

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	26
1.1 ANGOLA. CLIMA, AGRICULTURA Y DEGRADACIÓN DE TIERRAS	26
1.1.1 Generalidades.....	26
1.1.2 Aspectos climáticos.....	27
1.1.3 El desarrollo de la agricultura.....	29
1.1.4 Caracterización de los suelos.....	31
1.1.5 Degradación, desertificación y sequía.....	34
1.2 RESIDUO VEGETAL “CÁSCARA DE CAFÉ” COMO MEJORADOR DEL SUELO..	36
1.2.1 Generalidades.....	36
1.2.2 Estructura y composición.....	37
1.2.3 Procesamiento.....	39
1.2.4 Usos alternativos de los residuos y subproductos del café.....	40
1.3 IMPORTANCIA DEL ESTUDIO DE LA CÁSCARA DE CAFÉ Y SUBPRODUCTOS PARA ANGOLA.....	43
1.3.1 El suelo como sumidero de carbono de los subproductos de café.....	45
1.4 OBJETIVO DEL ESTUDIO	46
2 ANTECEDENTES.....	48
2.1 DEGRADACIÓN DE LOS SUELOS	48
2.1.1 Generalidades.....	48
2.1.2 Degradación de los suelos en el mundo.....	48
2.1.3 Caracterización de las zonas áridas.....	51

2.2	PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO	52
2.2.1	Generalidades	52
2.2.2	Desarrollo físico del sistema radicular	53
2.2.2.1	Aireación.....	54
2.2.2.2	Régimen térmico del suelo.....	56
2.2.2.3	Propiedades dinámicas de los suelos	60
2.2.2.3.1	Resistencia a la penetración	60
2.2.3	Estructura del suelo	61
2.2.3.1	Niveles de organización estructural.....	61
2.2.3.1.1	Mecanismo de formación de los agregados	62
2.2.3.2	Estabilidad de los agregados	64
2.2.3.3	Densidad real.....	65
2.2.3.4	Densidad aparente	65
2.2.3.5	Porosidad.....	67
2.2.3.6	Compactación.....	68
2.2.3.7	Sellado y enconstramiento	69
2.2.3.7.1	Concepto y procesos	69
2.2.3.7.2	Método de estudio y preedición del riesgo	72
2.2.3.7.3	Prácticas de prevención.....	74
2.2.4	Textura del suelo	74
2.2.5	Propiedades hidráulicas del suelo	76
2.2.5.1	Conductividad hidráulica.....	76
2.2.5.2	Infiltración.....	79
2.3	EL AGUA DEL SUELO	81
2.3.1	Generalidades.....	81
2.3.2	Humedad del suelo	82
2.3.3	Métodos de medición	84
2.3.3.1	Técnica de reflectometría en dominio de tiempo	84
2.3.3.1.1	Principios y descripción del método tdr.....	85
2.3.4	Descripción de otros métodos	86
2.3.5	Comparación de los métodos	88

2.4	EROSIÓN HÍDRICA.....	89
2.4.1	Generalidades.....	89
2.4.2	Factores de la erosión hídrica.....	89
2.4.2.1	Agresividad de la lluvia.....	89
2.4.2.2	Erosionabilidad del suelo.....	90
2.4.2.3	Vegetación.....	91
2.4.2.4	Pendiente.....	92
2.4.3	Metodología de evaluación.....	92
2.4.3.1	Medición directa en el campo.....	94
2.4.3.2	Parcelas experimentales y el simulador de lluvia.....	94
2.4.3.3	Predicción a partir de modelos.....	97
2.5	TÉCNICAS DE CONSERVACIÓN DE SUELOS.....	103
2.5.1	Generalidades.....	103
2.5.2	Clasificación de las técnicas de conservación de suelo.....	104
2.5.2.1	Medidas agronómicas.....	105
2.5.2.2	Medidas de manejo de suelo.....	109
2.5.2.3	Métodos mecánicos.....	110
3	MATERIALES Y MÉTODOS.....	112
3.1	CARACTERIZACIÓN DE LAS CONDICIONES CLIMÁTICAS DEL MEDIO.....	112
3.1.1	Temperatura del medio.....	113
3.1.2	Evaporación.....	113
3.2	UNIDADES EXPERIMENTALES.....	114
3.2.1	Características de las bandejas de erosión.....	114
3.2.2	Caracterización de los cinco tipos de suelo.....	116
3.2.2.1	Análisis de las propiedades químicas de los suelos estudiados.....	116
3.2.2.1.1	Extracto de saturación.....	116
3.2.2.1.2	Potencial de hidrogeno (ph).....	116
3.2.2.1.3	Calcio y magnesio.....	117

3.2.2.1.4	Potasio y sodio.....	118
3.2.2.1.5	Porcentaje de caliza	118
3.2.2.1.6	Conductividad eléctrica.....	119
3.2.2.2	Evaluación de las propiedades físicas.....	120
3.2.2.2.1	Materia orgánica	120
3.2.2.2.2	Textura, análisis granulométrico	121
3.2.2.2.3	Estabilidad de los agregados	123
3.2.2.2.4	Porosidad.....	123
3.2.2.2.5	Densidad aparente.....	124
3.2.2.2.6	Conductividad hidráulica	124
3.2.3	Cáscara de café.....	125
3.3	SIMULADOR DE LLUVIA. CARACTERIZACIÓN	126
3.3.1	Componentes del simulador.....	127
3.3.2	Características del gotero.....	129
3.3.2.1	Tamaño de las gota	129
3.3.2.2	Velocidad de las gotas	130
3.3.3	Caracterización de la lluvia simulada.....	131
3.3.3.1	Cantidad de lluvia.....	131
3.3.3.2	Intensidad de la lluvia.....	131
3.3.3.3	Cantidad de movimiento y energía cinética.....	133
3.4	DISEÑO EXPERIMENTAL	134
3.4.1	Descripción del diseño experimental.....	134
3.4.2	Procedimiento	136
3.4.2.1	Balance hídrico y la pérdida de suelo.....	138
3.4.2.1.1	Medición de la pérdida de suelo.....	138
3.4.2.1.2	Escorrentía.....	138
3.4.2.1.3	Infiltración.....	139
3.4.2.2	Proceso de humectación – desecación. evaluaciones y cuantificación	139
3.4.2.2.1	Capacidad de campo y punto de marchitamiento.....	139
3.4.2.2.2	Determinación del contenido de agua del suelo	140

3.4.2.2.3	Resistencia a la penetración	141
4	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	143
4.1	Análisis de las condiciones climáticas del medio	143
4.2	UNIDADES EXPERIMENTALES.....	144
4.2.1	Estudio de los suelos	144
4.2.1.1	Caracterización de las propiedades físico-químicas.....	144
4.2.1.2	Los suelos de las zonas cafeteras de Angola y su relacion con los suelos estudiados en la experiencia.....	133
4.2.1.3	Análisis de la influencia del residuo sobre las propiedades físicas de los suelos.....	148
4.2.1.3.1	Estabilidad de los agregados	148
4.2.1.3.2	Porosidad.....	151
4.2.1.3.3	Densidad aparente.....	154
4.2.1.3.4	Conductividad hidráulica	157
4.2.1.4	Análisis de la influencia del residuo sobre el balance hídrico	160
4.2.1.4.1	Influencia sobre la pérdida del suelo	160
4.2.1.4.2	Influencia sobre la escorrentía.....	164
4.2.1.4.2.1	Análisis de las variables residuos arrastrados, inicio de encharcamiento e inicio de escorrentía	167
4.2.1.4.3	Efecto sobre la tasa de infiltración.....	170
4.2.1.5	Análisis del proceso de humectación- desecación	173
4.2.1.5.1	Humedad del suelo	173
4.2.1.5.2	Resistencia a la penetración	177
4.2.2	Influencia de las técnicas de conservación	180
4.2.2.1	Análisis general de los métodos de aplicación del residuo vegetal en las variables estudiadas	180
5	CONCLUSIONES.....	182

6	BIBLIOGRAFÍAS	185
7	ANEXOS	216

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO I: TABLAS Y GRAFICAS DE LAS CONDICIONES CLIMÁTICAS DE ANGOLA

<i>Anexo I.1: Temperatura del suelo a la profundidad de 0,20 m.....</i>	<i>202</i>
<i>Anexo I.2: Temperatura del suelo a la profundidad de 0,50 m.....</i>	<i>202</i>
<i>Anexo I.3: Temperatura del suelo a la profundidad de 1,00 m.....</i>	<i>203</i>
<i>Anexo I.4: Valores medios de temperaturas máximas.....</i>	<i>203</i>
<i>Anexo I.5: Valores medios de temperaturas mínimas.....</i>	<i>204</i>
<i>Anexo I.6: Numero de días de precipitación.....</i>	<i>205</i>
<i>Anexo I.7: Evaporación Piche.....</i>	<i>206</i>
<i>Anexo I.8: Evapotranspiración potencial calculada.....</i>	<i>207</i>
<i>Anexo I.9: Evaporación tina clase A.....</i>	<i>208</i>
<i>Anexo I.10: Temperatura media anual.....</i>	<i>209</i>
<i>Anexo I.11: Precipitación media anual.....</i>	<i>210</i>

ANEXO II: GRAFICAS DE LA DETERMINACIÓN DE LA ENERGÍA CINÉTICA

<i>Anexo II.1: Distribución de la energía cinética y porcentaje acumulado.....</i>	<i>211</i>
--	------------

ANEXO III: BALANCE HÍDRICO Y PÉRDIDA DE SUELO

<i>Anexo III.1. Cuantificación de los parámetros evaluados en la simulación de lluvia (s. sin costra).....</i>	<i>212</i>
<i>Anexo III.2. Cuantificación de los parámetros evaluados en la simulación de lluvia (s. con costra).....</i>	<i>213</i>
<i>Anexo III.3. Variables dependientes de la escorrentía.....</i>	<i>214</i>
<i>Anexo III.4. Dinámica de la infiltración durante el experimento.....</i>	<i>215</i>

<i>Anexo III.5. Tasa de infiltración estimada con la ecuación de Horton.....</i>	<i>215</i>
<i>Anexo III.6 Dinámica de la pérdida de suelo durante el experimento.....</i>	<i>216</i>
<i>Anexo III.7. Dinámica de la concentración durante el experimento.....</i>	<i>216</i>
<i>Anexo III.8. Dinámica de la escorrentía durante el experimento.....</i>	<i>217</i>
<i>Anexo III.9. Cuantificación de los valores de escorrentía.....</i>	<i>218</i>
<i>Anexo III.10. Cuantificación de los valores de escorrentía.....</i>	<i>219</i>
<i>Anexo III.11. Cuantificación de los valores de escorrentía.....</i>	<i>220</i>
<i>Anexo III.12. Cuantificación de los valores de pérdida de suelo.....</i>	<i>221</i>
<i>Anexo III.13. Cuantificación de los valores concentración.....</i>	<i>222</i>
<i>Anexo III.14. Cuantificación de los valores de pérdida de suelo.....</i>	<i>223</i>
<i>Anexo III.15. Infiltración (l).....</i>	<i>224</i>
<i>Anexo III.16. Infiltración (mm).....</i>	<i>225</i>
<i>Anexo III.17. Infiltración (mm/h).....</i>	<i>226</i>

ANEXO IV: ANÁLISIS DE REGRESIÓN

<i>Anexo IV.1. Valor estimado de la tasa de infiltración (K_p) por la ecuación de regresión de Philip.....</i>	<i>227</i>
<i>Anexo IV.2. Valor estimado de la tasa de infiltración (K) por la ecuación de regresión de Horton.....</i>	<i>228</i>

ANEXO V: AJUSTE DE LA TASA DE INFILTRACIÓN CON LAS ECUACIONES DE REGRESIÓN DE PHILIP Y HORTON

ANEXO VI: ESTUDIO DE LA HUMEDAD DEL SUELO (5 cm de profundidad)

<i>Anexo VI.1. Medición de la humedad a los 5 cm. de profundidad en el suelo 1.....</i>	<i>242</i>
<i>Anexo VI.2. Medición de la humedad a los 5 cm. de profundidad en el suelo 2.....</i>	<i>242</i>
<i>Anexo VI.3. Medición de la humedad a los 5 cm. de profundidad en el suelo 3.....</i>	<i>243</i>
<i>Anexo VI.4. Medición de la humedad a los 5 cm. de profundidad en el suelo 4.....</i>	<i>243</i>
<i>Anexo VI.5. Medición de la humedad a los 5 cm. de profundidad en el suelo 5.....</i>	<i>243</i>

ANEXO VII: ESTUDIO DE LA HUMEDAD DEL SUELO (10 cm de profundidad)

<i>Anexo VII.1. Medición de la humedad a los 10cm de profundidad en el suelo 1.....</i>	<i>244</i>
<i>Anexo VII.2. Medición de la humedad a los 10cm de profundidad en el suelo 2.....</i>	<i>244</i>
<i>Anexo VII.3. Medición de la humedad a los 10 cm de profundidad en el suelo 3.....</i>	<i>245</i>
<i>Anexo VII.4. Medición de la humedad a los 10 cm de profundidad en el suelo 4.....</i>	<i>245</i>
<i>Anexo VII.5 Medición de la humedad a los 10 cm de profundidad en el suelo 5.....</i>	<i>245</i>

ANEXO VIII: RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN

Anexo VIII.1. Medición de la resistencia a la penetración en el suelo 1.....246
Anexo VIII.2. Medición de la resistencia a la penetración en el suelo 2.....246
Anexo VIII.3. Medición de la resistencia a la penetración en el suelo 3.....247
Anexo VIII.4. Medición de la resistencia a la penetración en el suelo 4.....247
Anexo VIII.5. Medición de la resistencia a la penetración en el suelo 5.....247

**ANEXO IX: RESUMEN ESTADÍSTICO DEL EFECTO DE LA POSICIÓN
DEL RESIDUO VEGETAL EN RELACIÓN AL TIPO DE SUELO
Y ESTADO DEL SUELO**

Anexo IX.1. Variación de la escorrentía en relación al residuo vegetal y el tipo del suelo.....248
Anexo IX.2. Variación de la escorrentía en relación al residuo vegetal y al estado del suelo248
Anexo IX.3. Variación de la pérdida del suelo en relación al residuo vegetal y el tipo del suelo...249
Anexo IX.4. Variación de la pérdida del suelo en relación al residuo vegetal y el est. del suelo...249
Anexo IX.5. Variación de la pérdida del suelo en relación al residuo vegetal y el est. de suelo....250
Anexo IX.6. Variación de la pérdida del suelo en relación al residuo vegetal y el est. de suelo250

ANEXO X: PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO

Anexo X.1. Variación de la estabilidad de los agregados.....251
Anexo X.2. Variación de la densidad aparente.....251
Anexo X.3. Variación de la conductividad hidráulica.....252
Anexo X.4. Variación de la porosidad del suelo.....252
Anexo X.5. Valores de las propiedades físicas estudiadas en suelo sin costra.....253
Anexo X.6. Valores de las propiedades físicas estudiadas en suelo con costra.....254

**ANEXO XI: IMÁGENES DEL DESARROLLO DE LA VEGETACIÓN
ESPONTÁNEA Y LA COSTRA**

*Anexo XI.1. Comparación del desarrollo de la vegetación espontánea 5 meses después de la simulación
de lluvia en los tratamiento sin formación de encostramiento.....255*
*Anexo XI.2. Comparación del desarrollo de la vegetación espontánea 5 meses después de la
simulación de lluvia en los tratamiento con formación de encostramiento.....260*
Anexo XI.3. Encostramiento en los tratamientos.....265

ANEXO XII: FICHAS DE CAMPO

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Caracterización de las condiciones climáticas de Angola.....</i>	<i>14</i>
<i>Tabla 2. Distribución de los suelos de Angola.....</i>	<i>18</i>
<i>Tabla 3. Composición química de la pulpa de café.....</i>	<i>24</i>
<i>Tabla 4. Distribución porcentual de las estructuras principales del café en cereza.....</i>	<i>25</i>
<i>Tabla 5. Producción de café en África.....</i>	<i>32</i>
<i>Tabla 6. Clasificación de la aireación del suelo.....</i>	<i>42</i>
<i>Tabla 7. Granulometría y su comportamiento.....</i>	<i>61</i>
<i>Tabla 8. Modelo cuantitativo de la evaluación directa e indirecta de la erosión.....</i>	<i>79</i>
<i>Tabla 9. Diferencias entre las parcelas experimentales.....</i>	<i>81</i>
<i>Tabla 10. Valores del LS según el rango de pendiente.....</i>	<i>88</i>
<i>Tablas 11y 12. Valores del factor P.....</i>	<i>89</i>
<i>Tabla 13. Tipos de franja con relación a la pendiente del terreno, agente erosivo y cultivo a sembrar.....</i>	<i>93</i>
<i>Tabla 14. Resumen de los valores calculados de la energía cinética.....</i>	<i>119</i>
<i>Tabla 15. Factores y niveles del diseño experimental.....</i>	<i>120</i>
<i>Tabla 16. Esquema del diseño experimental.....</i>	<i>121</i>
<i>Tabla 17. Textura de los suelos estudiados.....</i>	<i>146</i>
<i>Tabla 18. Análisis físico químico.....</i>	<i>131</i>
<i>Tabla 19. Análisis de las propiedades físicas a estudiar (antes de las evaluaciones).....</i>	<i>132</i>
<i>Tabla 20. Influencia de la estabilidad de los agregados en todos los niveles.....</i>	<i>150</i>
<i>Tabla 21. Análisis de varianza de la estabilidad de los agregados.....</i>	<i>151</i>
<i>Tabla 22. Influencia de la porosidad en todos los niveles de los factores.....</i>	<i>153</i>
<i>Tabla 23. Análisis de varianza de la porosidad.....</i>	<i>154</i>
<i>Tabla 24. Influencia de la densidad aparente en todos los niveles.....</i>	<i>156</i>
<i>Tabla 25. Análisis de varianza de la densidad aparente.....</i>	<i>157</i>
<i>Tabla 26. Influencia de la conductividad hidráulica en todos los niveles.....</i>	<i>159</i>
<i>Tabla 27. Análisis de varianza de la conductividad hidráulica.....</i>	<i>160</i>
<i>Tabla 28. Influencia de la pérdida de suelo en todos los niveles de los factores estudiados.....</i>	<i>162</i>
<i>Tabla 29. Análisis de varianza de la pérdida de suelo.....</i>	<i>163</i>
<i>Tabla 30. Influencia de la concentración en todos los niveles de los factores.....</i>	<i>163</i>
<i>Tabla 31. Análisis de varianza de la concentración.....</i>	<i>164</i>
<i>Tabla 32. Influencia de la escorrentía en todos los niveles de los factores estudiados.....</i>	<i>166</i>
<i>Tabla 33. Análisis de varianza de la escorrentía.....</i>	<i>166</i>
<i>Tabla 34. Influencia de las variables residuos arrastrados, inicio de encharcamiento y inicio de escorrentía.....</i>	<i>153</i>

Tabla 35. Análisis de varianza de las variables dependientes de la escorrentía.....	168
Tabla 36. Influencia de los parámetros evaluados: escorrentía, pérdida de suelo y tasa de infiltración.....	172
Tabla 37. Análisis de varianza de los parámetros evaluados: escorrentía, pérdida de suelo y tasa de infiltración.....	172
Tabla 38. Influencia de la humedad en todos los niveles de los factores estudiados.....	162
Tabla 39. Análisis de varianza de la humedad del suelo.....	162
Tabla 40. Influencia de la resistencia a la penetración en todos los niveles de los factores estudiados ..	165
Tabla 41. Análisis de varianza de la resistencia a la penetración	165

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de Angola.....	13
Figura 2. Principales regiones de producción agropecuaria.....	16
Figura 3. Representación geográfica de los suelos de Angola.....	20
Figura 4. Estructura del café.....	24
Figura 5. Frutos, granos y la cáscara.....	24
Figura 6. Producción de café robusta y arabica.....	30
Figura 7. Causas de la degradación de suelos.....	36
Figura 8. La conductividad térmica en diferentes componentes del suelo.....	45
Figura 9. Fenómeno de atracción –repulsión de las arcillas para la formación de los agregados.....	48
Figura 10. Efecto del espesor de la costra sobre la resistencia mecánica y la velocidad de infiltración en suelo franco limoso y arcilloso.....	58
Figura 11. Efecto de la infiltración acumulada sobre un Suelo con o sin encostramiento.....	66
Figura 12. Efecto de la textura sobre la infiltración del agua.....	66
Figura 13. Monograma para la determinación del valor (K).....	87
Figura 14. Estrategia para la conservación de suelos en tierras cultivadas.....	90
Figuras 15. Equipo de adquisición de datos instalado en el invernadero.....	98
Figura 16. Evaporimetro utilizado en la experiencia.....	100
Figura 17. Las bandejas de erosión.....	101
Figura 18. Mesa de erosión.....	101
Figura 19. Estimación del porcentaje de cobertura.....	112
Figura 20. Simulador de lluvia.....	113

Figura 21. Deposito de agua.....	114
Figura 22. Agitador mecánico.....	114
Figuras 23. Parilla portagotero y gotero autocompensante.....	115
Figura 24. Distribución del diámetro de las gotas.....	116
Figura 25. Distribución del la velocidad del simulador.....	117
Figura 26. Determinación de la intensidad de la lluvia.....	118
Figura 27. Ficha técnica del experimento.....	123
Figura 28. Theta probe ML2x y Wet-2.....	127
Figura 29. El penetrómetro.....	128
Figura 30. Curva característica de humedad de los cinco suelos estudiados.....	132
Figura 31. Variación de la estabilidad de los agregados en relación al suelo y residuo vegetal.....	135
Figura 32. Variación de la estabilidad de los agregados en relación al tipo de suelo y est. de suelo.....	135
Figura 33. Variación de la porosidad en relación al tipo de suelo y la posición del residuo vegetal...	138
Figura 34. Variación de la porosidad en relación al tipo de suelo y estado de suelo.....	138
Figura 35. Variación de la densidad aparente en relación al tipo de suelo y residuo vegetal.....	141
Figura 36. Variación de la densidad aparente en relación al tipo de suelo y estado de suelo.....	141
Figura 37. Variación de la conductividad hidráulica en relación al tipo de suelo y residuo vegetal...	144
Figura 38. Variación de la conductividad hidráulica en relación al tipo de suelo y estado de suelo...	144
Figura 39. Variación de la pérdida de suelo en relación al tipo de suelo y residuo vegetal.....	147
Figura 40. Variación de la pérdida de suelo en relación al tipo de suelo y estado del suelo.....	147
Figura 41. Variación de la escorrentía en relación al tipo de suelo y residuo vegetal.....	151
Figura 42. Variación de la escorrentía en relación al tipo de suelo y estado del suelo.....	151
Figura 43. Comportamiento de los residuos arrastrados, inicio de encharcamiento y inicio de escorrentía en los tratamientos sin costra.....	155
Figura 44. Comportamiento de los residuos arrastrados, inicio de encharcamiento y inicio de escorrentía en los tratamientos con costra.....	155
Figura 45. Variación de la tasa de infiltración en relación al tipo de suelo y residuo vegetal.....	156
Figura 46. Variación de la tasa de infiltración en relación al tipo de suelo y estado de suelo.....	157
Figura 47. Variación de la humedad (5 cm) en relación al tipo de suelo y residuo vegetal.....	159
Figura 48. Variación de la humedad (10 cm) en relación al tipo de suelo y residuo vegetal.....	160
Figura 49. Variación de la humedad (5cm) en relación al tipo de suelo y estado de suelo	160
Figura 50. Variación de la humedad (10cm) en relación al tipo de suelo y estado de suelo	161
Figura 51. Variación de la resistencia a la penetración en relación al tipo de suelo y res. vegetal ...	163
Figura 52. Variación de la resistencia a la penetración en relación al tipo de suelo y estado de suelo.....	164