirlo hace que se subestime el valor del Mr, sin embargo, se requiere de un estudio más detallado que incluya el análisis durante una cantidad de meses y un número de muestras considerable que permitan la obtención de una mayor cantidad de datos con los cuales sea factible la obtención de conclusiones mas confiables.
2. El modelo de la MEPDG, podría resultar más adecuado para suelos compactados, no derivados de cenizas volcánicas, debido a que en su planteamiento la metodología involucra características de suelos compactados, además de aspectos climáticos para el cambio de saturación, en donde se incluye la succión como aporte a la resistencia y las propiedades más importantes de los suelos, tales como porcentaje pasa N° 200, Índice de plasticidad etc., sin embargo, existen tipos de suelos, como los estudiados en esta investigación, que corresponden a suelos derivados de cenizas volcánicas, con características muy particulares que influyen más que éstas propiedades en su comportamiento mecánico.
3. El efecto de Los procesos de remoldeo y compactación, en la resistencia de suelos con cenizas volcánicas, suelos típicos de Popayán, debe estudiarse con mayor cuidado, debido a que, si éstos se hacen de la manera más adecuada, podrían obtenerse mejores

resultados, logrando un mayor aprovechamiento de las propiedades que caracterizan este tipo de suelos.

4. Como estrategia de continuación de la investigación podrían plantearse:
- Continuación del proyecto, con la evolución del Mr de suelos de Popayán con un mayor número de suelos y en un mayor tiempo, con el fin de obtener más cantidad de de datos y por lo tanto conclusiones más confiables.
  - Evaluación del modelo de la MEPDG para el cálculo del Mr, en subrasantes que se encuentren en servicio, con el fin de determinar si la cementación ha perdido su efecto y por lo tanto en estos casos el modelo es adecuado.
  - Estimación de nuevas correlaciones con suelos de Popayán, en función del CBR u otros parámetros, que permitan la obtención del módulo resiliente y represente de manera más adecuada la resistencia de los suelos típicos de la zona
  - Estimación cuantitativa del aporte de la cementación en la resistencia de suelos derivados de cenizas volcánicas.
  - Determinación de los efectos del remolde, secado y cementación en el comportamiento mecánico de suelos derivados de cenizas volcánicas mediante pruebas de campo y ensayos de compactación controlados en laboratorio.

## 8 BIBLIOGRAFÍA

- (NCHRP), N. c. (2006). Independent Review of the mechanistic Empirical Pavement Design Guide and Software. *Copyright National Academy of sciences*, 36.
- Almoroax, J. (06 de Enero de 2001). *Climatología Aplicada a la ingeniería*. Obtenido de Metodos de determinacion de las evapotranspiraciones ETP y ETR.: <http://ocw.upm.es/ingenieria-agroforestal/climatologia-aplicada-a-la-ingenieria-y-medioambiente/contenidos/evapotranspiraciones/metodosevapotranspiraciones.pdf>
- Benavides, C. A. (2016). Apuntes de clase de Pavimentos. Popayán: Universidad del Cauca.
- Brown, S. F., O'Relly, M., P., & Loach, S. C. (1970). The Relationship Between California Bearing Ratio and Elastic Stiffness for Compacted Clays. *Ground Engineering Vol. 23, No. 8*, 27–31 pp.
- Calderón, A. U., & Lanamme UCR. (2011). Guía de pruebas de laboratorio y muestreo en campo para la verificación de calidad en materiales de un pavimento asfáltico. *Métodos y Materiales • Año 1, V 45 olumen 1* , 12.
- Carreira, R. (2013). Avaliação das Trajetórias de Umedecimento e Secagem na Deformabilidade Elástica de Solos Compactados . *UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL ESCOLA DE ENGENHARIA DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL .*, 25-67P.
- Cary, C. E., & Zapata, C. E. (2012). Modelo de predicción del módulo resiliente para suelos no saturados. *evista Internacional De Desastres Naturales, Accidentes E Infraestructura Civil*, 12(1), 110-119.
- Castillo, C. (2014). Revisión de los métodos de diseño de pavimentos flexibles “AASHTO93” y el Modelo elástico lineal - KENLAYER , mediante el modelo viscoelástico propuesto por la MEPDG NCHRP 1-37A (3D-MOVE).

- Chang, C. M., Vidal, J., Loria, L. G., Bustos, M., & Delgadillo, R. (2013). IAG239-03-2013. *Aplicabilidad del método mecanístico-Empírico de diseño de pavimentos (MEPDG) AASHTO 2008 en latinoamérica*, 12.
- Chang, C. M.; Vidal, J.; Loria, L. G. (2013). *Aplicabilidad del método mecanístico-empírico de diseño de pavimentos (MEPDG) AASTHO 2008 en latinoamérica*. 10.
- Clifton, A. W., Wilson, G. W., & Barbour, S. L. (1999). *The Emergence of Unsaturated Soil Mechanics: Fredlund Volume*. Ottawa, Ontario, Canada: NRC Research Press.
- Del castillo, R. (2005). *La ingeniería de suelos en las vías terrestres, carreteras, ferrocarriles y aeropistas*. Mexico D.F.: Limusa, SA de C.V. Grupo Norieg Editores.
- EcuRed*. (25 de Mayo de 2017). Obtenido de Conocimiento con todos y para todos: [https://www.ecured.cu/EcuRed:Enciclopedia\\_cubana](https://www.ecured.cu/EcuRed:Enciclopedia_cubana)
- Fredlund, D. G., & Rahardjo, H. (1993). *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. A Wiley-Interscience Publication JOHN WILEY & SONS, INC. .
- Fredlund, D. G., & Xiang, A. (1994). Equations for the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, 1-12.
- García, N. P. (2008). Determinación de curvas características en suelos no saturados con celdas de presión. *Sanfandila, Qro.*, 66.
- Gonzales, J. I. (2008). *Hidrología*. Popayán: Universidad del Cauca.
- Hernández, R., Garnica, P., & Solorio, R. (Enero de 2017). *Visión general sobre la nueva guía de diseño mecanicista AASHTO-ME y los modelos*. Obtenido de [http://www.amaac.org.mx/archivos/eventos/7cma\\_2011/42.pdf](http://www.amaac.org.mx/archivos/eventos/7cma_2011/42.pdf)
- Herrera, M. C. (1 de Agosto de 2006). *Biblioteca universidad de los Andes*. Obtenido de *Suelos derivados de cenizas volcánicas en Colombia- Estudio Fundamental e*



implicaciones en Ingeniería. :

[https://biblioteca.uniandes.edu.co/Tesis\\_2006\\_segundo\\_semestre\\_2/00006401.pdf](https://biblioteca.uniandes.edu.co/Tesis_2006_segundo_semestre_2/00006401.pdf)

IDEAM, I. d. (Diciembre de 2016). *Instituto de Hidrologia Metereologia y estudios ambientales*. Obtenido de

[http://www.pronosticosyalertas.gov.co/web/guest/inicio?\\_3\\_formDate=1485618344](http://www.pronosticosyalertas.gov.co/web/guest/inicio?_3_formDate=1485618344)

[809&p\\_p\\_id=3&p\\_p\\_lifecycle=0&p\\_p\\_state=maximized&p\\_p\\_mode=view&\\_3\\_str](http://www.pronosticosyalertas.gov.co/web/guest/inicio?_3_formDate=1485618344809&p_p_id=3&p_p_lifecycle=0&p_p_state=maximized&p_p_mode=view&_3_str)

[uts\\_action=%2Fsearch%2Fsearch&\\_3\\_cur=1&\\_3\\_format=&\\_3\\_keywords=indices+de+concentracion+de+la+precipitacion&\\_3](http://www.pronosticosyalertas.gov.co/web/guest/inicio?_3_formDate=1485618344809&p_p_id=3&p_p_lifecycle=0&p_p_state=maximized&p_p_mode=view&_3_str)

INVÍAS, I. N. (2012). Seccion 100-Suelos. En *Normas y especificaciones 2012 invias*.

Leiva, P., Loira, L. G., & Navas, A. (20-25 de Noviembre de 2011). Comparación entre modelación de respuestas de pavimentos flexibles con análisis multicapa elastica y elementos finitos. *XVI CILA-congreso Ibero-Latinoamericano de asfalto*. Rio de Janeiro, Brasil: Cpryght 2011, Instituto Brasileiro de petróleo , Gás e Biocombustiveis-IBP.

Lizcano, A., Herrera, M. C., & Santamarina, J. C. (2006). Suelos derivados de cenizas volcánicas en Colombia. *Rev. Int. de desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*. Vol 6(2) 167.

Loria, L. G. (2013). Desarrollo para la guia de diseño de pavimentos de costa rica: CR\_ME. 11.

Lu, N., & Likos, W. J. (2004). *Unsaturated Soil Mechanics*. Canada: JOHN WILEY & SONS.

Matlan, S. J., Mukhlisin, M., & Taha, M. R. (2014). Performance evaluation of four-parameter models of the soil-water characteristic curve. *The scientific world journal*.

- Montaner, M. E., & Almohalla, E. S. (1988). Aproximación por el método de Thornthwaite, al cálculo de infiltración de lluvia útil. *Papeles de geografía, N.O 14*, 223-235.
- Murray, E. J., & Sivakumar, V. (2010). *Unsaturated soils, a fundamental interpretation of soil behaviour*. Oxford: offices.
- NCHRP. (2004). part 2. Design inputs- chapter 3. Environmental effects. En N. C. Program, *Guide for Mechanistic-Empirical Design OF NEW AND REHABILITATED PAVEMENT STRUCTURES* (pág. 52).
- NCHRP. (Agosto de 2010). A national database of subgrade soil-water characteristic curves and selected soil properties for use with the MEPDG. *National cooperative highway research program*.
- NCHRP, N. c. (2000). Appendix dd-1: resilient modulus as function of soil moisture- summary of predictive models. En *Guide for Mechanistic- Empirical Design of new and rehabilitated pavement structures. Part 2. Design inputs*.
- Ng, C. W., Zhou, C., Yuan, Q., & Xu, J. (2013). Resilient modulus of unsaturated subgrade soil: experimental and theoretical investigations. *NRC Research Press - Can. Geotech. J. Vol. 50*, 8-11.
- Ochoa, V. M. (18 de Junio de 2012). Suelos parcialmente saturados, de la investigación a cátedra universitaria. *Boletín ciencias de la Tierra*, 14. Obtenido de <http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/rbct/article/view/31251/43362>
- Orobio, A., & Zaniewski, J. P. (2012). Using the mechanistic-empirical pavement design guide for material selection. *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia*, pp. 138-149.
- Quintana, H. R., & Lizcano, F. R. (2015). Introducción. En H. R. Quintana, & F. R. Lizcano, *Pavimentos: materiales, construcción y diseño*. Bogotá: Ecoe Ediciones.

- Rondon, H. A., & Reyes, F. A. (Diciembre de 2007). Metodologías de diseño de pavimentos flexibles: Tendencia, alcances y limitaciones. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 17-2, 41-65.
- Rondon, H. A., & Reyes, F. A. (Diciembre de 2007). Metodologías de diseño de pavimentos flexibles: Tendencia, alcances y limitaciones. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina* , 17-2, 41-65.
- Rondón, H. A., & Reyes, F. A. (2007). Metodologías de diseño de pavimentos: Tendencias, Alcances y limitaciones. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, Vol. 17-2, pp. 41-65.
- Rondon, H. A., Fernández, W. D., & Hernández , J. A. (2013). Influencia de la Rigidez de la Subrasante y las Capas Granulares sobre la Vida a Fatiga de Mezclas Asfálticas. *Tecno. Lógicas.*, ISSN 0123-7799, No. 31, 53-72p.
- Sánchez, F., & Campagnoli, S. X. (2016). *Pavimentos Asfálticos de carreteras - Gui práctica para los estudios y diseños*. Bogota: Escuela Colombiana de ingeniería Julio Garavito.
- Secretaria de comunicaciones y transportes instituto Mexicano del transporte. (2001). Módulos de resiliencia en suelos finos y materiales granulares. *Publicación Técnica No. 142* , Sanfandila, Qro. Obtenido de <http://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt142.pdf>
- Soto, M. (2008). Geotecnia en Suelos no saturados. *Revista De La Academia Colombiana De Ciencias*, 471-481.
- UNICON , P., & Cementos Lima, S. (2010). *Nueva Guia de diseño empirico Mecanicista - MEPDG*. Duravia concretando caminos.
- Universidad de Nariño - IICA- OEA. (1972). *II Panel sobre suelo volcánicos de America* . Pasto: Instituto interamericano de ciencias Agrícolas de la O. E. A. .

William, J., & Ning, L. (2004). *Unsaturated soil mechanics*. New York: John Wiley & Son.

Yue, E., Bulut, R., & ASCE, M. (2014). Evaluation of the Climatic Factors for the Classification of Oklahoma Pavement Regions. *Geo-Congress 2014 Technical Papers, GSP 234* © ASCE 2014, 11.