



**CORRELACIONES ENTRE LA DURACIÓN Y EL NÚMERO DE CICLOS DE  
REGISTROS SISMICOS EN CUATRO TERREMOTOS DE GRAN MAGNITUD,  
PARA LA EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN**

**RAFAEL DAVID MÉNDEZ ANILLO**

**UNIVERSIDAD EAFIT  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL  
MEDELLÍN, 2018**



**CORRELACIONES ENTRE LA DURACIÓN Y EL NÚMERO DE CICLOS DE  
REGISTROS SISMICOS EN CUATRO TERREMOTOS DE GRAN MAGNITUD,  
PARA LA EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN**

**RAFAEL DAVID MÉNDEZ ANILLO**

**Disertación para optar por el título de:  
MAGÍSTER EN INGENIERÍA**

**Director:  
JORGE A. PRIETO SALAZAR, PhD.**

**UNIVERSIDAD EAFIT  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL  
MEDELLÍN, 2018**

*A Rafael Ausencio Anillo Silgado †*

## RESUMEN

La duración del movimiento sísmico es un aspecto de gran influencia en el potencial de licuación de un depósito de suelo, debido al efecto que tiene en la disminución de la relación de resistencia cíclica del material. Los métodos simplificados utilizados en la actualidad para la evaluación del potencial de licuación asocian la duración del sismo con su número efectivo de ciclos, y se han formulado a partir de datos empíricos de eventos pasados y ensayos de laboratorio de muestras de arena sometidas a cargas cíclicas.

Los datos empíricos en los que se basan dichas metodologías corresponden a eventos con magnitudes menores a 8.0, lo cual impide su aplicación con suficiente confiabilidad en eventos de gran magnitud, en los cuales es necesario formular un nuevo criterio de evaluación.

En el presente trabajo se evalúa la correlación entre diferentes definiciones de duración y número de ciclos de un registro de movimiento del terreno, a partir de mediciones realizadas en cuatro terremotos de magnitud mayor a 8.0. Igualmente, se analiza el efecto del contenido frecuencial en el grado de correlación y se proponen ecuaciones empíricas para predecir el número efectivo de ciclos a partir de la duración y el periodo característico del evento.

Finalmente, se evalúa la influencia de la magnitud, la distancia epicentral y la velocidad de onda de corte en los valores obtenidos de duración y número de ciclos, y se presentan las recomendaciones para el desarrollo de un modelo matemático, aplicable a métodos simplificados, que permita determinar el efecto de la duración y las formas de onda de un terremoto, en el potencial de desencadenamiento de licuación.

## TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	3
TABLA DE CONTENIDO.....	5
1. INTRODUCCIÓN .....	17
2. ANTECEDENTES.....	22
2.1. Métodos simplificados para la evaluación del potencial de licuación .....	22
2.1.1. Método (Seed & Idriss, 1971).....	22
2.1.2. Método (Sassa & Yamazaki, 2016) .....	28
2.2. Correlaciones entre duración y número efectivo de ciclos.....	31
2.3. Correlaciones entre el número de ciclos y otras medidas de intensidad .....	33
3. BASE DE DATOS DE TERREMOTOS.....	34
3.1. Eventos analizados .....	34
3.1.1. Terremoto de Hokkaido .....	34
3.1.2. Terremoto de Iquique.....	37
3.1.3. Terremoto de Coquimbo .....	38
3.1.4. Terremoto de Tohoku.....	39
3.2. Procesamiento de acelerogramas.....	41
3.2.1. Corrección por línea base.....	42
3.2.2. Filtrado de señales.....	42
4. DURACIÓN Y NÚMERO EFECTIVO DE CICLOS .....	44
4.1. Duración de terremotos .....	44
4.1.1. Duración entre intervalos .....	46
4.1.2. Duración uniforme .....	47
4.1.3. Duración significativa .....	48

4.2.	Número efectivo de ciclos .....	49
4.2.1.	Método de conteo de picos.....	49
4.3.	Correlación entre la duración y el número de ciclos .....	50
4.3.1.	Correlación entre definiciones de números de ciclos.....	51
4.3.2.	Correlación entre definiciones de duración.....	54
4.3.3.	Correlación entre duración y número de ciclos.....	68
5.	INFLUENCIA DE LA FRECUENCIA EN LA CORRELACIÓN ENTRE DURACIÓN Y NÚMERO DE CICLOS .....	83
5.1.	Definiciones de periodo.....	83
5.1.1.	Periodo espectral promedio.....	83
5.1.2.	Periodo espectral predominante .....	86
5.1.3.	Periodo dominante en el intervalo.....	89
5.2.	Correlación entre el periodo y la velocidad de onda de corte .....	99
5.3.	Modelo matemático para predecir el número de ciclos.....	101
6.	INFLUENCIA DE LA MAGNITUD, LA DISTANCIA EPICENTRAL Y LA VELOCIDAD DE ONDA DE CORTE EN LA DURACIÓN DE TERREMOTOS CON $M \geq 8.0$ .....	131
6.1.	Influencia de la magnitud .....	131
6.2.	Influencia de la distancia epicentral .....	134
6.3.	Influencia de la velocidad de onda de corte .....	138
6.4.	Regresión múltiple entre duración, magnitud, distancia epicentral y velocidad de onda de corte .....	141
6.5.	Discusión de resultados .....	142
7.	CONCLUSIONES .....	144
7.1.	Conclusiones .....	144

7.2. Sugerencias para futuras investigaciones .....	146
REFERENCIAS .....	148

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Coeficientes de correlación para diferentes definiciones de duración y número de ciclos .....	31
Tabla 2. Correlaciones entre NRA y DUA agrupadas de acuerdo con rangos de periodo ..	32
Tabla 3. Porcentaje de acelerogramas registrados por tipo de suelo.....	34
Tabla 4. Estaciones acelerográficas – Terremoto de Hokkaido .....	35
Tabla 5. Estaciones acelerográficas – Terremoto de Iquique .....	38
<i>Tabla 6. Estaciones acelerográficas – Terremoto de Coquimbo.....</i>	<i>39</i>
Tabla 7. Estaciones acelerográficas – Terremoto de Tohoku .....	40
Tabla 8. Clasificación de definiciones de duración de terremotos.....	45
Tabla 9. Resumen de definiciones de duración y número de ciclos .....	50
Tabla 10. Coeficiente de correlación entre definiciones de número de ciclos.....	54
Tabla 11. Coeficiente de correlación entre definiciones duración .....	66
Tabla 12. Coeficiente de correlación entre número de ciclos y duraciones.....	81
Tabla 13. Correlaciones entre DBA(0.1g) y NPA (0.1g) agrupadas por periodo.....	97
Tabla 14. Correlaciones entre DBR (75%) y NPR (60%) agrupadas por periodo.....	97
Tabla 15. Correlaciones entre DUA (0.1g) y NPA (0.1g) agrupadas por periodo.....	98
Tabla 16. Correlaciones entre DUS (75%I) y NPA (0.1g) agrupadas por periodo.....	98
Tabla 17. Correlaciones entre DSR (5-75%) y NPA (0.05g) agrupadas por periodo.....	98
Tabla 18. Clasificación de sitio basada en el periodo natural del suelo.....	99
Tabla 19. Coeficiente de correlación entre número de ciclos y relación duración/periodo	128
Tabla 20. Coeficiente de correlación entre número de ciclos y relación duración/periodo, según tipo de suelo .....	128
Tabla 21. Ecuaciones de correlación entre DUA, NPA y T0, según perfil de suelo .....	129
Tabla 22. Parámetros de correlación múltiple entre duración o número de ciclos, M, R y Vs30 .....	142

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Variación de la relación de esfuerzo cíclico versus el número de ciclos para la falla .....	27
Figura 2. Resistencia a la licuación versus el número efectivo de ondas .....	29
Figura 3. Coeficiente de corrección de onda versus densidad relativa, $N_r=5$ .....	30
Figura 4. Coeficiente de corrección de onda versus número de golpes SPT, $N_r=5$ .....	30
Figura 5. Definición genérica de “Duración entre intervalos” en un acelerograma .....	46
Figura 6. Definición genérica de “Duración uniforme” en un acelerograma .....	47
Figura 7. Definición genérica de “Duración significativa” .....	48
Figura 8. Método de conteo de picos .....	50
Figura 9. Correlación entre NPA (0.05g) y NPA(0.1g) .....	51
Figura 10. Correlación entre NPA (0.05g) y NPR(20%) .....	51
Figura 11. Correlación entre NPA(0.05g) y NPR(60%) .....	52
Figura 12. Correlación entre NPA(0.1g) y NPR(20%) .....	52
Figura 13. Correlación entre NPA(0.1g) y NPR(60%) .....	53
Figura 14. Correlación entre NPR (20%) y NPR(60%) .....	53
Figura 15. Correlación entre DBA(0.05g) y DBA(0.1g) .....	54
Figura 16. Correlación entre DBA(0.05g) y DBR(20%) .....	55
Figura 17. Correlación entre DBA(0.05g) y DBR(75%) .....	55
Figura 18. Correlación entre DBA(0.05g) y DUA(0.05g) .....	55
Figura 19. Correlación entre DBA(0.05g) y DUA (0.1g) .....	56
Figura 20. Correlación entre DBA(0.05g) y DUS (75%I) .....	56
Figura 21. Correlación entre DBA(0.05g) y DSR(5-75%) .....	56
Figura 22. Correlación entre DBA (0.05g) y DSR (5-95%) .....	57
Figura 23. Correlación entre DBA (0.1g) y DBR(20%) .....	57
Figura 24. Correlación entre DBA (0.1g) y DBR(75%) .....	57
Figura 25. Correlación entre DBA (0.1g) y DUA(0.05g) .....	58
Figura 26. Correlación entre DBA (0.1g) y DUA(0.1g) .....	58
Figura 27. Correlación entre DBA (0.1g) y DUS(75%I) .....	58
Figura 28. Correlación entre DBA (0.1g) y DSR(5-75%) .....	59

Figura 29. Correlación entre DBA (0.1g) y DSR(5-95%) .....	59
Figura 30. Correlación entre DBR (20%) y DBR(75%) .....	59
Figura 31. Correlación entre DBR (20%) y DUA(0.05g).....	60
Figura 32. Correlación entre DBR (20%) y DUA(0.1g).....	60
Figura 33. Correlación entre DBR (20%) y DUS(75%I).....	60
Figura 34. Correlación entre DBR (20%) y DSR(5-75%) .....	61
Figura 35. Correlación entre DBR (20%) y DSR(5-95%) .....	61
Figura 36. Correlación entre DBR(75%) y DUA(0.05g).....	61
Figura 37. Correlación entre DBR (75%) y DUA (0.1g).....	62
Figura 38. Correlación entre DBR(75%) y DUS(75%I).....	62
Figura 39. Correlación entre DBR(75%) y DSR(5-75%) .....	62
Figura 40. Correlación entre DBR (75%) y DSR (5-95%).....	63
Figura 41. Correlación entre DUA(0.05g) y DUA(0.1g).....	63
Figura 42. Correlación entre DUA(0.05g) y DUS(75%I).....	63
Figura 43. Correlación entre DUA (0.05g) y DSR (5-75%).....	64
Figura 44. Correlación entre DUA(0.05g) y DSR(5-95%).....	64
Figura 45. Correlación entre DUA(0.1g) y DUS(75%I).....	64
Figura 46. Correlación entre DUA (0.1g) y DSR (5-75%).....	65
Figura 47. Correlación entre DUA(0.1g) y DSR(5-95%).....	65
Figura 48. Correlación entre DUS(75%I) y DSR(5-75%) .....	65
Figura 49. Correlación entre DUS (75%I) y DSR (5-95%).....	66
Figura 50. Correlación entre DSR(5-75%) y DSR(5-95%) .....	66
Figura 51. Correlación entre DBA (0.05g) y NPA (0.05g).....	69
Figura 52. Correlación entre DBA (0.05g) y NPA(0.1g).....	69
Figura 53. Correlación entre DBA (0.05g) y NPR(20%) .....	70
Figura 54. Correlación entre DBA (0.05g) y NPR(60%) .....	70
Figura 55. Correlación entre DBA (0.1g) y NPA(0.05g).....	70
Figura 56. Correlación entre DBA (0.1g) y NPA(0.1g).....	71
Figura 57. Correlación entre DBA(0.1g) y NPR(20%) .....	71
Figura 58. Correlación entre DBA(0.1g) y NPR(60%) .....	71

Figura 59. Correlación entre DBR(20%) y NPA(0.05g).....	72
Figura 60. Correlación entre DBR(20%) y NPA(0.1g).....	72
Figura 61. Correlación entre DBR(20%) y NPR(20%) .....	72
Figura 62. Correlación entre DBR(20%) y NPR(60%) .....	73
Figura 63. Correlación entre DBR(75%) y NPA(0.05g).....	73
Figura 64. Correlación entre DBR(75%) y NPA(0.1g).....	73
Figura 65. Correlación entre DBR(75%) y NPR(20%) .....	74
Figura 66. Correlación entre DBR (75%) y NPR(60%) .....	74
Figura 67. Correlación entre DUA (0.05g) y NPA(0.05g) .....	74
Figura 68. Correlación entre DUA (0.05g) y NPA(0.1g) .....	75
Figura 69. Correlación entre DUA(0.05g) y NPR(20%) .....	75
Figura 70. Correlación entre DUA (0.05g) y NPR(60%) .....	75
Figura 71. Correlación entre DUA (0.1g) y NPA(0.05g) .....	76
Figura 72. Correlación entre DUA(0.1g) y NPA(0.1g) .....	76
Figura 73. Correlación entre DUA (0.1g) y NPR(20%) .....	76
Figura 74. Correlación entre DUA (0.1g) y NPR(60%) .....	77
Figura 75. Correlación entre DUS y NPA(0.05g).....	77
Figura 76. Correlación entre DUS y NPA(0.1g).....	77
Figura 77. Correlación entre DUS y NPR(20%).....	78
Figura 78. Correlación entre DUS y NPR(60%).....	78
Figura 79. Correlación entre DSR(5-75%) y NPA(0.05g).....	78
Figura 80. Correlación entre DSR(5-75%) y NPA(0.1g).....	79
Figura 81. Correlación entre DSR(5-75%) y NPR(20%) .....	79
Figura 82. Correlación entre DSR(5-75%) y NPR(60%) .....	79
Figura 83. Correlación entre DSR(5-95%) y NPA(0.05g).....	80
Figura 84. Correlación entre DSR(5-95%) y NPA(0.1g).....	80
Figura 85. Correlación entre DSR(5-95%) y NPR(20%) .....	80
Figura 86. Correlación entre DSR(5-95%) y NPR(60%) .....	81
Figura 87. Correlaciones entre DBA (0.1g) y NPA(0.1g), usando $T_{avg}$ .....	84
Figura 88. Correlaciones entre DBR(75%) y NPR(60%), usando $T_{avg}$ .....	84

Figura 89. Correlaciones entre DUA(0.1g) y NPA(0.1g), usando $T_{avg}$ .....	85
Figura 90. Correlaciones entre DUS(75%I) y NPA(0.1g), usando $T_{avg}$ .....	85
Figura 91. Correlaciones entre DSR(5-75%) y NPA(0.05g), usando $T_{avg}$ .....	86
Figura 92. Correlaciones entre DBA (0.1g) y NPA(0.1g), usando $T_0$ .....	87
Figura 93. Correlaciones entre DBR(75%) y NPR(60%), usando $T_0$ .....	87
Figura 94. Correlaciones entre DUA(0.1g) y NPA(0.1g), usando $T_0$ .....	88
Figura 95. Correlaciones entre DUS(75%I) y NPA(0.1g), usando $T_0$ .....	88
Figura 96. Correlaciones entre DSR(5-75%) y NPA(0.05g), usando $T_0$ .....	89
Figura 97. Correlaciones entre DBA(0.1g) y NPA(0.1g), usando $T_n$ (1.2g).....	90
Figura 98. Correlaciones entre DBR(75%) y NPR(60%), usando $T_n$ (1.2g).....	90
Figura 99. Correlaciones entre DUA(0.1g) y NPA(0.1g), usando $T_n$ (1.2g).....	91
Figura 100. Correlaciones entre DUS(75%I) y NPA(0.1g), usando $T_n$ (1.2g).....	91
Figura 101. Correlaciones entre DSR(5-75%) y NPA(0.05g), usando $T_n$ (1.2g).....	92
Figura 102. Correlaciones entre DBA(0.1g) y NPA(0.1g), usando $T_n$ (1.75g).....	92
Figura 103. Correlaciones entre DBR(75%) y NPR(60%), usando $T_n$ (1.75g).....	93
Figura 104. Correlaciones entre DUA(0.1g) y NPA(0.1g), usando $T_n$ (1.75g).....	93
Figura 105. Correlaciones entre DUS(75%I) y NPA(0.1g), usando $T_n$ (1.75g).....	94
Figura 106. Correlaciones entre DSR(5-75%) y NPA(0.05g), usando $T_n$ (1.75g).....	94
Figura 107. Correlaciones entre DBA(0.1g) y NPA(0.1g), usando $T_n$ (2g).....	95
Figura 108. Correlaciones entre DBR(75%) y NPR(60%), usando $T_n$ (2g).....	95
Figura 109. Correlaciones entre DUA(0.1g) y NPA(0.1g), usando $T_n$ (2g).....	96
Figura 110. Correlaciones entre DUS(75%I) y NPA(0.1g), usando $T_n$ (2g).....	96
Figura 111. Correlaciones entre DSR(5-75%) y NPA(0.05g), usando $T_n$ (2g).....	97
Figura 112. Correlación entre la $Vs_{30}$ y el periodo espectral promedio .....	100
Figura 113. Correlación entre la $Vs_{30}$ y el periodo espectral predominante.....	100
Figura 114. Correlación entre la $Vs_{30}$ y el periodo espectral dominante en el intervalo (1.2g) .....	100
Figura 115. Correlación entre la $Vs_{30}$ y el periodo espectral dominante en el intervalo (1.75g) .....	101

Figura 116. Correlación entre la Vs30 y el periodo espectral dominante en el intervalo (2g) .....	101
Figura 117. Representación gráfica de una onda de periodo constante .....	102
Figura 118. Correlación entre DBA(0.1g)/Tavg y NPA(0.1g) .....	103
Figura 119. Correlación entre DBA(0.1g)/Tavg y NPA(0.1g), según perfil de suelo .....	103
Figura 120. Correlación entre DBA(0.1g)/T0 y NPA(0.1g) .....	104
Figura 121. Correlación entre DBA(0.1g)/T0 y NPA(0.1g), según perfil de suelo .....	104
Figura 122. Correlación entre DBA(0.1g)/Tn(1.2g) y NPA(0.1g) .....	105
Figura 123. Correlación entre DBA(0.1g)/Tn(1.2g) y NPA(0.1g), según perfil de suelo .	105
Figura 124. Correlación entre DBA(0.1g)/Tn(1.75g) y NPA(0.1g) .....	106
Figura 125. Correlación entre DBA(0.1g)/Tn(1.75g) y NPA(0.1g), según perfil de suelo	106
Figura 126. Correlación entre DBA(0.1g)/Tn(2g) y NPA(0.1g) .....	107
Figura 127. Correlación entre DBA(0.1g)/Tn(2g) y NPA(0.1g), según perfil de suelo ....	107
Figura 128. Correlación entre DBR(75%)/Tavg y NPR(60%) .....	108
Figura 129. Correlación entre DBR(75%)/Tavg y NPR(60%), según perfil de suelo .....	108
Figura 130. Correlación entre DBR(75%)/T0 y NPR(60%) .....	109
Figura 131. Correlación entre DBR(75%)/T0 y NPR(60%), según perfil de suelo .....	109
Figura 132. Correlación entre DBR(75%)/Tn(1.2g) y NPR(60%) .....	110
Figura 133. Correlación entre DBR(75%)/Tn(1.2g) y NPR(60%), según perfil de suelo .	110
Figura 134. Correlación entre DBR(75%)/Tn(1.75g) y NPR(60%) .....	111
Figura 135. Correlación entre DBR(75%)/Tn(1.75g) y NPR(60%), según perfil de suelo	111
Figura 136. Correlación entre DBR(75%)/Tn(2g) y NPR(60%) .....	112
Figura 137. Correlación entre DBR(75%)/Tn(2g) y NPR(60%), según perfil de suelo ....	112
Figura 138. Correlación entre DUA(0.1g)/Tavg y NPA(0.1g) .....	113
Figura 139. Correlación entre DUA(0.1g)/Tavg y NPA(0.1g), según perfil de suelo .....	113
Figura 140. Correlación entre DUA(0.1g)/T0 y NPA(0.1g) .....	114
Figura 141. Correlación entre DUA(0.1g)/T0 y NPA(0.1g), según perfil de suelo .....	114
Figura 142. Correlación entre DUA(0.1g)/Tn(1.2g) y NPA(0.1g) .....	115
Figura 143. Correlación entre DUA(0.1g)/Tn(1.2g) y NPA(0.1g), según perfil de suelo .	115
Figura 144. Correlación entre DUA(0.1g)/Tn(1.75g) y NPA(0.1g) .....	116

Figura 145. Correlación entre DUA(0.1g)/Tn(1.75g) y NPA(0.1g), según perfil de suelo	116
Figura 146. Correlación entre DUA(0.1g)/Tn(2g) y NPA(0.1g) .....	117
Figura 147. Correlación entre DUA(0.1g)/Tn(2g) y NPA(0.1g), según perfil de suelo ....	117
Figura 148. Correlación entre DUS(75%I)/Tavg y NPA(0.1g) .....	118
Figura 149. Correlación entre DUS(75%I)/Tavg y NPA(0.1g), según perfil de suelo .....	118
Figura 150. Correlación entre DUS(75%I)/T0 y NPA(0.1g) .....	119
Figura 151. Correlación entre DUS(75%I)/T0 y NPA(0.1g), según perfil de suelo.....	119
Figura 152. Correlación entre DUS(75%I)/Tn(1.2g) y NPA(0.1g) .....	120
Figura 153. Correlación entre DUS(75%I)/Tn(1.2g) y NPA(0.1g), según perfil de suelo	120
Figura 154. Correlación entre DUS(75%I)/Tn(1.75g) y NPA(0.1g) .....	121
Figura 155. Correlación entre DUS(75%I)/Tn(1.75g) y NPA(0.1g), según perfil de suelo .....	121
Figura 156. Correlación entre DUS(75%I)/Tn(2g) y NPA(0.1g) .....	122
Figura 157. Correlación entre DUS(75%I)/Tn(2g) y NPA(0.1g), según perfil de suelo ...	122
Figura 158. Correlación entre DSR(5-75%)/Tavg y NPA(0.05g) .....	123
Figura 159. Correlación entre DSR(5-75%)/Tavg y NPA(0.05g), según perfil de suelo ..	123
Figura 160. Correlación entre DSR(5-75%)/T0 y NPA(0.05g) .....	124
Figura 161. Correlación entre DSR(5-75%)/T0 y NPA(0.05g), según perfil de suelo.....	124
Figura 162. Correlación entre DSR(5-75%)/Tn(1.2g) y NPA(0.05g) .....	125
Figura 163. Correlación entre DSR(5-75%)/Tn(1.2g) y NPA(0.05g), según perfil de suelo .....	125
Figura 164. Correlación entre DSR(5-75%)/Tn(1.75g) y NPA(0.05g) .....	126
Figura 165. Correlación entre DSR(5-75%)/Tn(1.75g) y NPA(0.05g), según perfil de suelo .....	126
Figura 166. Correlación entre DSR(5-75%)/Tn(2g) y NPA(0.05g) .....	127
Figura 167. Correlación entre DSR(5-75%)/Tn(2g) y NPA(0.05g), según perfil de suelo	127
Figura 168. Correlación entre la magnitud y la DBA(0.1g) .....	131
Figura 169. Correlación entre la magnitud y la DBR(75%) .....	132
Figura 170. Correlación entre la magnitud y la DUA(0.1g) .....	132
Figura 171. Correlación entre la magnitud y la DUS(75%I) .....	132

Figura 172. Correlación entre la magnitud y la DSR(5-75%) .....	133
Figura 173. Correlación entre la magnitud y el NPA(0.05g).....	133
Figura 174. Correlación entre la magnitud y el NPA(0.1g).....	133
Figura 175. Correlación entre la magnitud y el NPR(20%).....	134
Figura 176. Correlación entre la magnitud y el NPR(60%).....	134
Figura 177. Correlación entre el residuo M-DBA(0.1g) y la distancia epicentral.....	135
Figura 178. Correlación entre el residuo M-DBR(75%) y la distancia epicentral.....	135
Figura 179. Correlación entre el residuo M-DUA(0.1g) y la distancia epicentral.....	135
Figura 180. Correlación entre el residuo M-DUS(75%I) y la distancia epicentral.....	136
Figura 181. Correlación entre el residuo M-DSR(5-75%) y la distancia epicentral.....	136
Figura 182. Correlación entre el residuo M-NPA(0.05g) y la distancia epicentral .....	136
Figura 183. Correlación entre el residuo M-NPA(0.1g) y la distancia epicentral .....	137
Figura 184. Correlación entre el residuo M-NPR(20%) y la distancia epicentral .....	137
Figura 185. Correlación entre el residuo M-NPR(60%) y la distancia epicentral .....	137
Figura 186. Correlación entre el residuo M-DBA(0.1g) y la Vs30 .....	138
Figura 187. Correlación entre el residuo M-DBR(75%) y la Vs30 .....	138
Figura 188. Correlación entre el residuo M-DUA(0.1g) y la Vs30 .....	139
Figura 189. Correlación entre el residuo M-DUS(75%I) y la Vs30 .....	139
Figura 190. Correlación entre el residuo M-DSR(5-75%) y la Vs30 .....	139
Figura 191. Correlación entre el residuo M-NPA(0.05g) y la Vs30.....	140
Figura 192. Correlación entre el residuo M-NPA(0.1g) y la Vs30.....	140
Figura 193. Correlación entre el residuo M-NPR(20%) y la Vs30.....	140
Figura 194. Correlación entre el residuo M-NPR(60%) y la Vs30.....	141
Figura 195. Correlación entre PGA y DUA (0.1g) .....	144
Figura 196. Correlación entre clasificación de sitio y periodo espectral predominante ....	145

## LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Inclinación de edificios causada por licuación - Terremoto de Niigata (1964) .....	18
Ilustración 2. Flotación de tanques enterrados en suelo licuado - Terremoto de Niigata (1964) .....	18
Ilustración 3. Colapso del Puente Showa por esparcimiento lateral - Terremoto de Niigata (1964).....	19
Ilustración 4. Esparcimiento lateral inducido por licuación - Puerto de Coronel, Chile (2010) .....	19
Ilustración 5. Falla de corte en una columna en el Puente Juan Pablo II, Chile (2010).....	20

## 1. INTRODUCCIÓN

Una de las causas más dramáticas de daño en las estructuras durante terremotos, es la ocurrencia de licuación en depósitos de arena saturada (Seed & Idriss, 1982). La arena suelta tiende a contraerse bajo la carga cíclica impuesta por el movimiento sísmico, con lo cual se transfiere el esfuerzo normal de la matriz de arena al agua intersticial, si el suelo está saturado y no puede drenarse durante el movimiento. El resultado es una reducción del esfuerzo efectivo de confinamiento y la pérdida de fuerza y rigidez asociada, que contribuye a las deformaciones del depósito de suelo (Idriss & Boulanger, 2008).

Existen numerosos casos de daños significativos en edificaciones, puentes, carreteras, tuberías y puertos, como resultado de la falla del suelo subyacente durante terremotos (Mian, et al., 2013). En puentes, la licuación es la causa más importante de daños, debido al efecto del movimiento lateral del suelo en los estribos, a la pérdida de soporte lateral y vertical en las pilas y a la inclinación y el hundimiento de las cimentaciones (Mian, et al., 2013). En el caso de los puertos, estos son particularmente vulnerables a la licuación debido a la combinación de material de relleno recientemente colocado con suelos marinos costeros pocos profundos y niveles freáticos altos. Se estima que los daños en el Puerto de Kobe, a causa del sismo de 1997, ocasionaron pérdidas directas por 11 billones de dólares (Bird & Bommer, 2004). Algunas de las imágenes más dramáticas de daños relacionados con la licuación en obras de infraestructura civil se observaron después de los terremotos de Niigata, Japón y Prince William Sound, Alaska en 1964; las cuales ayudaron a identificar la licuación como un problema importante en la ingeniería sísmica. Por ejemplo, la pérdida de resistencia al corte y la rigidez en las arenas licuadas durante el terremoto de Niigata en 1964 provocó dramáticas fallas en las cimentaciones de edificios (Ilustración 1), flotación de tanques enterrados y otras estructuras flotantes (Ilustración 2), y el colapso de puentes, incluyendo el Puente Showa (Ilustración 3).

*Ilustración 1. Inclinación de edificios causada por licuación - Terremoto de Niigata (1964)*



*Fuente: EERC, University of California, Berkeley*

*Ilustración 2. Flotación de tanques enterrados en suelo licuado - Terremoto de Niigata (1964)*



*Fuente: (Kawasumi, 1968)*

*Ilustración 3. Colapso del Puente Showa por esparcimiento lateral - Terremoto de Niigata (1964)*



*Fuente: National Information Service for Earthquake Engineering, EERC, University of California,* En recientes eventos de gran magnitud, también se han presentados daños severos en estructuras modernas, a causa de la licuación del suelo. Tal es el caso de las deformaciones ocasionadas por el esparcimiento lateral, durante el terremoto del 27 de febrero del 2010 en Chile, cuyo epicentro se ubicó en el mar frente a la costa de Biobío a 150 km de la ciudad de Concepción (M=8.8), las cuales ocasionaron agrietamiento severo en pavimentos (Ilustración 4) y colapso de cimentaciones de puentes (Ilustración 5).

*Ilustración 4. Esparcimiento lateral inducido por licuación - Puerto de Coronel, Chile (2010)*



*Fuente: (GEER, 2010)*

*Ilustración 5. Falla de corte en una columna en el Puente Juan Pablo II, Chile (2010)*



*Fuente: (GEER, 2010)*

Las deformaciones producidas por licuación dependen principalmente de las propiedades del depósito de suelo y de las características del movimiento del terreno, tales como: amplitud, frecuencia y duración del movimiento. Largas duraciones están relacionadas directamente con altos volúmenes de ruptura, que a su vez están relacionados con la magnitud del terremoto.

En terremotos de subducción de gran magnitud, se producen movimientos de tierra con grandes duraciones, que afectan tanto la ocurrencia como las consecuencias de la licuación. Sin embargo, la gran mayoría de datos empíricos utilizados para el desarrollo de modelos predictivos de licuación están asociados a terremotos con magnitudes en el rango de 6.5 a 8.0 (Kramer & Greenfield, 2017); lo cual implica la necesidad de complementar los modelos existentes con información de terremotos de magnitud mayor a 8.0, para considerar el efecto de la duración del sismo en el potencial de licuación.

El presente trabajo consiste en determinar el grado de correlación entre algunas definiciones de duración y número efectivo de ciclos de registros sísmicos y evaluar la influencia del contenido frecuencial, la magnitud, la aceleración superficial máxima y la distancia epicentral en dichos parámetros, a partir de datos empíricos, con el fin de establecer un parámetro adecuado para evaluar el efecto de la duración de un sismo en el potencial de licuación de un depósito de suelo, en terremotos de gran magnitud.

## 2. ANTECEDENTES

### 2.1. Métodos simplificados para la evaluación del potencial de licuación

Los métodos simplificados, basados en esfuerzos, son el enfoque más utilizado para la evaluación del potencial de licuación en depósitos de suelo, debido a que para su aplicación basta con disponer de datos de los que se dispone en un estudio de suelos básico. A continuación, se presentan los métodos propuestos por (Seed & Idriss, 1971) y (Sassa & Yamazaki, 2016), en los cuales se toma la resistencia del suelo a partir de resultados de ensayos SPT, CPT o velocidad de onda de corte.

#### 2.1.1. Método (Seed & Idriss, 1971)

El método, propuesto inicialmente por Seed, H. & Idriss, I., en el año 1967, compara la severidad de la carga sísmica, definida en términos de la relación de esfuerzo cíclico (CSR); con la relación de resistencia cíclica (CRR) del suelo, obtenida usualmente mediante correlaciones con parámetros de ensayos in situ, tales como: resistencia a la penetración del CPT, número de golpes del SPT, o velocidades de onda de corte.

El valor de la relación de esfuerzo cíclico (CSR) inducido por el sismo, a una profundidad dada en el perfil de suelo, se expresa como un valor representativo, igual al 65% de la relación de esfuerzo de corte máximo, así:

$$CSR_{M, \sigma'_v} = 0.65 \cdot \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \cdot \frac{a_{m\acute{a}x}}{g} \cdot r_d \quad (1)$$

Donde:

- $\sigma_v$ : Esfuerzo vertical total.
- $\sigma'_v$ : Esfuerzo vertical efectivo.
- $a_{m\acute{a}x}$ : Aceleración horizontal máxima en la superficie.
- $g$ : Aceleración de la gravedad.
- $r_d$ : Factor de reducción de esfuerzo de corte.

Según Idriss (1999), el factor de reducción de esfuerzo cortante a una profundidad dada,  $r_d$ , puede expresarse como una función de la profundidad y de la magnitud del sismo, así:

$$r_d = \exp[\alpha(z) + \beta(z) \cdot M] \quad (2)$$

siendo,

$$\alpha(z) = -1.012 - 1.126 \cdot \sin\left(\frac{z}{11.73} + 5.133\right) \quad (3)$$

$$\beta(z) = 0.106 + 0.118 \cdot \sin\left(\frac{z}{11.28} + 5.142\right) \quad (4)$$

Donde:

$z$ : Profundidad bajo la superficie del suelo, en metros.

$M$ : Magnitud del sismo.

La relación de resistencia cíclica puede obtenerse mediante ensayos de resistencia al corte bajo cargas cíclicas, realizados en laboratorio a muestras del suelo en estudio. Si no se dispone de estos datos, puede aplicarse un procedimiento de cálculo, que requiere en primera instancia la normalización de los valores de resistencias a la penetración del CPT o SPT, o velocidades de onda de corte; los cuales deben ser corregidos al valor equivalente, que hubiera sido obtenido para el mismo suelo, con un esfuerzo efectivo de 1 atm. Para este procedimiento, se recomiendan las siguientes expresiones:

$$q_{c1N} = C_N \cdot \frac{q_c}{P_a} \quad (5)$$

$$(N1)_{60} = C_N \cdot N_{60} \quad (6)$$

$$V_{S1} = C_N \cdot V_S \quad (7)$$

Donde:

- $C_N$ : Factor de corrección por sobrecarga.
- $q_c$ : Resistencia a la penetración por punta, medida en el CPT.
- $P_a$ : Presión atmosférica.
- $N_{60}$ : Número de golpes del SPT, corregido al 60% de energía.
- $V_S$ : Velocidad de onda de corte.
- $(NI)_{60}$ : Número de golpes del SPT normalizado, corregido al 60% de energía.
- $q_{c1N}$ : Resistencia a la penetración por punta normalizada, medida en el CPT.
- $V_{S1}$ : Velocidad de onda de corte normalizada.

Además de la influencia de la sobrecarga, la correlación de CRR con  $q_{c1N}$  o  $(NI)_{60}$  en suelos granulares, también se encuentra afectada por el contenido de finos. Por conveniencia matemática, esta influencia puede expresarse en términos de los valores de resistencia equivalentes en arenas limpias,  $q_{c1Ncs}$  o  $(NI)_{60cs}$ , así:

$$q_{c1Ncs} = q_{c1N} + \Delta q_{c1N} \quad (8)$$

$$(N_1)_{60cs} = (N_1)_{60} + \Delta(N_1)_{60} \quad (9)$$

siendo,

$$\Delta q_{c1N} = \left( 11.9 + \frac{q_{c1N}}{14.6} \right) \cdot \exp \left( 1.63 - \frac{9.7}{FC + 2} - \left( \frac{15.7}{FC + 2} \right)^2 \right) \quad (10)$$

$$\Delta(N_1)_{60} = \exp \left( 1.63 + \frac{9.7}{FC + 0.01} - \left( \frac{15.7}{FC + 0.01} \right)^2 \right) \quad (11)$$

Donde:

- FC: Contenido de finos, en %.

La evaluación de la influencia del contenido de finos en la relación de resistencia cíclica, a partir de velocidades de ondas de corte, se realiza determinando el valor máximo de velocidad de onda de corte para el suelo dado, en m/s, mediante el siguiente criterio:

$$\text{Para arenas con } FC \leq 5\% \quad V_{S1}^* = 215 \quad (12)$$

$$\text{Para arenas con } 5\% < FC < 35\% \quad V_{S1}^* = 215 - 0.5(FC - 5) \quad (13)$$

$$\text{Para arenas y limos con } FC > 35\% \quad V_{S1}^* = 200 \quad (14)$$

Las ecuaciones que representan la correlación entre las resistencias a la penetración, del CPT y el SPT, la velocidad de onda de corte, y la relación de resistencia cíclica del suelo, para una magnitud de sismo de 7.5 y un esfuerzo efectivo de sobrecarga de 1 atm, son las siguientes:

$$CRR_{M=7.5, \sigma'_v=1atm} = \exp \left[ \frac{q_{c1Ncs}}{113} + \left( \frac{q_{c1Ncs}}{1000} \right)^2 - \left( \frac{q_{c1Ncs}}{140} \right)^3 + \left( \frac{q_{c1Ncs}}{137} \right)^4 - 2.8 \right] \quad (15)$$

$$CRR_{M=7.5, \sigma'_v=1atm} = \exp \left[ \frac{(N_1)_{60cs}}{14.1} + \left( \frac{(N_1)_{60cs}}{126} \right)^2 - \left( \frac{(N_1)_{60cs}}{23.6} \right)^3 + \left( \frac{(N_1)_{60cs}}{25.4} \right)^4 - 2.8 \right] \quad (16)$$

$$CRR_{M=7.5, \sigma'_v=1atm} = \left[ a \left( \frac{V_{S1}}{100} \right)^2 + b \left( \frac{1}{V_{S1}^* - V_{S1}} - \frac{1}{V_{S1}^*} \right) \right] \quad (17)$$

El valor de CRR depende de la duración del sismo (expresada mediante un factor de escala de magnitud del sismo, MSF) y del esfuerzo de sobrecarga efectivo (expresado a través de un factor  $K_\sigma$ ). Debido a que las correlaciones para CRR se desarrollaron para valores de referencia de  $M=7.5$  y  $\sigma'_v=1$  atm, el valor de diseño se obtiene, así:

$$CRR_{M, \sigma'_v} = CRR_{M=7.5, \sigma'_v=1} \cdot MSF \cdot K_\sigma \quad (18)$$

Donde:

$MSF$ : Factor de escala de magnitud.

$K_\sigma$ : Factor de corrección por sobrecarga.

La relación de resistencia cíclica en arenas depende directamente del esfuerzo vertical efectivo, por lo cual debe proponerse un factor de corrección que normalice la sobrecarga. El factor de corrección por sobrecarga puede calcularse como:

$$K_\sigma = 1 - C_\sigma \ln\left(\frac{\sigma'_v}{P_a}\right) \leq 1.1 \quad (19)$$

siendo,

$$C_\sigma = \frac{1}{37.3 - 8.27 \cdot (q_{c1Ncs})^{0.264}} \leq 0.3 \quad (20)$$

$$C_\sigma = \frac{1}{18.9 - 2.55 \cdot \sqrt{(N_1)_{60cs}}} \leq 0.3 \quad (21)$$

El factor de escala de magnitud,  $MSF$ , fue desarrollado con el fin de tener en cuenta los efectos de la carga cíclica irregular producida por diferentes magnitudes de sismo, en el potencial de licuación. El desarrollo de este parámetro se ha realizado a partir de pruebas de laboratorio en suelos con diferentes densidades relativas y diferentes niveles de carga cíclica, en los cuales se ha evidenciado que diferentes tipos de suelo muestran sensibilidad variable respecto al número de ciclos para el cual se alcanza la licuación. De igual forma, el factor de escala de magnitud tiene en cuenta el efecto de la duración del sismo al tener una relación directa con el número de ciclos equivalentes necesarios para la ocurrencia de licuación, de la siguiente forma:

$$MSF = \frac{CSR_M}{CSR_{M=7.5}} = \left(\frac{15}{N_M}\right)^b \quad (22)$$

Donde:

$CSR_M$ : Relación de esfuerzo cíclico para una magnitud  $M$ .

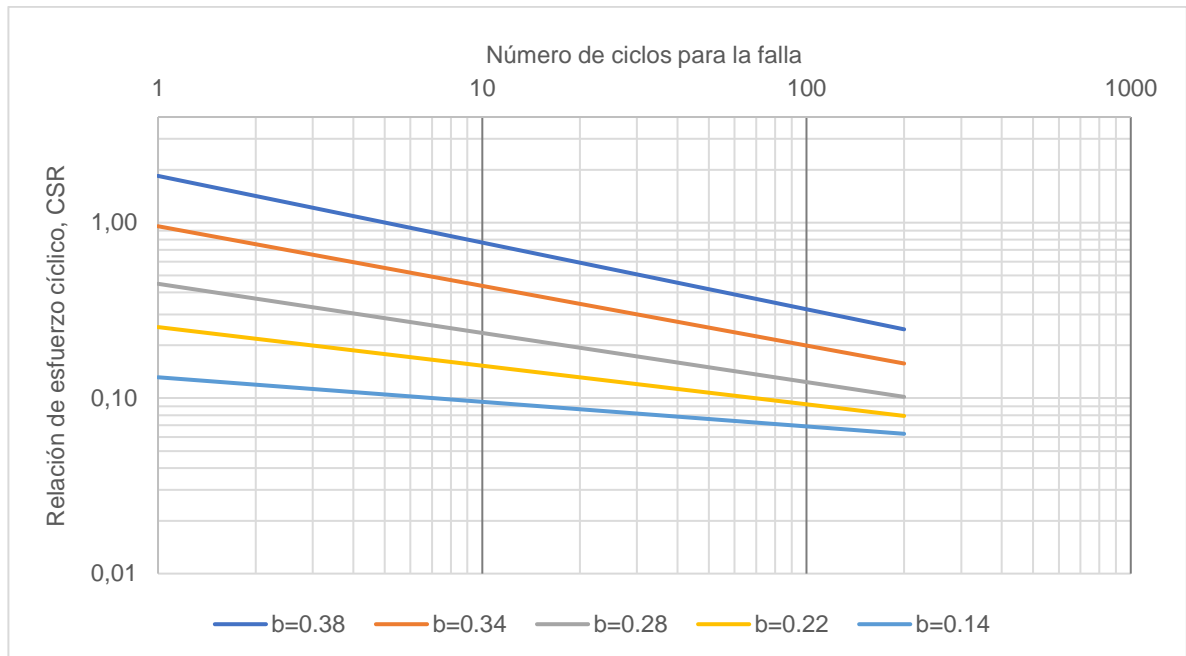
$CSR_{M=7.5}$ : Relación de esfuerzo cíclico para una magnitud de 7.5.

$N_M$ : Número de ciclos equivalentes para ocurrencia de licuación.

$b$ : Factor de ajuste, depende del tipo y la resistencia del suelo.

En la Figura 1 se muestra la variación de la relación de esfuerzo cíclico respecto del número de ciclos equivalentes necesarios para la ocurrencia de la falla, para diferentes valores de  $b$ , los cuales equivalen en cada caso a diferentes valores de resistencia del suelo.

Figura 1. Variación de la relación de esfuerzo cíclico versus el número de ciclos para la falla



Adaptado de: (Boulangier & Idriss, 2014)

De acuerdo con lo anterior, el factor de escala de magnitud representa el número de ciclos equivalentes para la ocurrencia de licuación y por tanto, el efecto de la duración del evento, y se expresa como una función que depende de la magnitud del sismo y de la resistencia del suelo, así:

$$MSF = 1 + (MSF_{m\acute{a}x} - 1) \cdot \left( 8.64 \cdot \exp\left(\frac{-M}{4}\right) - 1.325 \right) \quad (23)$$

Donde el factor de escala de magnitud máximo está dado por:

$$MSF_{m\acute{a}x} = 1.09 + \left( \frac{q_{C1Ncs}}{180} \right)^3 \leq 2.2 \quad (24)$$

$$MSF_{m\acute{a}x} = 1.09 + \left( \frac{(N1)_{60cs}}{31.5} \right)^2 \leq 2.2 \quad (25)$$

Finalmente, se calcula un factor de seguridad que indica la ocurrencia o no de licuación, mediante la relación entre la relación de resistencia cíclica del suelo y la relación de esfuerzo cíclico inducido por el sismo, tomando los valores correspondientes a la magnitud del sismo de diseño y a los esfuerzos efectivos de sobrecarga in situ; un valor mayor a 1 indica no ocurrencia y un valor menor a 1 indica ocurrencia. Este factor de seguridad puede ser calculado como:

$$FS_{liq} = \frac{CRR_{M,\sigma'_{vc}}}{CSR_{M,\sigma'_{vc}}} \quad (26)$$

### 2.1.2. Método (Sassa & Yamazaki, 2016)

El método simplificado para la predicción y evaluación de licuación considerando las formas de onda y duraciones de los terremotos, propuesto por (Sassa & Yamazaki, 2016), consiste en obtener la relación de resistencia cíclica del depósito de suelo, mediante un factor de corrección,  $c_\alpha$ , obtenido a partir del número efectivo de ondas, definido en este caso para un umbral equivalente al 60% de la resistencia al corte máxima. Dicho factor se utiliza para corregir un valor de CRR de referencia y se define como:

$$\frac{CRR_{IR}}{CRR_r} = N_r^{-a} \cdot N_{ef}^a \equiv c_\alpha \quad (27)$$

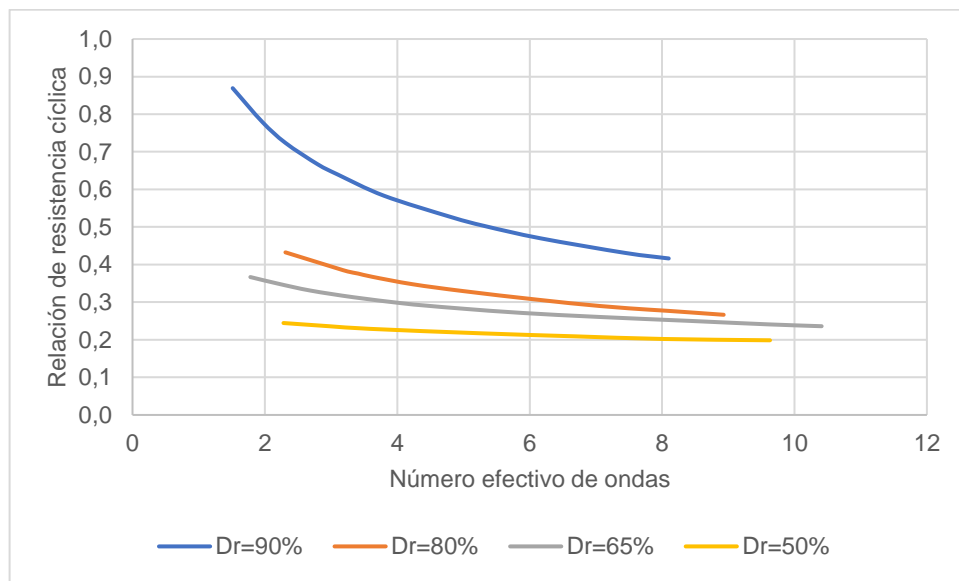
Donde:

$CRR_{IR}$ : Relación de resistencia cíclica para onda sísmica irregular.

- $CRR_r$ : Relación de resistencia cíclica para onda sísmica regular.  
 $N_r$ : Valor de referencia para el número efectivo de ciclos.  
 $N_{ef}$ : Número efectivo de ciclos para ocurrencia de licuación.  
 $c_a$ : Coeficiente de corrección de onda.

La deducción del método se realizó a partir de ensayos de resistencia al corte de muestras de arenas, con diferentes densidades relativas, sometidas a cargas cíclicas; las cuales se caracterizaron a partir del número efectivo de ondas, hallando una relación directa entre este valor y la relación de resistencia cíclica. Los resultados de las correlaciones se muestran en la Figura 2.

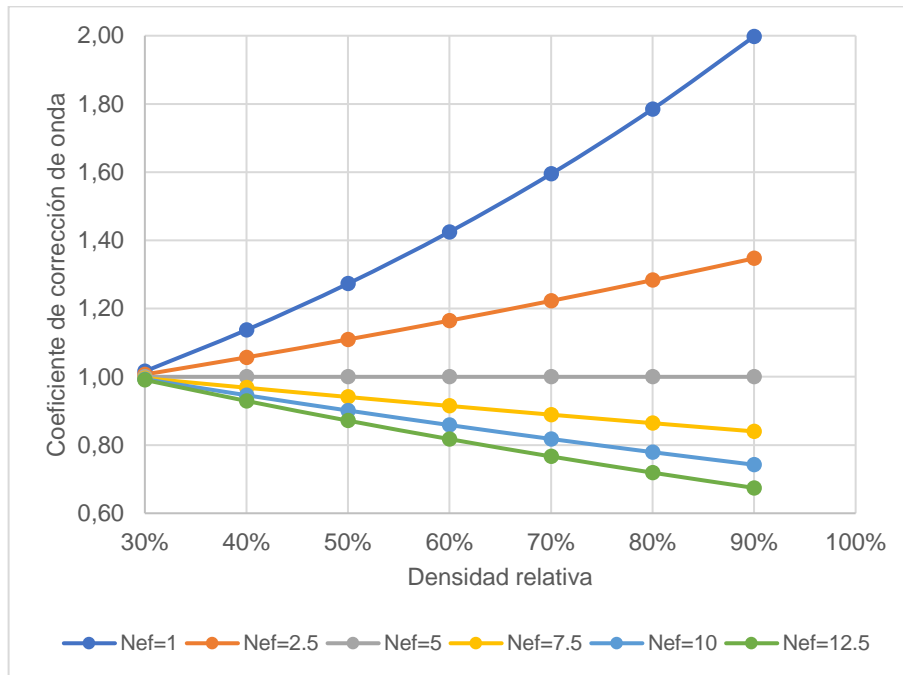
*Figura 2. Resistencia a la licuación versus el número efectivo de ondas*



*Adaptado de (Sassa & Yamazaki, 2016)*

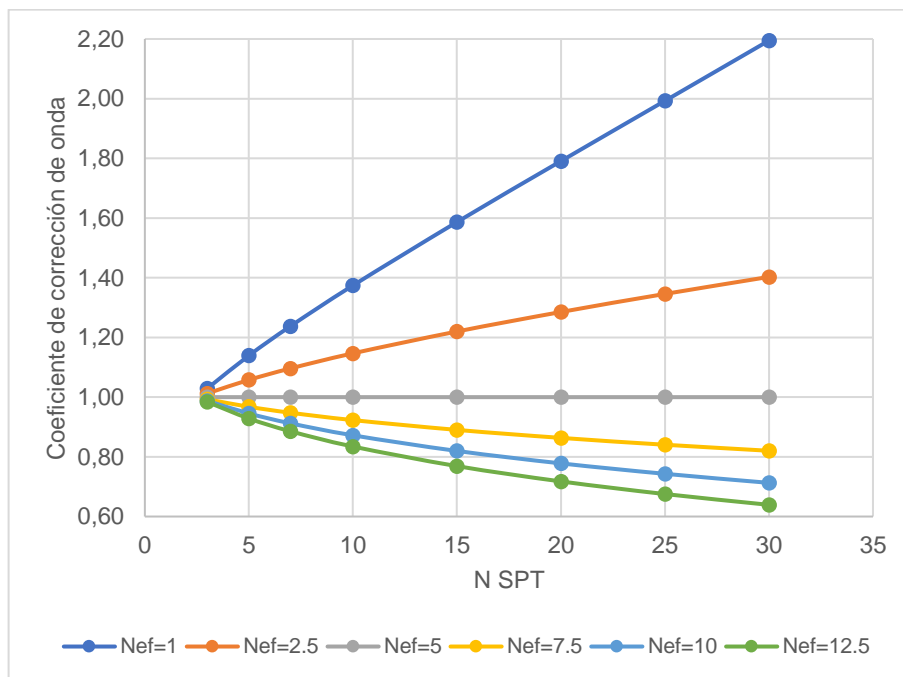
En las Figura 3 y Figura 4 se muestra la variación del coeficiente de corrección de onda versus la densidad relativa y el número de golpes del SPT, tomando como referencia un número efectivo de ondas igual a 5.

Figura 3. Coeficiente de corrección de onda versus densidad relativa,  $N_r=5$



Adaptado de: (Sassa & Yamazaki, 2016)

Figura 4. Coeficiente de corrección de onda versus número de golpes SPT,  $N_r=5$



Adaptado de: (Sassa & Yamazaki, 2016)

## 2.2. Correlaciones entre duración y número efectivo de ciclos

(Bommer, et al., 2006) evaluaron la correlación entre diferentes definiciones de duración y número de ciclos, a partir del análisis de 655 registros obtenidos en 58 terremotos con magnitudes menores a 8.0. En ese estudio pudo comprobarse que diferentes definiciones de duración y número de ciclos pueden producir resultados muy diferentes para el mismo acelerograma, y que la correlación entre valores obtenidos usando diferentes definiciones depende principalmente de si se emplean umbrales absolutos o relativos.

Los análisis de (Bommer, et al., 2006) muestran que existe una mejor correlación entre los resultados obtenidos utilizando definiciones de duración y número de ciclos, basadas en umbrales absolutos, en lugar de una mezcla de umbrales absolutos y relativos. La duración uniforme, definida como la suma de los intervalos de tiempo durante los cuales se excede un umbral de aceleración dado, y el número de ciclos, definido mediante el método Rainflow, son las medidas mejor correlacionadas entre sí. Sin embargo, actualmente no existen ecuaciones predictivas para ninguna de estas definiciones, por lo que la práctica actual generalmente implicará el uso de medidas de duración y número de ciclos que están mal correlacionadas.

Para las definiciones que demuestran cierto grado de correlación entre la duración y el número de ciclos, la dispersión se reduce al agrupar los registros de acuerdo con alguna medida del contenido del periodo del movimiento. Esto se da, debido a que, para una duración dada, el movimiento de alta frecuencia tendrá un mayor número de ciclos. En la Tabla 1 se muestran los coeficientes de correlación obtenidos por (Bommer, et al., 2006) para diferentes definiciones de duración y número de ciclos.

*Tabla 1. Coeficientes de correlación para diferentes definiciones de duración y número de ciclos*

	D <sub>BA</sub> (0.05g)	D <sub>BA</sub> (20%)	D <sub>SR</sub> (5-75%)	D <sub>SR</sub> (5-95%)	D <sub>UA</sub> (0.1g)	N <sub>RR</sub> (2.0)	N <sub>PR</sub> (2.0)	N <sub>XR</sub> (2.0)	N <sub>RA</sub> (2.0)	N <sub>PA</sub> (2.0)	N <sub>XA</sub> (2.0)
D <sub>BA</sub> (0.05g)	1.000	0.005	0.003	0.007	0.432	0.060	0.052	0.036	0.219	0.253	0.233
D <sub>BA</sub> (20%)	0.005	1.000	0.890	0.900	0.016	0.266	0.412	0.334	0.005	0.006	0.006
D <sub>SR</sub> (5-75%)	0.003	0.890	1.000	0.874	0.014	0.222	0.347	0.278	0.004	0.004	0.004

D <sub>SR</sub> (5-95%)	0.007	0.900	0.874	1.000	0.022	0.179	0.304	0.235	0.010	0.011	0.011
D <sub>UA</sub> (0.1g)	0.432	0.016	0.014	0.022	1.000	0.006	0.003	0.000	0.642	0.713	0.662
N <sub>RR</sub> (2.0)	0.060	0.266	0.222	0.179	0.006	1.000	0.902	0.964	0.022	0.021	0.021
N <sub>PR</sub> (2.0)	0.052	0.412	0.347	0.304	0.003	0.902	1.000	0.931	0.011	0.014	0.011
N <sub>XR</sub> (2.0)	0.036	0.334	0.278	0.235	0.000	0.964	0.931	1.000	0.010	0.010	0.010
N <sub>RA</sub> (2.0)	0.219	0.005	0.004	0.010	0.642	0.022	0.011	0.010	1.000	0.976	0.997
N <sub>PA</sub> (2.0)	0.253	0.006	0.004	0.011	0.713	0.021	0.014	0.010	0.976	1.000	0.983
N <sub>XA</sub> (2.0)	0.233	0.006	0.004	0.011	0.662	0.021	0.011	0.010	0.997	0.983	1.000

*Adaptado de: (Bommer, et al., 2006)*

En la Tabla 2 se muestran el mejoramiento, mediante varias definiciones de periodo, de la correlación entre el número de ciclos contados mediante el método Rainflow (N<sub>RA</sub>) y la duración uniforme (D<sub>UA</sub>), definidos a partir de umbrales de aceleración absolutos.

*Tabla 2. Correlaciones entre NRA y DUA agrupadas de acuerdo con rangos de periodo*

Definición de periodo	Valores intervalos de periodo			R <sup>2</sup>		
	Intervalo 1	Intervalo 2	Intervalo 3	Intervalo 1	Intervalo 2	Intervalo 3
T <sub>p</sub>	0-0.1	0.11-0.45	>0.45	0.985	0.769	0.803
T <sub>n</sub> (1.2PGA)	0-0.4	0.41-0.8	>0.8	0.980	0.892	0.847
T <sub>n</sub> (1.75PGA)	0-0.3	0.31-0.7	>0.7	0.968	0.842	0.911
T <sub>n</sub> (2.0PGA)	0-0.5	0.51-0.65	>0.65	0.813	0.907	0.883
T <sub>o</sub>	0-0.4	0.41-0.75	>0.75	0.936	0.787	0.769
T <sub>avg</sub>	0-0.3	0.3-0.65	>0.65	0.969	0.778	0.741
T <sub>m</sub>	0-0.4	0.41-0.8	>0.8	0.903	0.814	0.787
PGA/PGV	0-0.9	0.91-1.8	>1.8	0.698	0.839	0.942

*Adaptado de: (Bommer, et al., 2006)*

La definición de periodo, en la que se obtienen mejores resultados de correlación es la propuesta por (Bommer, et al., 2006), la cual se define como el intervalo de tiempo entre el

primer y último cruce del espectro de aceleración, amortiguado al 5%, a un nivel de 1.2 veces la aceleración máxima superficial del registro, de forma análoga al concepto de duración entre intervalos.

### **2.3. Correlaciones entre el número de ciclos y otras medidas de intensidad**

(Du & Wang, 2017) estudiaron las correlaciones entre el número efectivos de ciclos del movimiento del suelo y otras medidas de intensidad comúnmente utilizadas, tales como la aceleración máxima del suelo (PGA), la velocidad máxima del suelo (PGV), las aceleraciones espectrales, la intensidad de Arias, la velocidad absoluta acumulativa (CAV), la duración significativa, etc. La base de datos utilizada incluyó 1560 registros, medidos en 64 terremotos con magnitudes entre 4.3 y 7.9 y distancias de ruptura de 0.1 a 199 km. Se encontró que el número de ciclos, contados a partir de un umbral absoluto, tiene fuertes correlaciones positivas con medidas de intensidad de alta frecuencia; correlaciones positivas moderadas con PGV, CAV y SA en un rango de periodos de 0.2 a 1 s; y correlaciones negativas débiles con duraciones significativas. Lo anterior puede explicarse, teniendo en cuenta que el número de ciclos definido a partir de un umbral absoluto está principalmente determinado por los ciclos de movimiento del suelo de mayor amplitud.

El número de ciclos, definido a partir de un umbral relativo, muestra correlaciones negativas bajas a moderadas con medidas de intensidad basadas en la amplitud y en la intensidad acumulada. Esto significa que este tipo de definición de número de ciclos puede proporcionar información adicional con respecto a las características de movimiento del suelo, a partir de estas medidas de intensidad. Adicionalmente, (Du & Wang, 2017) observaron que el número de ciclos, contados a partir de un umbral relativo, está moderadamente correlacionado con parámetros de duración significativa, lo que indica que estos no pueden representar perfectamente el número efectivo de ciclos del suelo.

### 3. BASE DE DATOS DE TERREMOTOS

La base de datos de terremotos utilizada para el presente estudio consiste en 308 acelerogramas, correspondientes a las dos componentes horizontales, registrados en 154 estaciones de medición para cuatro sismos con magnitud igual o superior a 8.0 ( $M \geq 8$ ), medidos en estaciones con una distancia epicentral máxima de 200 km.

#### 3.1. Eventos analizados

Los registros analizados corresponden en su mayoría a sismos ocurridos en los últimos seis años, por lo que en el presente estudio se analiza información con la que no se contaba en investigaciones anteriores, como las de (Bommer, et al., 2006) y (Hancock & Bommer, 2005), sobre correlaciones entre la duración y el número de ciclos de un registro sísmico para la evaluación del potencial de licuación. Los acelerogramas registrados corresponden a los terremotos de: Hokkaido – Japón (2003), Iquique – Chile (2014), Coquimbo – Chile (2015) y Tohoku – Japón (2011); los cuales son de acceso y descarga libre desde la página web del Centro Sismológico Nacional de la Universidad de Chile (<http://www.csn.uchile.cl/>), para los sismos de Iquique y Coquimbo, y desde la página web del National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience de Japón (<http://www.bosai.go.jp>), para los sismos de Hokkaido y Tohoku. A continuación, se presenta el porcentaje de acelerogramas registrados por tipo de suelo, según la clasificación del (NEHRP, 2003).

*Tabla 3. Porcentaje de acelerogramas registrados por tipo de suelo*

Clase de sitio	
<b>A</b>	1.4%
<b>B</b>	11.8%
<b>C</b>	38.2%
<b>D</b>	41.0%
<b>E</b>	7.6%

##### 3.1.1. Terremoto de Hokkaido

El terremoto de Hokkaido ocurrió en la costa de Hokkaido, Japón el 26 de septiembre del 2003, a las 04:50 hora local; tuvo una magnitud de  $M=8.3$  y una profundidad de 27 km; el

epicentro se ubicó a las 41.815°N y 143.91°E. Según el informe presentado por el Ministerio de Tierras, Infraestructura, Transporte y Turismo de Japón (MLIT, 2003) se reportaron 2 personas fallecidas, 849 heridas y pérdidas económicas por 1.9 billones de dólares. Se cuenta con los registros de ubicación geográfica, acelerogramas, distancia epicentral y velocidad de onda de corte para 69 estaciones acelerográficas, los datos fueron tomados de la base de datos del National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience de Japón (NIED, 2017). La clasificación de sitio para cada estación se realizó a partir del criterio propuesto por el (NEHRP, 2003). A continuación, se muestra la información recopilada.

*Tabla 4. Estaciones acelerográficas – Terremoto de Hokkaido*

Estación	Lat. [°]	Lon. [°]	PGA [g]	R [km]	Vs30 (m/s)	Perfil suelo
HDKH01	42.70	142.23	0.190	184.0	368	C
HDKH02	42.71	142.41	0.116	172.0	444	C
HDKH04	42.51	142.04	0.220	187.0	235	D
HDKH05	42.60	142.54	0.104	156.0	766	B
HDKH06	42.35	142.36	0.213	156.0	412	C
HDKH07	42.13	142.92	0.202	104.0	459	C
HKD038	43.17	142.57	0.196	198.0	504	C
HKD068	43.41	144.77	0.309	190.0	248	D
HKD071	43.23	145.26	0.406	188.0	237	D
HKD075	43.08	145.13	0.517	168.0	266	D
HKD076	43.05	144.85	0.221	155.0	142	E
HKD077	42.98	144.38	0.415	136.0	208	D
HKD078	43.15	144.50	0.410	156.0	225	D
HKD079	43.30	144.60	0.192	175.0	174	E
HKD080	43.51	144.45	0.379	194.0	288	D
HKD082	43.44	144.09	0.150	181.0	153	E
HKD083	42.23	144.32	0.198	163.0	630	C
HKD084	43.11	144.12	0.361	148.0	430	C
HKD085	42.96	144.07	0.282	131.0	150	E
HKD086	42.85	143.86	0.816	120.0	123	E
HKD087	43.15	143.89	0.261	153.0	370	C

Estación	Lat. [°]	Lon. [°]	PGA [g]	R [km]	Vs30 (m/s)	Perfil suelo
HKD088	43.47	143.75	0.166	190.0	442	C
HKD089	43.24	143.55	0.272	168.0	342	D
HKD090	43.12	143.62	0.478	154.0	401	C
HKD091	42.81	143.66	0.398	119.0	93	E
HKD092	42.93	143.45	0.621	138.0	236	D
HKD093	43.32	143.30	0.126	182.0	338	D
HKD094	43.17	143.24	0.144	169.0	315	D
HKD095	42.93	143.21	0.196	146.0	356	D
HKD096	42.70	143.14	0.204	128.0	377	C
HKD098	42.50	143.28	0.373	103.0	452	C
HKD099	43.07	142.84	0.289	176.0	263	D
HKD100	42.29	143.31	0.991	84.0	224	D
HKD101	43.33	142.95	0.048	196.0	611	C
HKD102	42.88	142.45	0.082	181.0	325	D
HKD103	42.73	142.30	0.182	180.0	302	D
HKD104	42.59	142.13	0.099	184.0	284	D
HKD105	42.48	142.05	0.144	184.0	378	C
HKD106	42.34	142.37	0.191	154.0	220	D
HKD107	42.42	142.50	0.104	148.0	338	D
HKD108	42.25	142.56	0.169	136.0	231	D
HKD109	42.17	142.77	0.245	117.0	231	D
HKD110	42.13	142.94	0.220	102.0	194	D
HKD111	42.02	143.15	0.068	81.0	341	D
HKD112	41.94	143.24	0.146	71.0	263	D
HKD113	42.13	143.32	0.209	74.0	569	C
HKD125	42.76	142.13	0.143	194.0	214	D
HKD126	42.58	141.93	0.194	198.0	158	E
KKWH08	43.04	142.66	0.251	182.0	311	D
KSRH01	43.44	144.08	0.162	184.0	215	D
KSRH02	43.11	144.12	0.413	148.0	219	D
KSRH03	43.38	144.63	0.822	184.0	250	D

Estación	Lat. [°]	Lon. [°]	PGA [g]	R [km]	Vs30 (m/s)	Perfil suelo
KSRH04	43.21	144.68	0.341	167.0	189	D
KSRH05	43.26	144.23	0.333	164.0	389	C
KSRH06	43.22	144.43	0.385	163.0	326	D
KSRH07	43.14	144.33	0.510	152.0	204	D
KSRH09	42.99	143.98	0.399	134.0	230	D
KSRH10	43.21	145.12	0.592	180.0	213	D
NMRH05	43.39	144.80	0.399	189.0	209	D
TKCH01	43.47	143.68	0.136	190.0	445	C
TKCH02	43.38	143.90	0.187	179.0	441	C
TKCH03	43.27	143.43	0.184	174.0	372	C
TKCH04	43.17	142.92	0.233	182.0	446	C
TKCH05	43.12	143.62	0.414	154.0	337	D
TKCH06	42.89	143.06	0.166	149.0	299	D
TKCH07	42.81	143.52	0.412	123.0	140	E
TKCH08	42.49	143.15	0.510	109.0	353	D
TKCH10	43.33	142.94	0.110	196.0	804	B
TKCH11	42.87	142.88	0.259	156.0	459	C

*Datos extraídos de (NIED, 2017)*

### **3.1.2. Terremoto de Iquique**

El terremoto de Iquique ocurrió frente a las costas de Iquique y Pisagua, en el norte de Chile el 1 de abril de 2014, a las 20:46 hora local. La magnitud del sismo fue  $M=8.2$  y la profundidad de 38.9 km; el epicentro se ubicó a las  $19.572^{\circ}\text{S}$  y  $70.908^{\circ}\text{W}$ . Según cifras del Comité de Emergencias del Ministerio de Salud de Chile (Gobierno de Chile, 2014) se reportaron 7 personas fallecidas y 209 heridas. Se cuenta con los registros de ubicación geográfica, acelerogramas, distancia epicentral y velocidad de onda de corte para 17 estaciones acelerográficas, los datos fueron tomados de la base de datos del Centro Sismológico Nacional de la Universidad de Chile (Universidad de Chile, 2017). La clasificación de sitio para cada estación se realizó a partir del criterio propuesto por el (NEHRP, 2003). A continuación, se muestra la información recopilada.

Tabla 5. Estaciones acelerográficas – Terremoto de Iquique

Estación	Lat. [°]	Lon. [°]	PGA [g]	R [km]	Vs30 (m/s)	Perfil suelo
GO01	-19.669	-69.194	0.355	93.50	N/D	N/D
T09A	-19.596	-70.211	0.578	92.30	1584	A
T08A	-20.27	-70.094	0.445	115.50	987	B
T10A	-19.995	-69.767	0.784	128.60	336	D
T03A	-20.23	-70.146	0.598	108.50	613	C
T05A	-20.21	-70.15	0.297	106.70	1020	B
T07A	-20.256	-69.786	0.574	140.10	326	D
T06A	-20.214	-70.138	0.280	107.90	1263	B
T13A	-20.496	-69.337	0.346	194.00	378	C
AP01	-18.371	-70.342	0.158	146.10	355	D
HMBCX	-20.278	-69.888	0.224	132.70	743	C
MNMCX	-19.131	-69.596	0.555	146.30	-	-
PB08	-20.141	-69.153	0.092	194.50	-	-
PB11	-19.761	-69.656	0.657	133.00	1044	B
PB12	-18.614	-70.328	0.116	122.70	-	-
PSGCX	-19.597	-70.123	0.191	82.50	1639	A
TA01	-20.566	-70.181	0.194	134.40	1339	B

*Datos extraídos de (Universidad de Chile, 2017)*

### 3.1.3. Terremoto de Coquimbo

El terremoto de Coquimbo ocurrió frente a las costas de la región de Coquimbo, en Chile el 16 de septiembre de 2015, a las 19:54 hora local. La magnitud del sismo fue  $M=8.4$  y la profundidad de 23 km; el epicentro se ubicó a las  $31.637^{\circ}\text{S}$  y  $71.741^{\circ}\text{W}$ . Según cifras del Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (UNDP, 2015) se reportaron 15 personas fallecidas, 27722 personas damnificadas y 2442 viviendas con daño mayor o destruidas. Se cuenta con los registros de ubicación geográfica, acelerogramas, distancia epicentral y velocidad de onda de corte para 19 estaciones acelerográficas, los datos fueron tomados de la base de datos del Centro Sismológico Nacional de la Universidad de Chile (Universidad

de Chile, 2017). La clasificación de sitio para cada estación se realizó a partir del criterio propuesto por el (NEHRP, 2003). A continuación, se muestra la información recopilada.

*Tabla 6. Estaciones acelerográficas – Terremoto de Coquimbo*

Estación	Lat. [°]	Lon. [°]	PGA [g]	R [km]	Vs30 [m/s]	Perfil suelo
C11O	-30.696	-70.595	0.809	153.40	626	C
V02A	-33.023	-71.518	0.137	167.00	596	C
C26O	-30.259	-71.49	0.361	147.90	364	C
V09A	-33.048	-71.604	0.056	168.50	212	D
C10O	-30.234	-71.082	0.336	164.30	-	-
C18O	-30.278	-70.669	0.478	181.60	-	-
C19O	-30.093	-71.369	0.132	168.90	1106	B
C01O	-29.877	-71.238	0.173	195.50	447	C
C20O	-29.968	-71.337	0.249	183.10	737	C
C33O	-29.911	-71.251	0.138	191.50	587	C
V01A	-33.053	-71.622	0.048	168.80	607	C
C22O	-29.966	-71.351	0.124	182.90	1228	B
VA03	-32.764	-70.551	0.134	183.00	937	B
VA01	-33.023	-71.637	0.050	165.30	882	B
CO03	-30.839	-70.689	0.335	136.80	704	C
ROC1	-32.976	-71.016	0.058	177.50	-	-
GO04	-30.173	-70.799	0.348	183.80	-	-
VA06	-32.561	-71.298	0.090	124.40	-	-
CO06	-30.674	-71.635	0.370	99.80	-	-

*Datos extraídos de (Universidad de Chile, 2017)*

### **3.1.4. Terremoto de Tohoku**

El terremoto de Tohoku ocurrió frente a la costa de Honshu, Japón el 11 de marzo del 2011, a las 14:46 hora local. La magnitud del sismo fue  $M=9.0$  y la profundidad de 29 km; el epicentro se ubicó a las  $38.297^{\circ}\text{N}$  y  $142.373^{\circ}\text{E}$ . Según el informe final del Cuartel General de Atención de Desastres de la National Police Agency de Japón (ANP Japan, 2017) se reportaron 15894 personas fallecidas, 6152 heridas, 2562 desaparecidas y pérdidas

económicas equivalentes a entre el 3% y el 5% del PIB de Japón. Se cuenta con los registros de ubicación geográfica, acelerogramas, distancia epicentral y velocidad de onda de corte para 49 estaciones acelerográficas, los datos fueron tomados de la base de datos del National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience de Japón (NIED, 2017). La clasificación de sitio para cada estación se realizó a partir del criterio propuesto por el (NEHRP, 2003). A continuación, se muestra la información recopilada.

*Tabla 7. Estaciones acelerográficas – Terremoto de Tohoku*

Estación	Lat. [°]	Lon. [°]	PGA [g]	R [km]	Vs30 [m/s]	Perfil suelo
FKS001	37.79	140.92	0.631	174.00	297	D
FKS004	37.68	140.73	0.580	193.00	292	D
FKS005	37.64	140.98	0.749	173.00	489	C
FKS006	37.50	140.76	0.536	197.00	223	D
FKS007	37.41	140.96	0.704	184.00	510	C
FKS010	37.23	141.00	1.169	190.00	409	C
FKS031	37.34	140.81	0.460	199.00	445	C
FKSH20	37.49	140.99	0.674	178.00	350	D
IWT005	39.65	141.95	0.241	189.00	408	C
IWT007	39.27	141.86	0.711	156.00	358	D
IWT008	39.08	141.71	0.330	148.00	1086	B
IWT009	39.02	141.40	0.581	163.00	580	C
IWT010	38.93	141.12	1.017	178.00	668	C
IWT011	39.15	141.15	0.349	188.00	250	D
IWT013	39.34	141.54	0.447	179.00	329	D
IWT016	39.60	141.68	0.241	195.00	440	C
IWT026	39.26	141.10	0.404	200.00	286	D
IWTH04	39.18	141.39	0.397	175.00	456	C
IWTH05	38.87	141.35	0.668	156.00	429	C
IWTH14	39.74	141.91	0.297	200.00	816	B
IWTH18	39.46	141.68	0.339	183.00	892	B
IWTH21	39.47	141.93	0.467	172.00	521	C
IWTH22	39.33	141.30	0.331	192.00	532	C

Estación	Lat. [°]	Lon. [°]	PGA [g]	R [km]	Vs30 [m/s]	Perfil suelo
IWTH23	39.27	141.82	0.496	158.00	923	B
IWTH26	38.97	141.00	0.573	188.00	371	C
IWTH27	39.03	141.53	0.753	155.00	670	C
MYG001	38.90	141.57	0.434	143.00	441	C
MYG002	38.73	141.51	0.671	137.00	469	C
MYG003	38.73	141.31	0.796	152.00	476	C
MYG004	38.73	141.02	2.753	175.00	430	C
MYG006	38.58	140.97	0.583	174.00	170	E
MYG007	38.59	141.25	0.664	151.00	231	D
MYG008	38.58	141.45	0.380	134.00	245	D
MYG009	38.45	140.89	0.559	177.00	537	C
MYG010	38.43	141.28	0.467	143.00	262	D
MYG011	38.31	141.50	0.939	121.00	476	C
MYG012	38.32	141.02	2.008	163.00	121	E
MYG013	38.27	140.93	1.546	170.00	273	D
MYG014	38.32	140.64	0.505	196.00	370	C
MYG015	38.10	140.87	0.419	175.00	231	D
MYG016	38.01	140.62	0.414	197.00	420	C
MYG017	37.98	140.78	0.356	183.00	134	E
MYGH03	38.92	141.64	0.463	140.00	934	B
MYGH04	38.79	141.33	0.563	154.00	850	B
MYGH05	38.58	140.78	0.497	189.00	305	D
MYGH06	38.59	141.07	0.269	165.00	593	C
MYGH08	38.11	140.84	0.288	177.00	203	D
MYGH09	38.01	140.60	0.330	198.00	358	D
MYGH10	37.94	140.89	0.888	174.00	348	D

*Datos extraídos de (NIED, 2017)*

### **3.2. Procesamiento de acelerogramas**

Los registros sísmicos originales pueden estar contaminados con información ajena al evento, como puede ser la interferencia producida por la caída cercana de algún objeto, los cambios

bruscos de energía, etc. Para poder obtener una información cercana a la realidad es necesario realizar varios procesos matemáticos, con el fin de eliminar la información ajena al evento y obtener la información propia del evento (Botero, 2011).

El procesamiento de los acelerogramas se realizó mediante el software PRISM v2.0 creado por Seong-Hoon Jeong, Kwang-Ho Lee y Won-Seok Jang. PRISM es un programa para el análisis de respuesta sísmica de sistemas de un solo grado de libertad, capaz de: procesar y filtrar registros de movimientos sísmicos, calcular la respuesta de una estructura con varios modelos de histéresis, y generar espectros de respuesta elásticos e inelásticos. PRISM permite escalar y corregir por línea base los registros sísmicos antes de la integración respecto al tiempo.

### **3.2.1. Corrección por línea base**

La corrección por línea base de los registros se realizó mediante la metodología propuesta por (Chiu, 1997), cuyo algoritmo consiste en los siguientes pasos:

- Ajuste por mínimos cuadrados a una línea recta, con el fin de eliminar la deriva de la línea base de aceleración.
- Aplicación de un filtro, con el fin de eliminar la tendencia lineal y otros errores de baja frecuencia en la aceleración.
- Sustracción de la velocidad inicial, con el fin de eliminar la tendencia lineal del desplazamiento.

### **3.2.2. Filtrado de señales**

Un registro sísmico puede estar contaminado por múltiples aspectos, que pueden ser causados por efectos del evento o por el tratamiento de los datos. Esto implica que el evento sísmico total registrado por el acelerómetro será la suma del registro neto más el ruido. Además, es necesario eliminar el ruido con el fin de obtener el registro neto, que es el propio del evento sísmico.

Para lograr esto es necesario procesar la señal empleando filtros digitales, que se definen como funciones matemáticas que multiplican cualquier señal, expresada en función del

tiempo o la frecuencia, con el fin de eliminar algún contenido frecuencial ajeno a la señal sísmica.

Para el filtrado de señales, se tomó como frecuencia máxima permisible la frecuencia dada por el teorema de Nyquist, según el cual para replicar con exactitud la forma de una onda es necesario que la frecuencia de muestreo sea superior al doble de la máxima frecuencia a muestrear; en otras palabras, se cumplió que la frecuencia máxima en los registros no excediera un valor de  $1/2Dt$ , donde  $Dt$  es el intervalo de tiempo con el que se registraron los datos en el acelerograma. De igual forma se limitó la frecuencia mínima, usualmente como  $1/(5 \text{ segundos})$ .

## **4. DURACIÓN Y NÚMERO EFECTIVO DE CICLOS**

La influencia de la duración del movimiento sísmico en el potencial de licuación de un depósito de suelo ha sido evaluada mediante ensayos de laboratorio, en los que se ha comprobado la gran influencia del número de ciclos y la amplitud de la carga en la generación de presiones de poros en una muestra de suelo sometida a una carga cíclica.

### **4.1. Duración de terremotos**

La duración de los movimientos sísmicos puede medirse y describirse de diferentes maneras, según el interés del profesional a cargo. Un sismólogo suele estar interesado en la duración de todo el movimiento sísmico, ya que la parte inicial a pesar de ser débil puede revelar información acerca del inicio del terremoto y la parte final puede proporcionar una visión de los efectos de la trayectoria de este. Un ingeniero, por su parte, se interesa por la porción más fuerte del movimiento, debido a que es esta la que ocasiona daños en la infraestructura (Kramer & Greenfield, 2017).

Varios investigadores han propuesto una gran variedad de enfoques para identificar y medir la fase de agitación fuerte de los acelerogramas [ver Tabla 8, adaptada de (Bommer & Martinez-Pereira, 1999)]. Al revisar las definiciones de duración del movimiento fuerte, basadas en acelerogramas de terremotos, se encuentra que casi todas estas se pueden clasificar en tres grupos genéricos: Duración entre intervalos, duración uniforme y duración significativa; los cuales se describen en las secciones 4.1.1, 4.1.2 y 4.1.3. Un grupo adicional de definiciones se basa en la respuesta de las estructuras a la carga sísmica (Bommer & Martinez-Pereira, 1999).

Además de agrupar las definiciones de duración del movimiento fuerte en las categorías genéricas descritas anteriormente, también es posible clasificar una definición según si se basa en un criterio absoluto o relativo. Por ejemplo, la duración entre intervalos puede definirse para un umbral específico de aceleración de 0.05 g, o alternativamente para un umbral que puede definirse como una cierta proporción de la aceleración máxima, la cual se

conoce como “duración fraccional” (McGuire & Barnhard, 1979). En la Tabla 8 se resume la clasificación de las definiciones de duración, propuestas por diversos investigadores, de acuerdo con los grupos genéricos definidos.

Tabla 8. Clasificación de definiciones de duración de terremotos

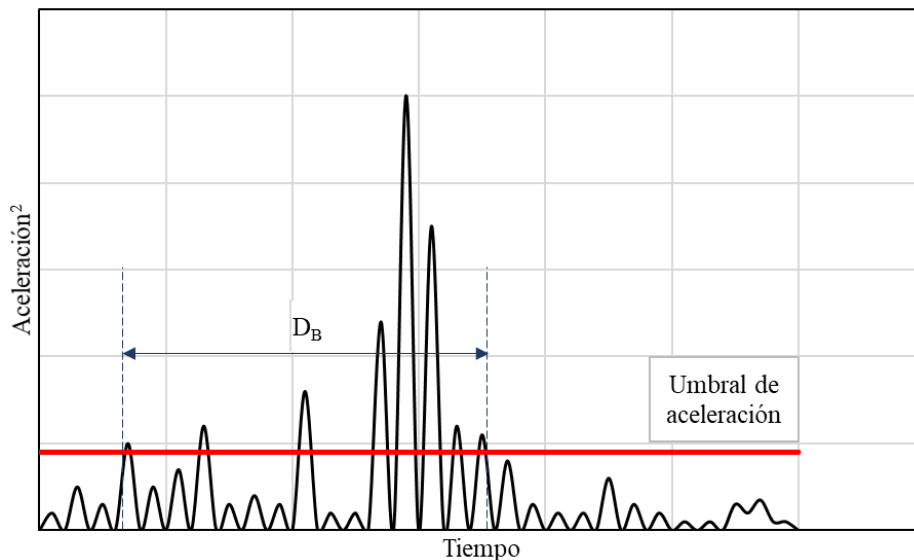
Definición	Intervalos		Uniforme		Significativa		Estructural	
	Rel.	Abs.	Rel.	Abs.	Rel.	Abs.	Rel.	Abs.
(Rosenblueth & Bustamante, 1962)							D	
(Housner, 1965)		I						
(Ambraseys & Sarma, 1967)		I						
(Husid, 1969)					I			
(Kobayashi, 1971)		I						
(Page, et al., 1972)		I						
(Donovan, 1972)					I			
(Bolt, 1973)		D		D				
(Housner, 1975)					I			
(Trifunac & Brady, 1975)					I			
(Hisada, 1976)	I							
(Trifunac & Westermo, 1977)					D			
(Saragoni, 1977)					I			
(McGuire & Barnhard, 1979)	I	I			I			
(McCann & Shah, 1979)					I			
(Perez, 1980)								D
(Vanmarcke & Lai, 1980)					I			
(Zahrah & Hall, 1984)								D
(Zhou & Xie, 1984)					I			
(Shahabi & Mostaghel, 1984)					I			
(Theofanopoulos & Drakopoulos, 1986)					I			
(Elghadamsi, et al., 1988)					I			
(Xie & Zhang, 1988)								D
(Mohraz & Peng, 1989)					D			
(Theofanopoulos & Watabe, 1989)					I			
(Kawashima & Aizawa, 1989)	I	I						
(Sarma & Casey, 1990)			I					
(Papazachos, et al., 1992)		I						
(Somerville, et al., 1997)					I			
I: Independiente de la frecuencia				D: Dependiente de la frecuencia				

A continuación, se define cada uno de los tipos de definición de duración y los umbrales de aceleración tomados en cada caso. Se seleccionaron los umbrales utilizados en investigaciones anteriores para evaluar el potencial de licuación.

#### 4.1.1. Duración entre intervalos

La duración entre intervalos se define como el tiempo total transcurrido entre el primero y el último valor de tiempo que intercepta cierto umbral del cuadrado de la aceleración, como se muestra en la *Figura 5*. Una desventaja de esta definición es que solo considera el primer y el último pico que cruzan el umbral especificado e ignora por completo las características de la fase de agitación fuerte, lo que puede dar como resultado la estimación de largas duraciones en terremotos con pequeños sub-eventos que ocurren después de que el movimiento principal de choque ha ocurrido (Bommer & Martinez-Pereira, 1999).

*Figura 5. Definición genérica de “Duración entre intervalos” en un acelerograma*

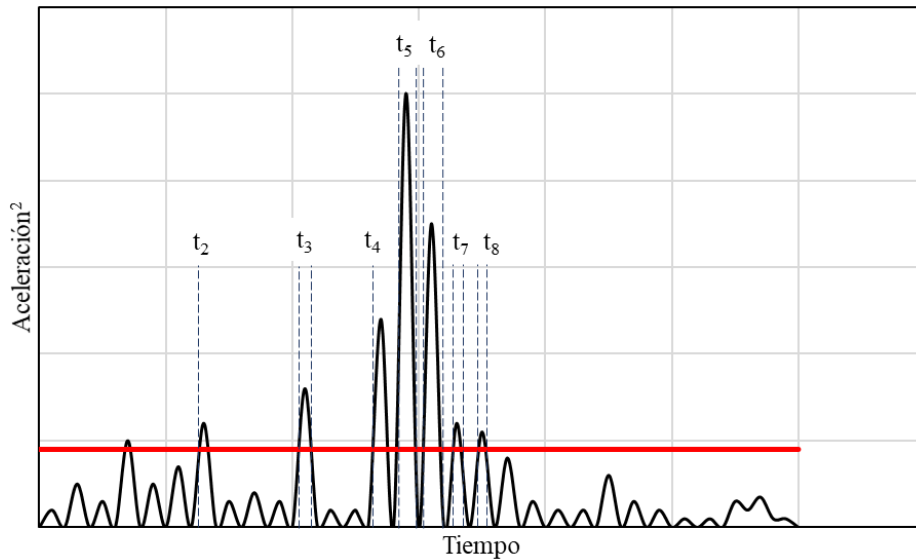


En el presente trabajo se utilizarán cuatro umbrales de aceleración para el análisis de los datos: dos umbrales absolutos de 0.05 g y 0.1 g, cuya duración se denominará  $D_{BA}$  (Bracketed duration absolute) y dos umbrales relativos equivalentes al 20% y 75% de la aceleración pico en el acelerograma, cuyas duraciones se denominarán  $D_{BR}$  (Bracketed duration relative).

#### 4.1.2. Duración uniforme

La duración uniforme se define como la sumatoria de los intervalos de tiempo durante los cuales la aceleración es mayor a un umbral definido, como se muestra en la *Figura 6*. Esta definición es menos sensible al umbral de la aceleración que la duración entre intervalos, pero tiene la desventaja de que no define una ventana de tiempo continua durante la cual el movimiento pueda considerarse fuerte (Bommer & Martinez-Pereira, 1999).

*Figura 6. Definición genérica de “Duración uniforme” en un acelerograma*



$$D_{UA} = \sum_i^n t_i \quad (28)$$

En el presente trabajo se utilizarán dos umbrales de aceleración absolutos correspondientes al 5 y 10% de la aceleración de la gravedad, los cuales se denominarán  $D_{UA}$  (Uniform duration absolute). Adicionalmente se introduce otra definición de duración uniforme, denominada  $D_{US}$  (Uniform duration significative), propuesta por (Trifunac & Brady, 1975), en la cual se define el umbral de aceleración como el valor para el cual se obtiene cierto porcentaje de la integral de la aceleración al cuadrado; en el presente trabajo se adopta un valor del 75% , de acuerdo con el criterio propuesto por (Prieto, 2002).

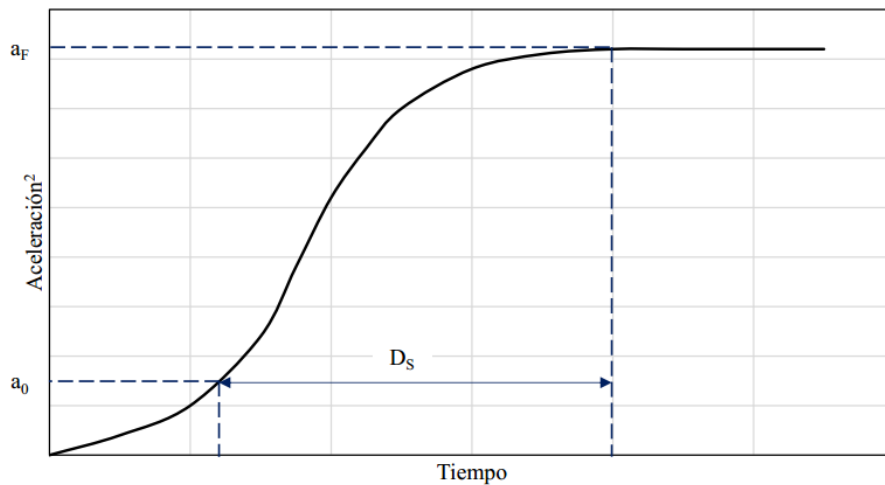
### 4.1.3. Duración significativa

La duración significativa se basa en la acumulación de energía en el acelerograma, representada por la integral del cuadrado de la aceleración, la velocidad o el desplazamiento del suelo. Si se utiliza la integral de la velocidad del suelo, entonces la cantidad está directamente relacionada con la densidad de energía (Sarma, 1971), mientras que si se emplea la integral de la aceleración del suelo entonces la cantidad se relaciona con la intensidad de Arias, la cual se define como:

$$IA = \frac{\pi}{2g} \int_0^{t_r} a^2(t) dt \quad (29)$$

Donde  $a(t)$  es la serie de tiempo de la aceleración,  $t_r$  es la duración total del acelerograma y  $g$  es la aceleración debida a la gravedad. La duración significativa se define como el tiempo en el que se acumula una proporción de la integral de la aceleración al cuadrado, cómo se muestra en la *Figura 7*. El concepto de duración significativa tiene la ventaja de que considera las características de todo el acelerograma y define una ventana de tiempo continua en la que el movimiento puede considerarse como fuerte.

*Figura 7. Definición genérica de “Duración significativa”*



En el presente trabajo se utilizará la duración significativa para el intervalo entre el 5% y el 75% de la integral de la aceleración al cuadrado,  $D_{SR}(5-75\%)$ ; y para el intervalo entre el 5% y el 95% de la integral de la aceleración al cuadrado,  $D_{SR}(5-95\%)$ .

## **4.2. Número efectivo de ciclos**

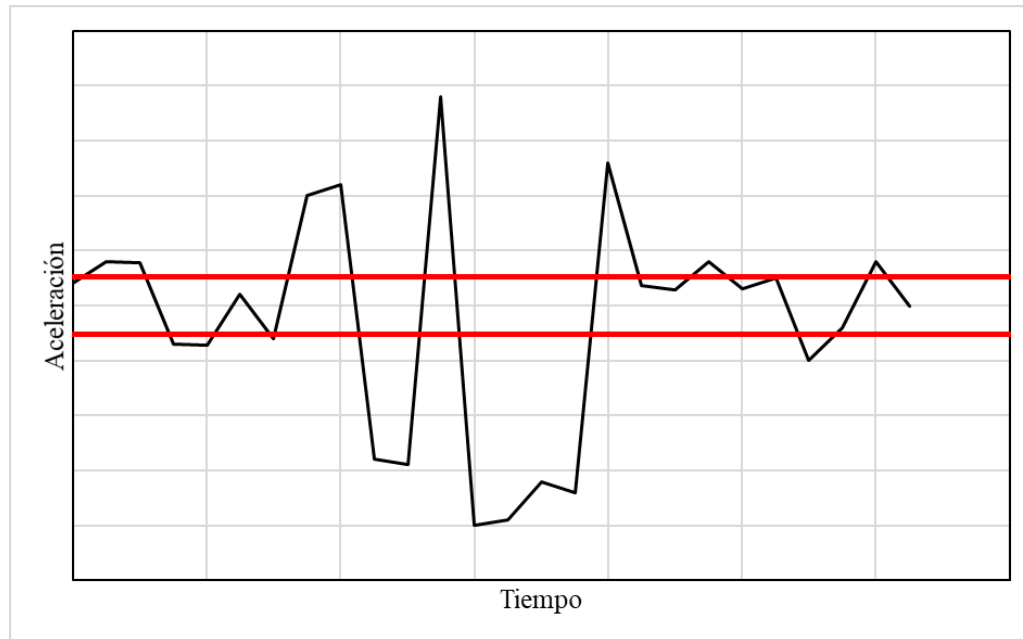
El número efectivo de ciclos es el parámetro más utilizado en ingeniería geotécnica para evaluar la influencia de la duración y de la forma de onda en el potencial de licuación de un depósito de suelo. Tal como en (Bommer, et al., 2006) las definiciones de número de ciclos se representarán mediante la letra  $N$ , seguida por un subíndice que consta de dos letras y un número entre paréntesis. La primera letra significa el método utilizado para el conteo de los ciclos, en este caso  $P$  para el método de conteo de picos. La segunda letra,  $A$  ó  $R$  indica si la definición utiliza umbrales absolutos o relativos. El número entre paréntesis se refiere al umbral de aceleración utilizado.

### **4.2.1. Método de conteo de picos**

El método de conteo de picos es el más utilizado en ingeniería sísmica, para la obtención del número efectivo de ciclos, siendo empleado en una amplia gama de aplicaciones de ingeniería, tales como la estimación del daño estructural y la evaluación del potencial de licuación. La aplicación del método consiste en contar el número de ciclos en los cuales el pico supera cierto umbral de aceleración, con el fin de que picos de baja amplitud no tengan gran influencia en el resultado. De igual forma, se excluyen todos picos que no se encuentran entre dos cruces del nivel cero, tal como se muestra en la siguiente figura.

En el presente trabajo se utilizarán dos umbrales de aceleración para el análisis de los datos: un umbral absoluto de 0.03 g, cuya duración se denominará  $N_{PA}$  y un umbral relativo equivalente al 65% de la aceleración pico en el acelerograma, cuya duración se denominará  $N_{PR}$ .

Figura 8. Método de conteo de picos



#### 4.3. Correlación entre la duración y el número de ciclos

A continuación, se presentan las correlaciones obtenidas entre las diferentes definiciones de duración y número de ciclos, presentadas en el capítulo anterior, para la base de datos recopilada. En la Tabla 9 se presentan los acrónimos utilizados para cada definición de duración y número de ciclos en el presente trabajo.

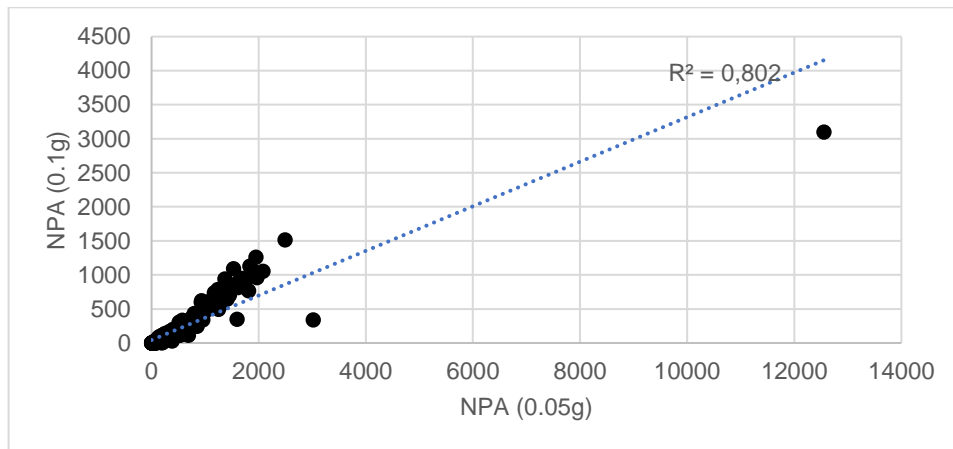
Tabla 9. Resumen de definiciones de duración y número de ciclos

<b>Acrónimo</b>	<b>Definición</b>
<i>NPA</i>	Número de ciclos, método de conteo por picos con umbral absoluto.
<i>NPR</i>	Número de ciclos, método de conteo por picos con umbral relativo.
<i>DBA</i>	Duración entre intervalos con umbral absoluto.
<i>DBR</i>	Duración entre intervalos con umbral relativo.
<i>DUA</i>	Duración uniforme con umbral absoluto.
<i>DUS</i>	Duración uniforme significativa.
<i>DSR</i>	Duración significativa con umbral relativo.

### 4.3.1. Correlación entre definiciones de números de ciclos

La correlación entre las diferentes definiciones de número de ciclos permite evaluar el efecto del tipo de umbral de aceleración escogido (absoluto o relativo) y la posibilidad de relacionar directamente las definiciones de número de ciclos utilizadas por cada investigador, con el fin de facilitar la unificación de un criterio aplicado a los métodos de predicción del potencial de licuación. A continuación, se presentan los resultados obtenidos para cada combinación.

Figura 9. Correlación entre NPA (0.05g) y NPA(0.1g)



La correlación entre valores de número de ciclos, obtenidos mediante el método de conteo por picos para umbrales absolutos de 0.05 g y 0.1 g, arroja un alto coeficiente de correlación; que demuestra que podrían unificarse valores obtenidos por este método para diferentes umbrales a un solo umbral de aceleración, de forma directa en el caso de umbrales absolutos.

Figura 10. Correlación entre NPA (0.05g) y NPR(20%)

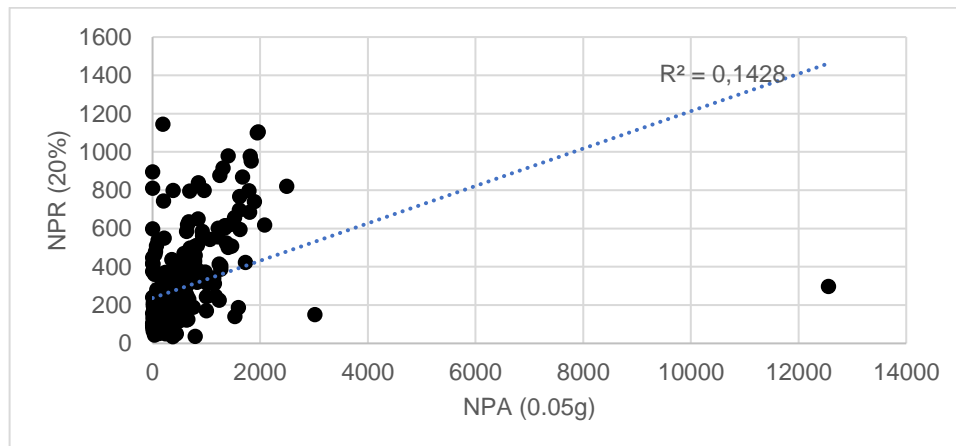
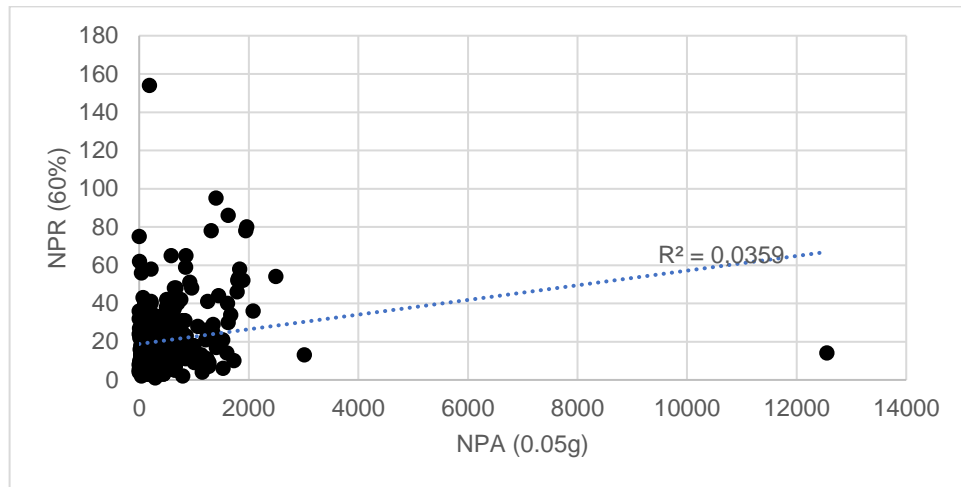


Figura 11. Correlación entre NPA(0.05g) y NPR(60%)



La correlación entre valores de número de ciclos, obtenidos mediante el método de conteo por picos para umbrales absolutos y relativos entre sí, arroja bajos coeficientes de correlación; por tanto, no es confiable relacionar directamente un valor de número de ciclos para un umbral absoluto, con otro valor obtenido para un umbral relativo. La alta dispersión en estos casos se debe a que los ciclos contabilizados para un umbral absoluto dependen de la amplitud del registro, a diferencia de los ciclos contabilizados para un umbral relativo, el cual es independiente de este parámetro. Cabe destacar el hecho de que la correlación es casi nula para un umbral relativo del 60%, el cual es precisamente el nivel utilizado convencionalmente en el análisis de licuación para el conteo de ciclos.

Figura 12. Correlación entre NPA(0.1g) y NPR(20%)

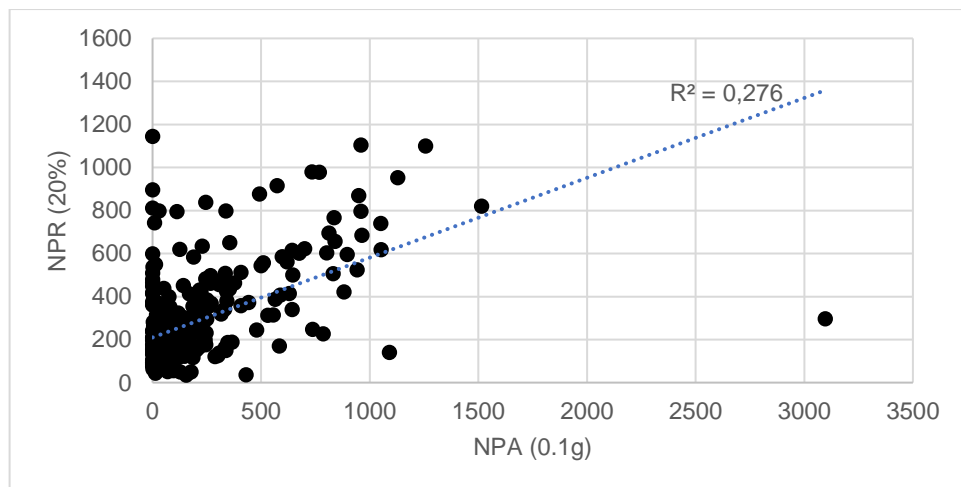
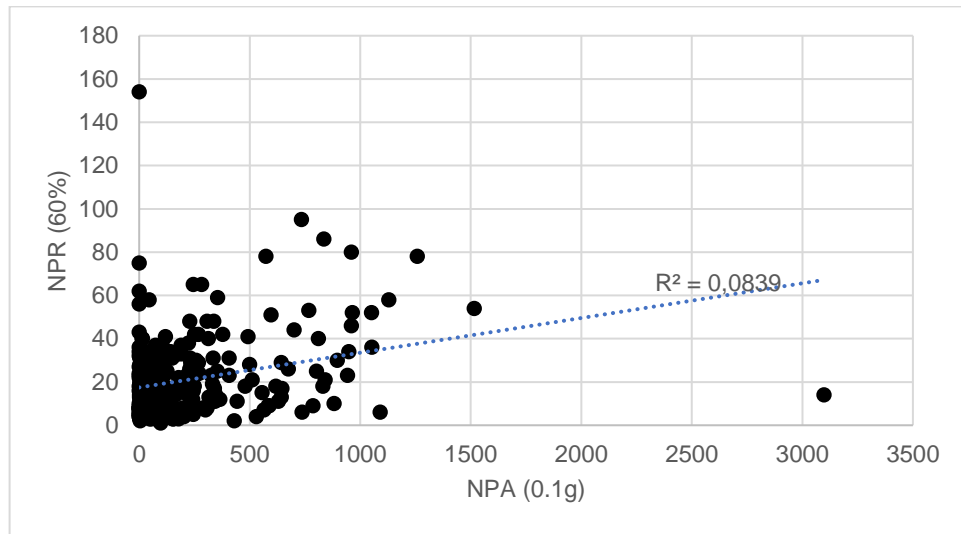


Figura 13. Correlación entre NPA(0.1g) y NPR(60%)



En el caso de umbrales relativos, cuando se correlacionan valores de número de ciclos, obtenidos mediante el método de conteo por picos para umbrales relativos de 20% y 60%, se obtiene una correlación moderada; que demuestra que, no es recomendable unificar valores obtenidos por este método para diferentes umbrales a un solo umbral de aceleración, de forma directa.

Figura 14. Correlación entre NPR (20%) y NPR(60%)

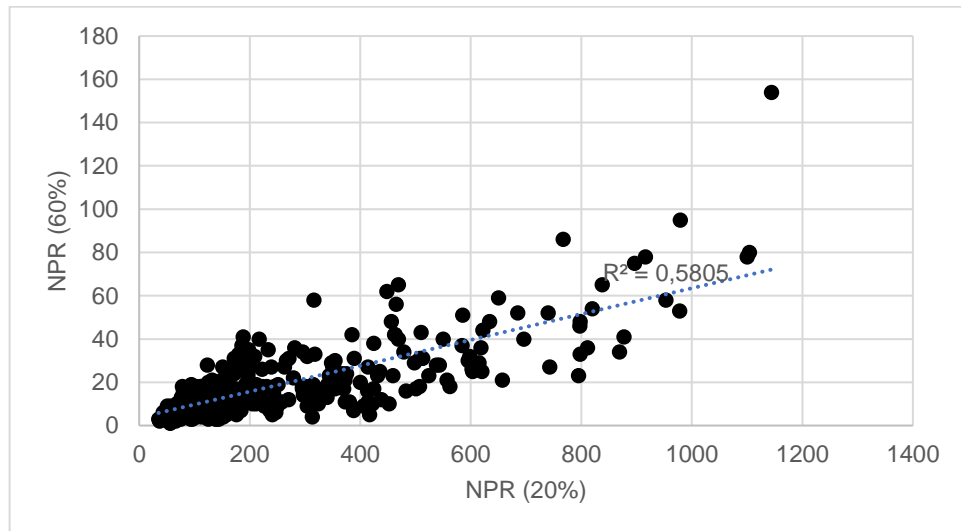


Tabla 10. Coeficiente de correlación entre definiciones de número de ciclos

	<i>NPA (0.05g)</i>	<i>NPA (0.10g)</i>	<i>NPR (20%)</i>	<i>NPR (60%)</i>
<i>NPA (0.05g)</i>	1.000	0.802	0.143	0.036
<i>NPA (0.10g)</i>	0.802	1.000	0.276	0.084
<i>NPR (20%)</i>	0.143	0.276	1.000	0.581
<i>NPR (60%)</i>	0.036	0.084	0.581	1.000

#### 4.3.2. Correlación entre definiciones de duración

La correlación entre las diferentes definiciones de duración permite evaluar el efecto del tipo de umbral de aceleración escogido (absoluto o relativo) y la posibilidad de relacionar directamente las definiciones de duración utilizadas en las correlaciones disponibles de este parámetro con otras variables de las que se dispone habitualmente en un análisis de potencial de licuación. A continuación, se presentan los resultados obtenidos para cada combinación.

Figura 15. Correlación entre DBA(0.05g) y DBA(0.1g)

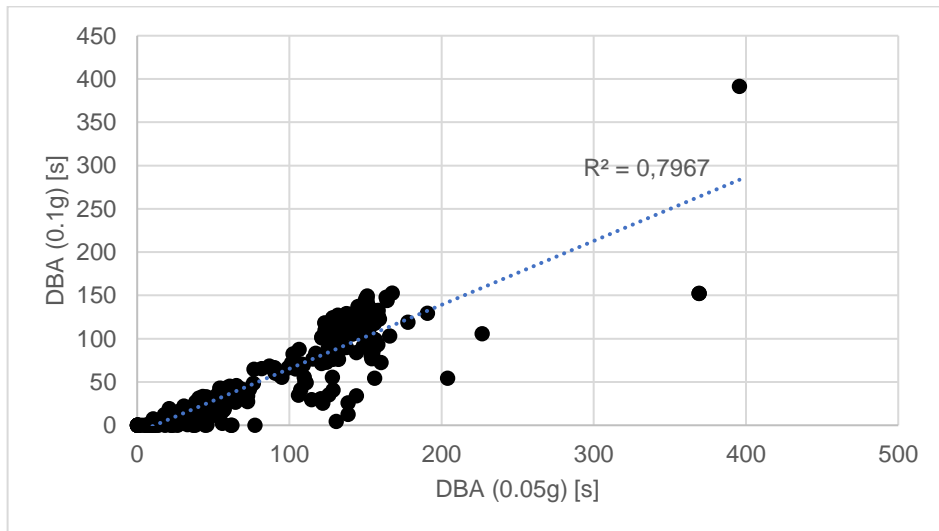


Figura 16. Correlación entre DBA(0.05g) y DBR(20%)

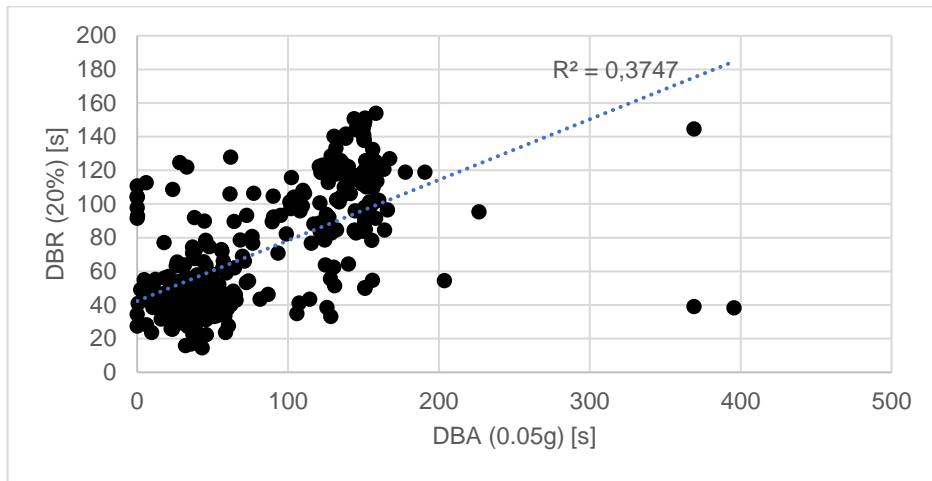


Figura 17. Correlación entre DBA(0.05g) y DBR(75%)

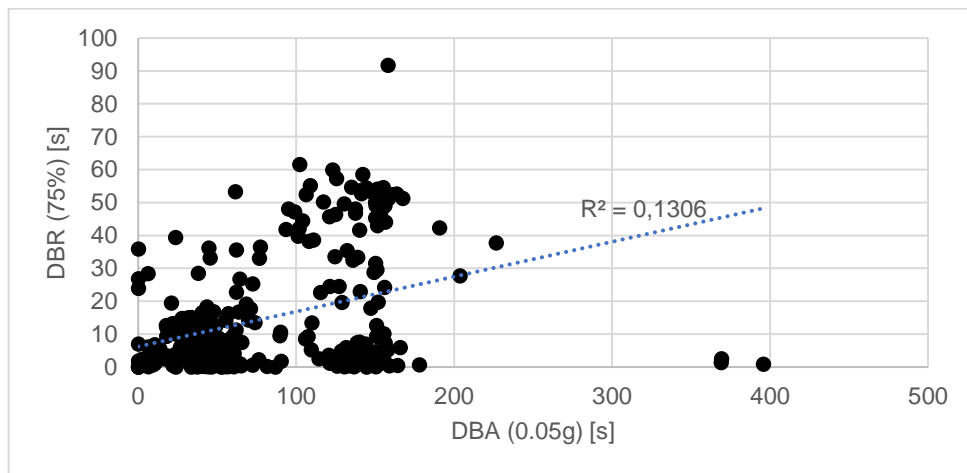


Figura 18. Correlación entre DBA(0.05g) y DUA(0.05g)

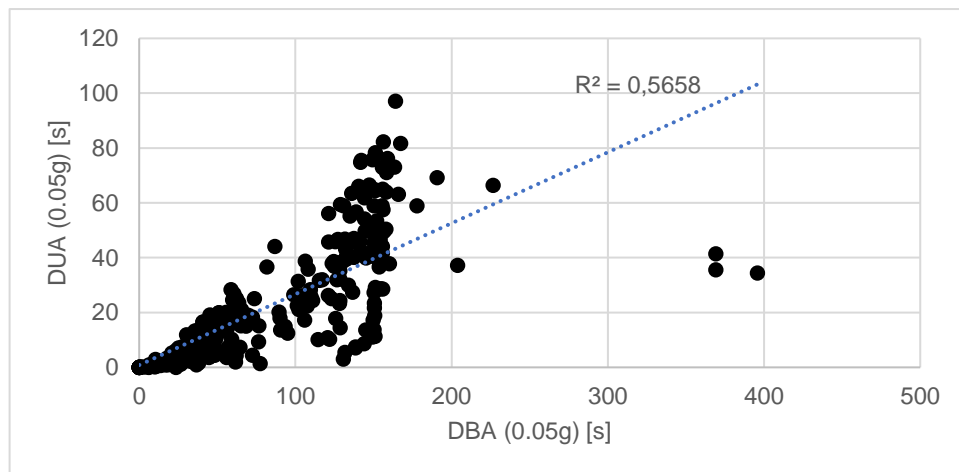


Figura 19. Correlación entre DBA(0.05g) y DUA (0.1g)

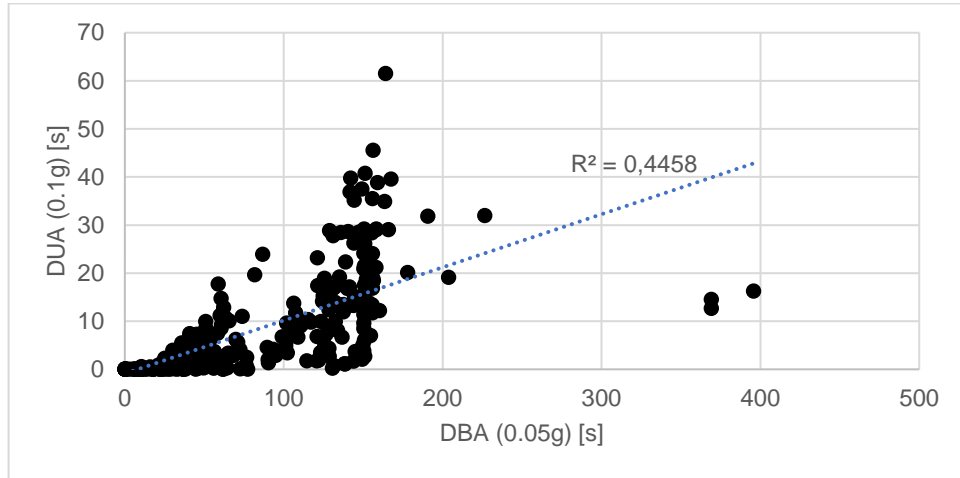


Figura 20. Correlación entre DBA(0.05g) y DUS (75%I)

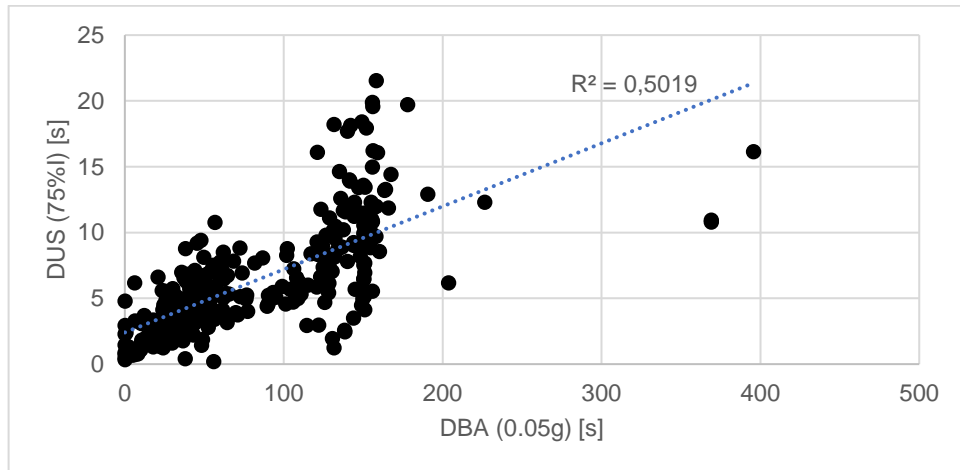


Figura 21. Correlación entre DBA(0.05g) y DSR(5-75%)

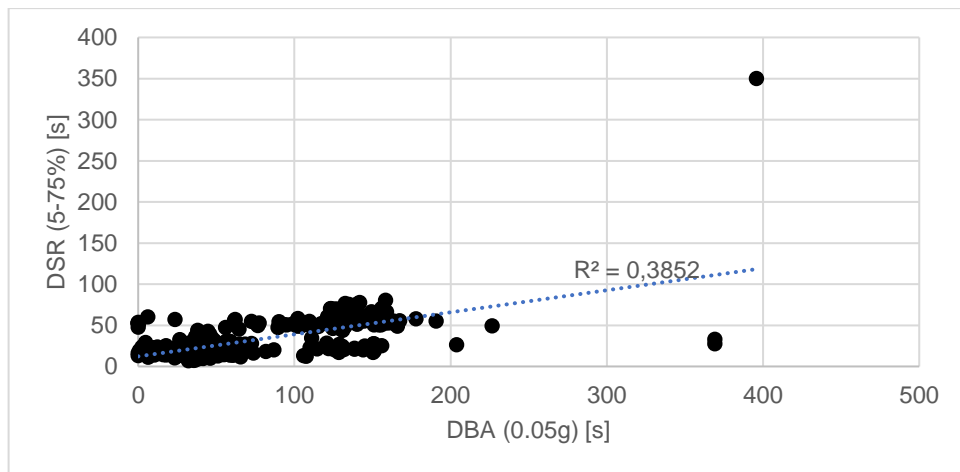


Figura 22. Correlación entre DBA (0.05g) y DSR (5-95%)

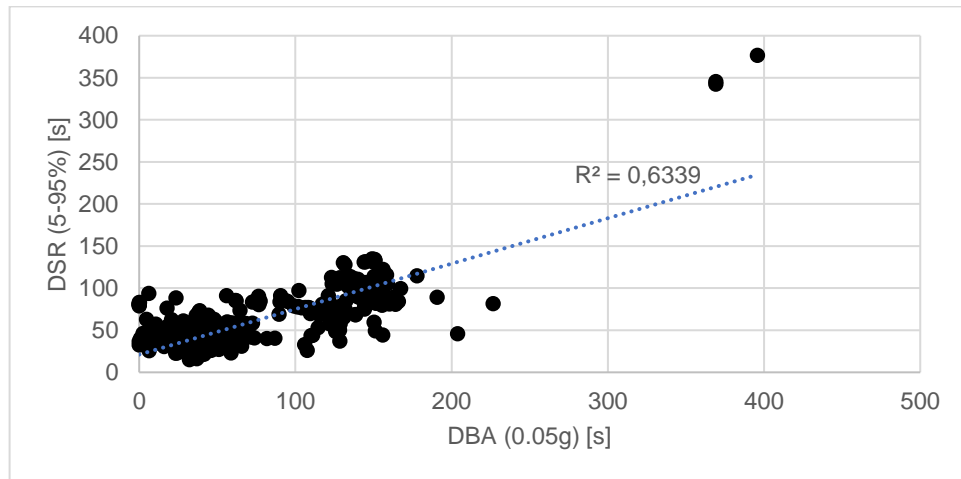


Figura 23. Correlación entre DBA (0.1g) y DBR(20%)

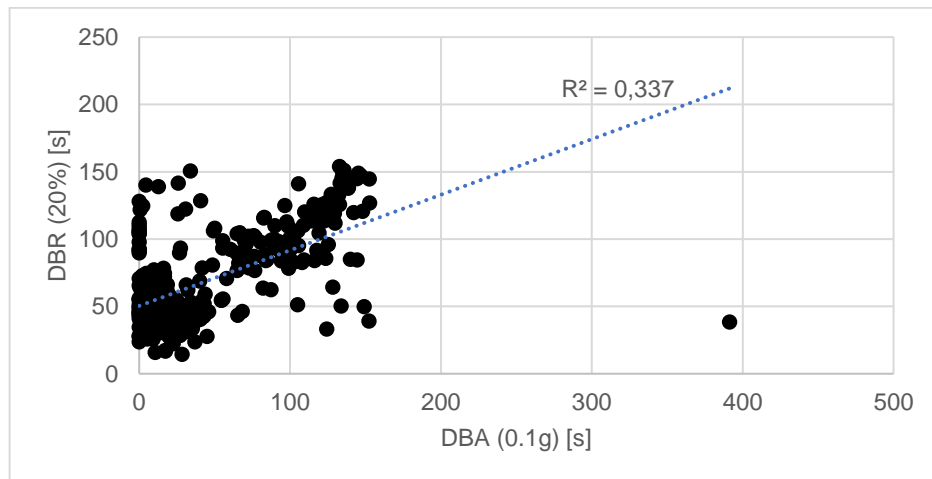


Figura 24. Correlación entre DBA (0.1g) y DBR(75%)

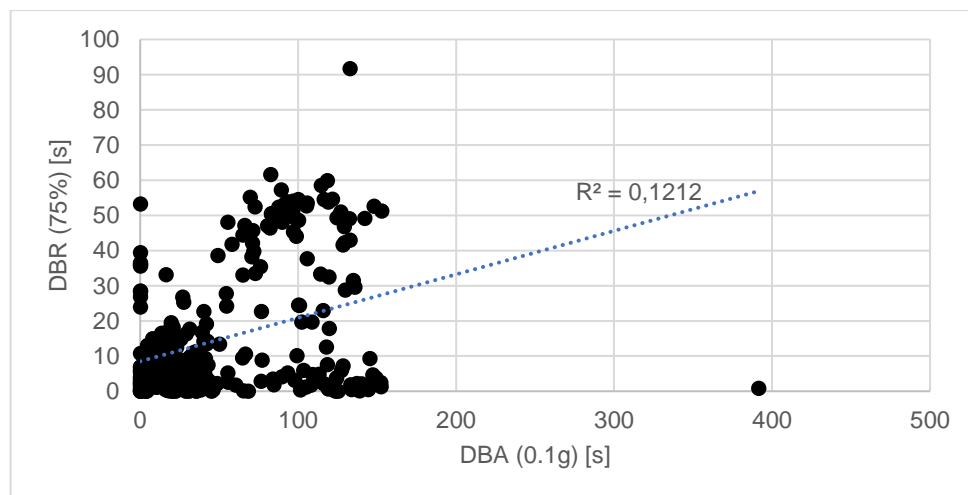


Figura 25. Correlación entre DBA (0.1g) y DUA(0.05g)

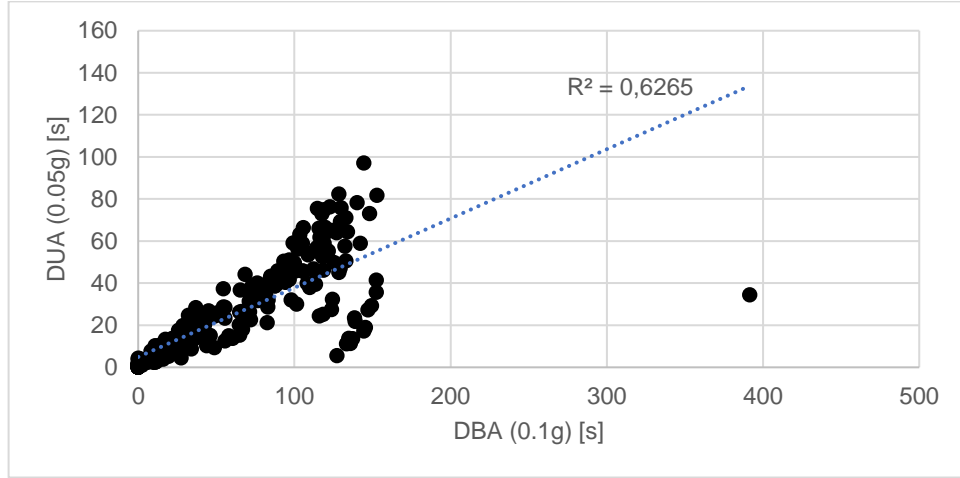


Figura 26. Correlación entre DBA (0.1g) y DUA(0.1g)

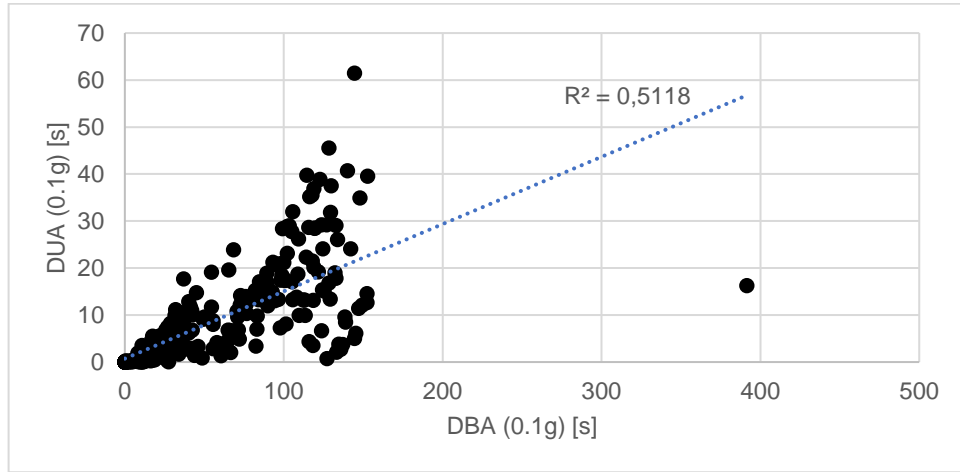


Figura 27. Correlación entre DBA (0.1g) y DUS(75%I)

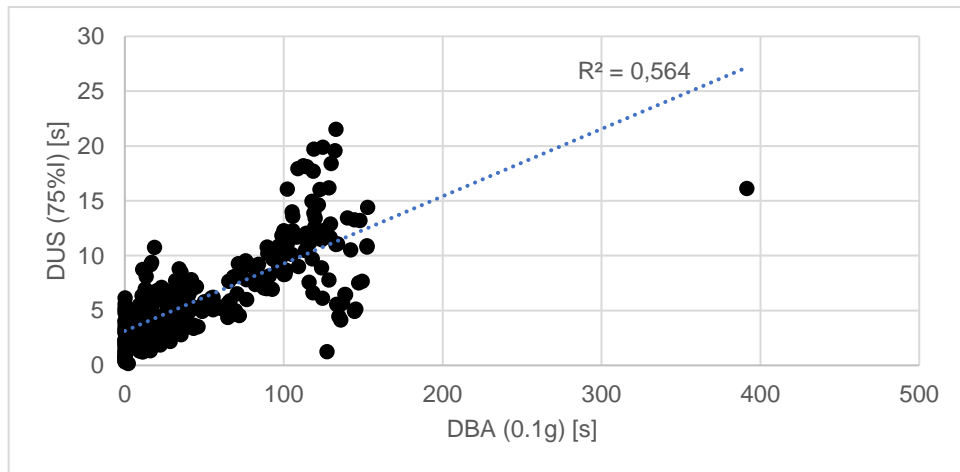


Figura 28. Correlación entre DBA (0.1g) y DSR(5-75%)

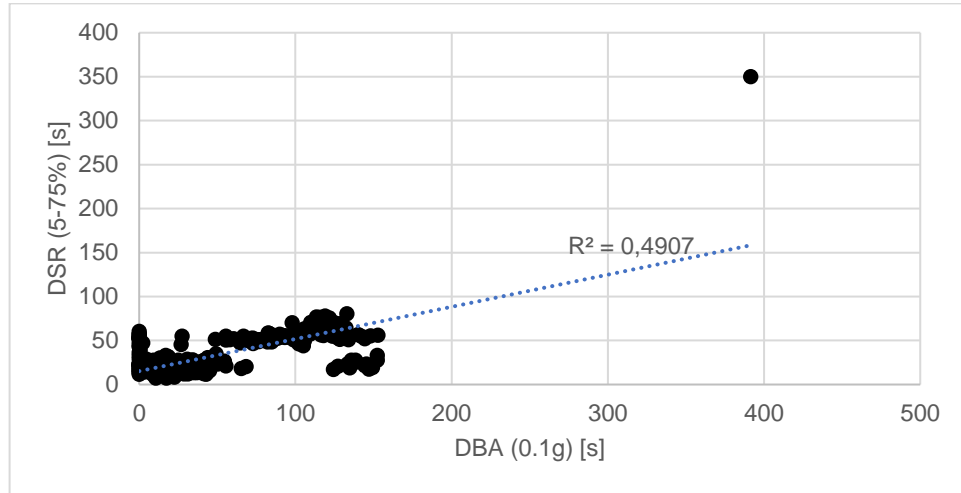


Figura 29. Correlación entre DBA (0.1g) y DSR(5-95%)

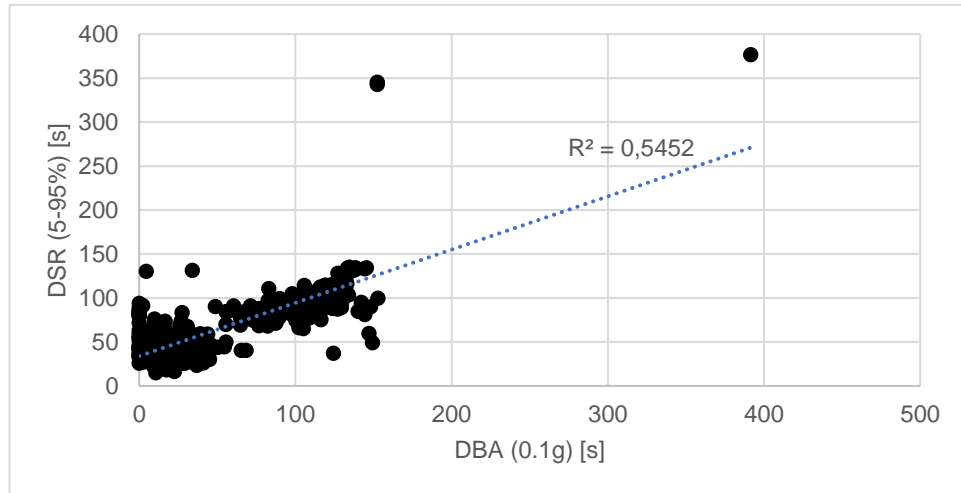


Figura 30. Correlación entre DBR (20%) y DBR(75%)

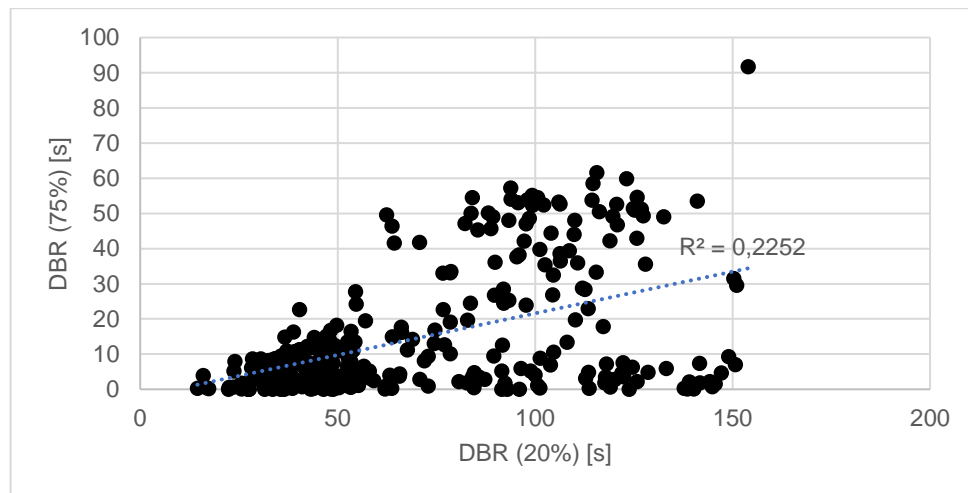


Figura 31. Correlación entre DBR (20%) y DUA(0.05g)

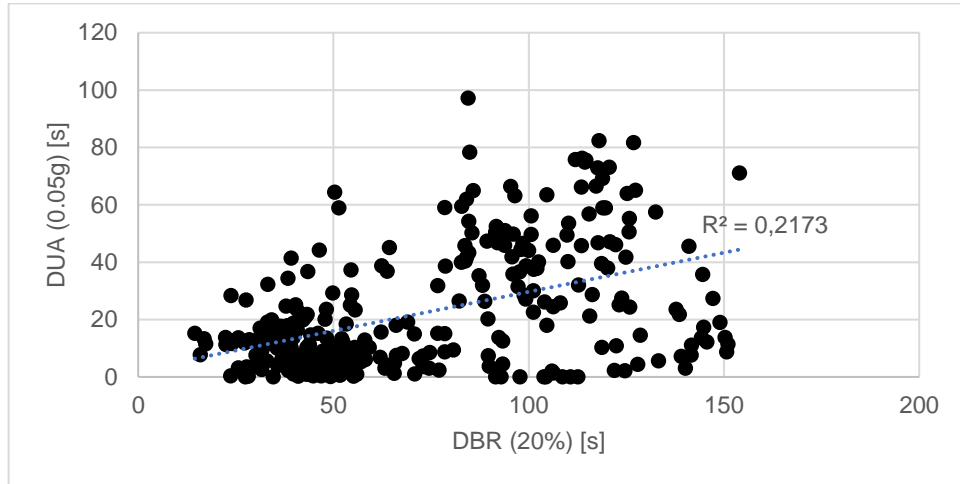


Figura 32. Correlación entre DBR (20%) y DUA(0.1g)

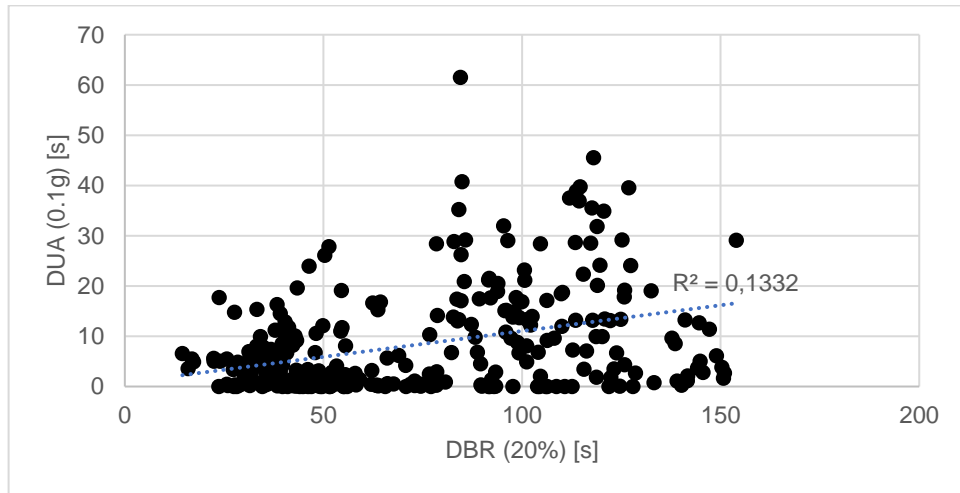


Figura 33. Correlación entre DBR (20%) y DUS(75%I)

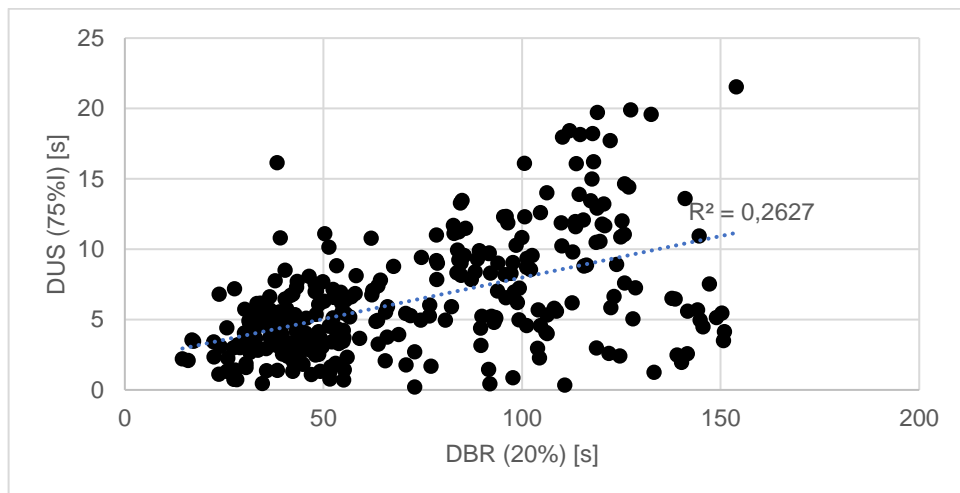


Figura 34. Correlación entre DBR (20%) y DSR(5-75%)

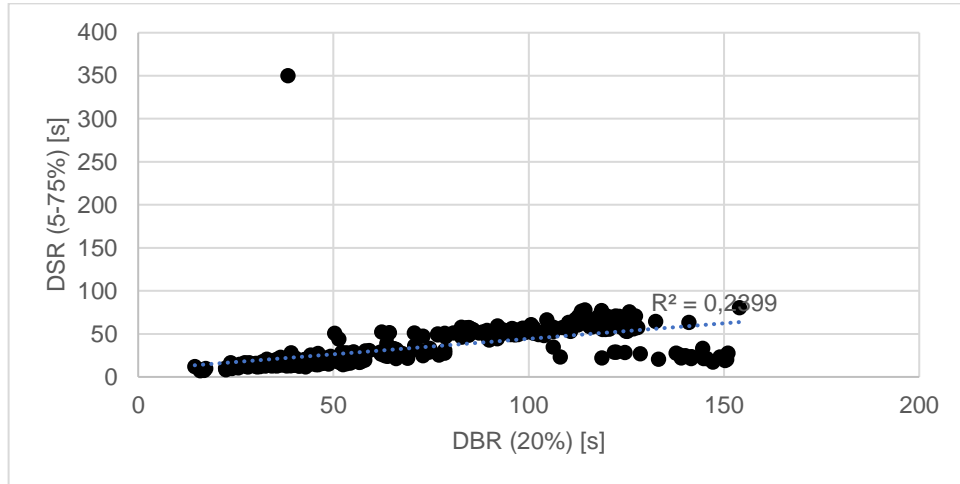


Figura 35. Correlación entre DBR (20%) y DSR(5-95%)

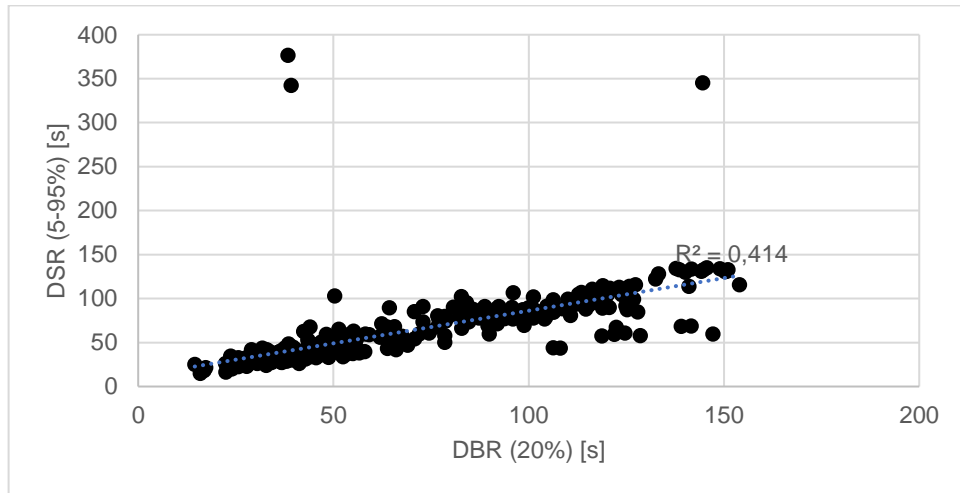


Figura 36. Correlación entre DBR(75%) y DUA(0.05g)

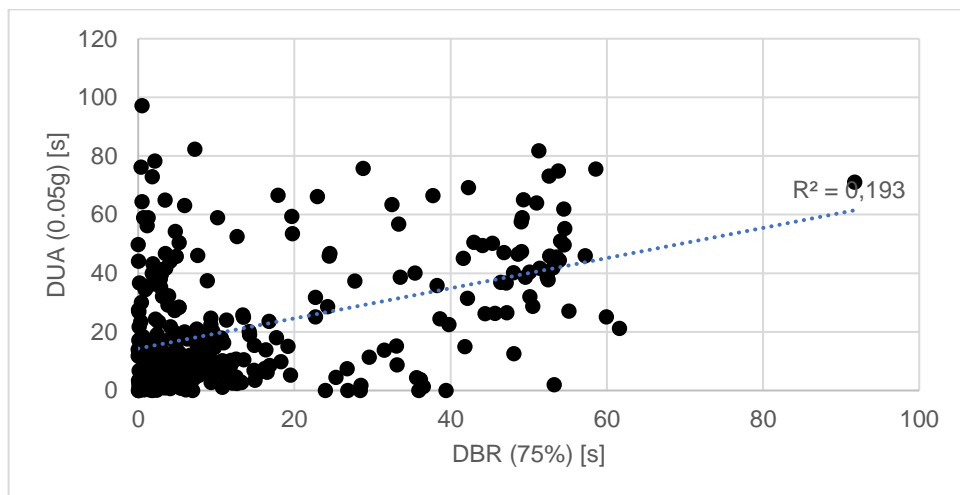


Figura 37. Correlación entre DBR (75%) y DUA (0.1g)

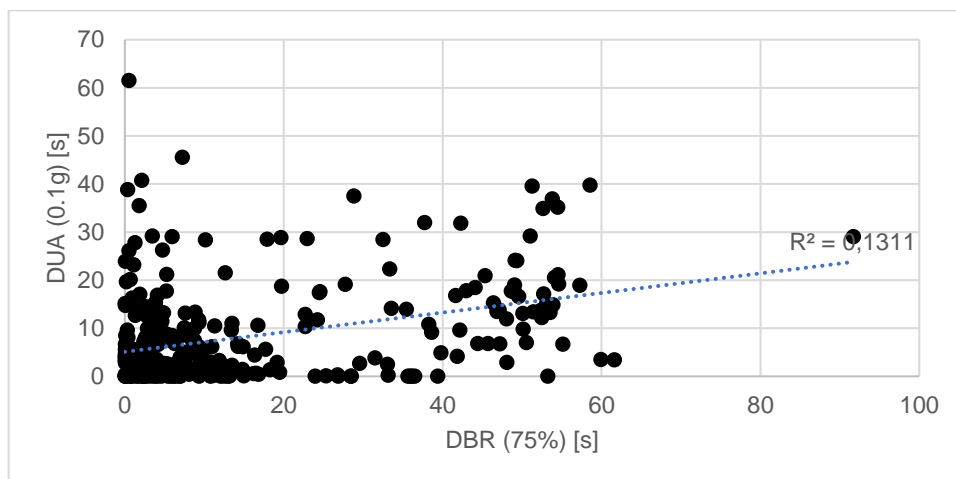


Figura 38. Correlación entre DBR(75%) y DUS(75%I)

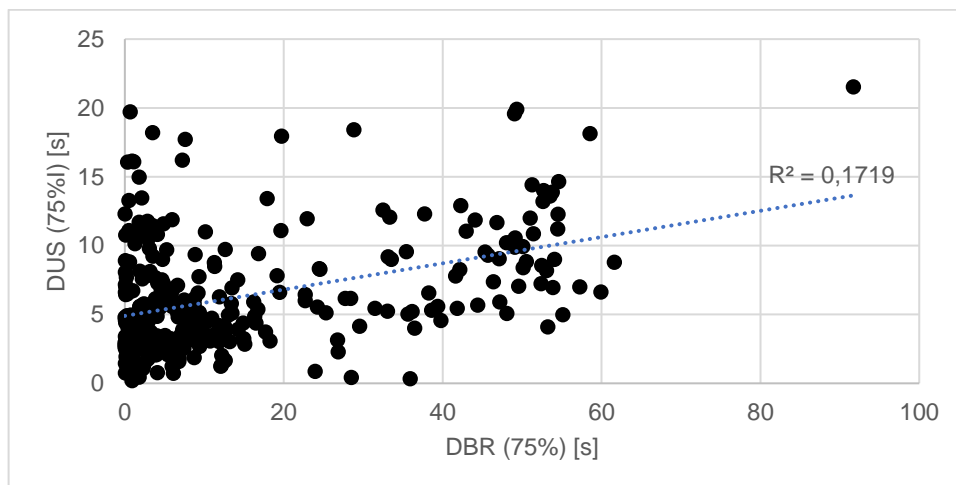


Figura 39. Correlación entre DBR(75%) y DSR(5-75%)

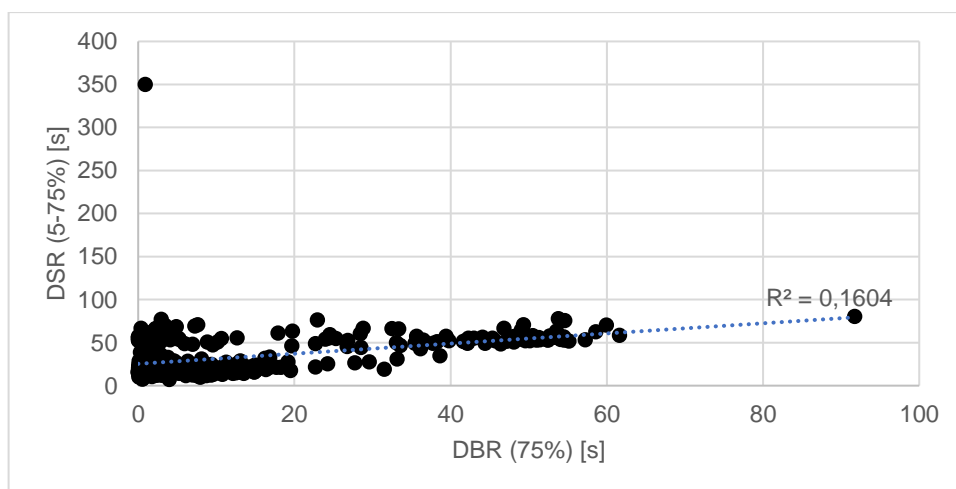


Figura 40. Correlación entre DBR (75%) y DSR (5-95%)

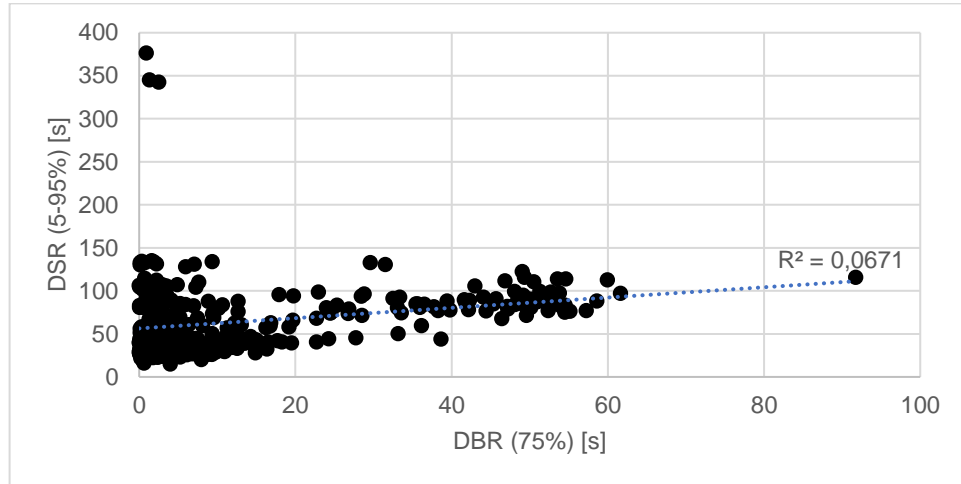


Figura 41. Correlación entre DUA(0.05g) y DUA(0.1g)

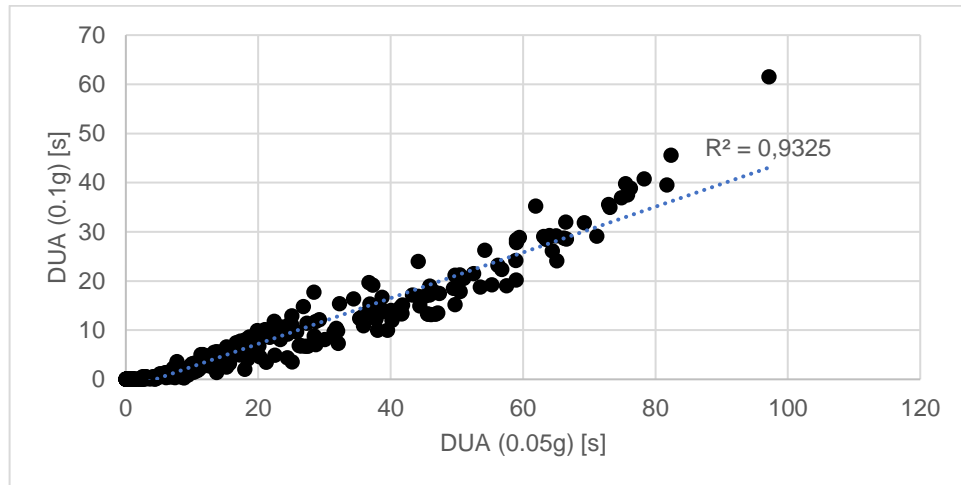


Figura 42. Correlación entre DUA(0.05g) y DUS(75%I)

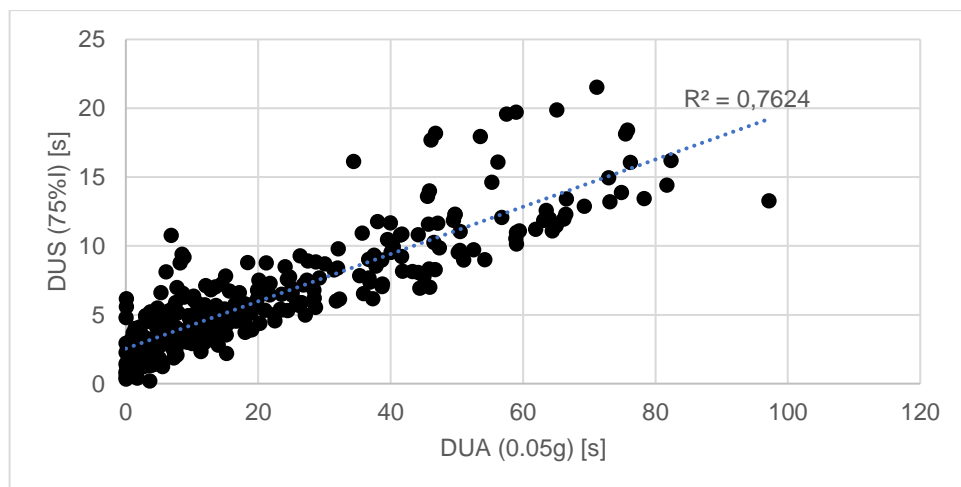


Figura 43. Correlación entre DUA (0.05g) y DSR (5-75%)

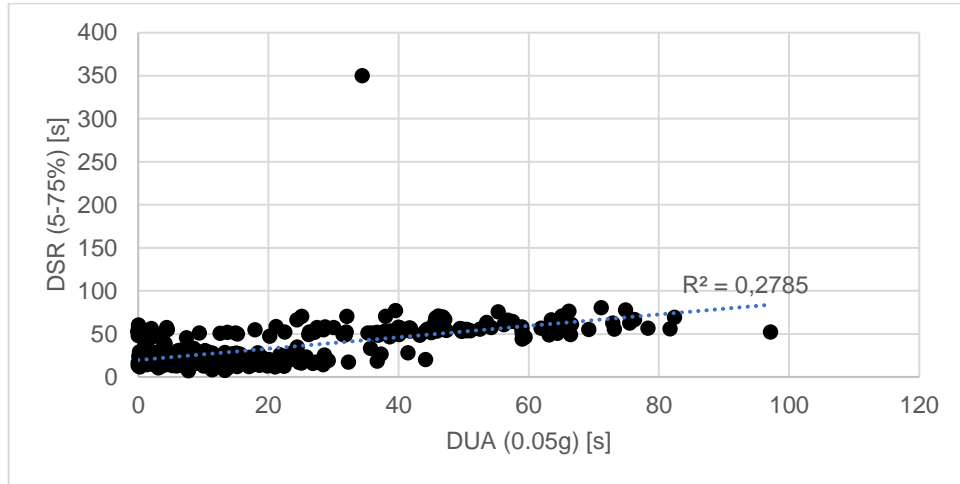


Figura 44. Correlación entre DUA(0.05g) y DSR(5-95%)

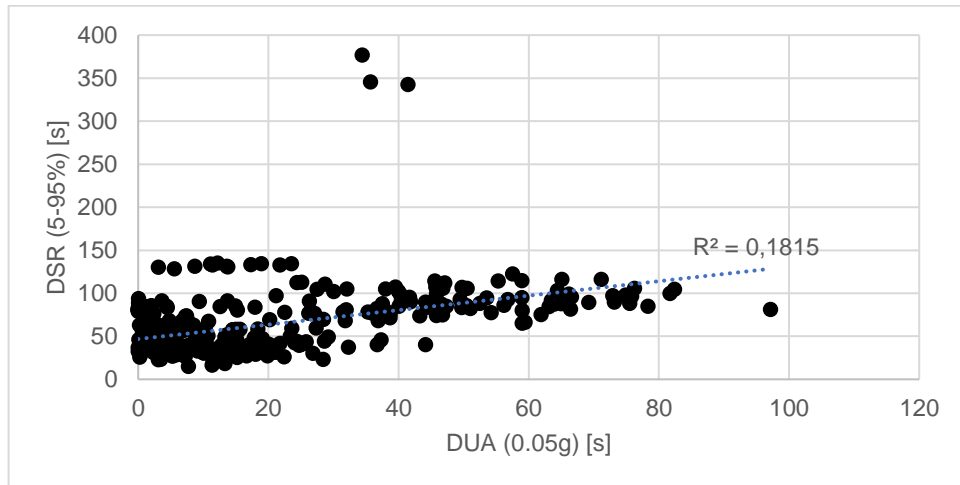


Figura 45. Correlación entre DUA(0.1g) y DUS(75%I)

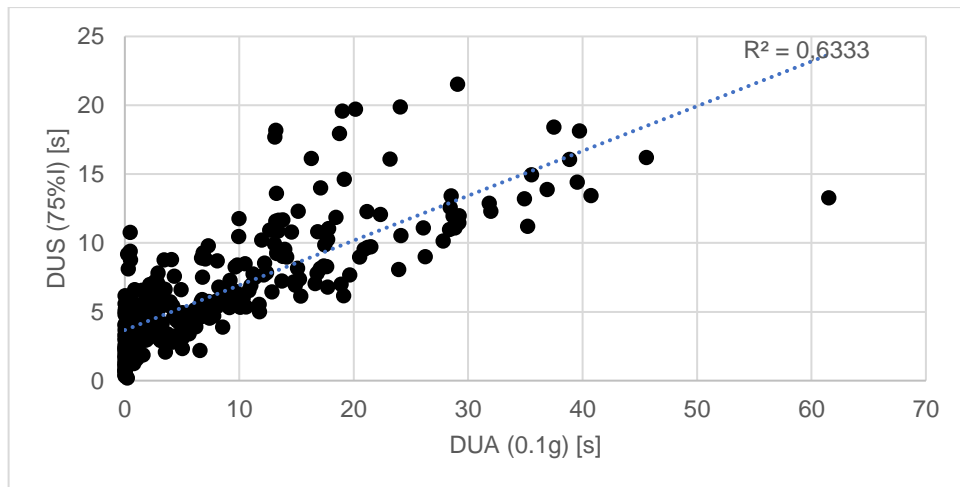


Figura 46. Correlación entre DUA (0.1g) y DSR (5-75%)

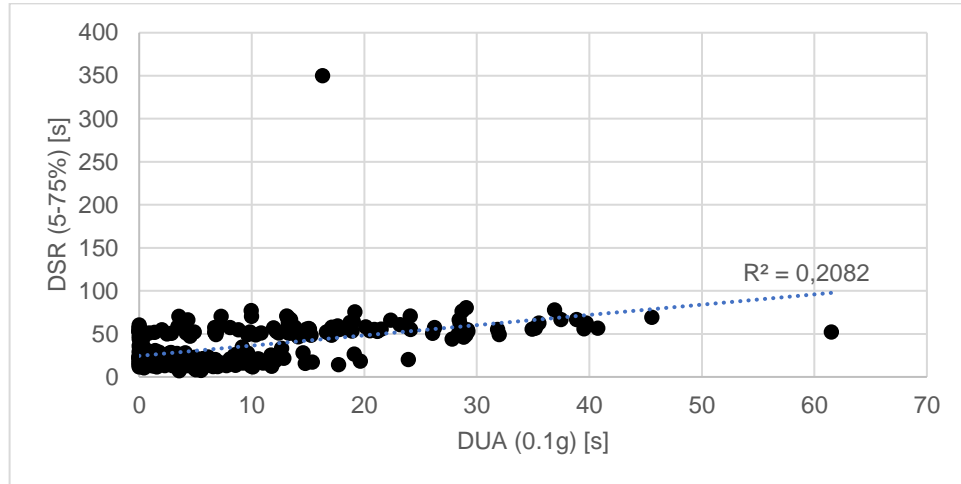


Figura 47. Correlación entre DUA(0.1g) y DSR(5-95%)

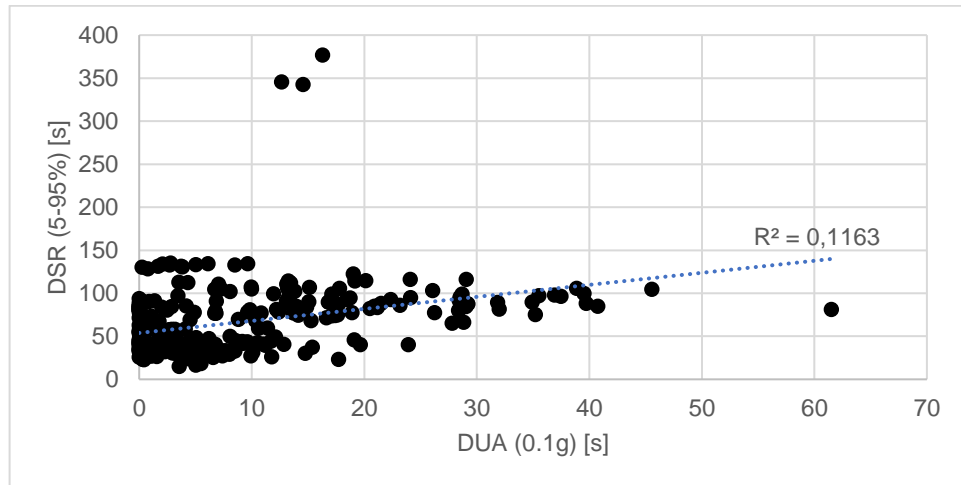


Figura 48. Correlación entre DUS(75%I) y DSR(5-75%)

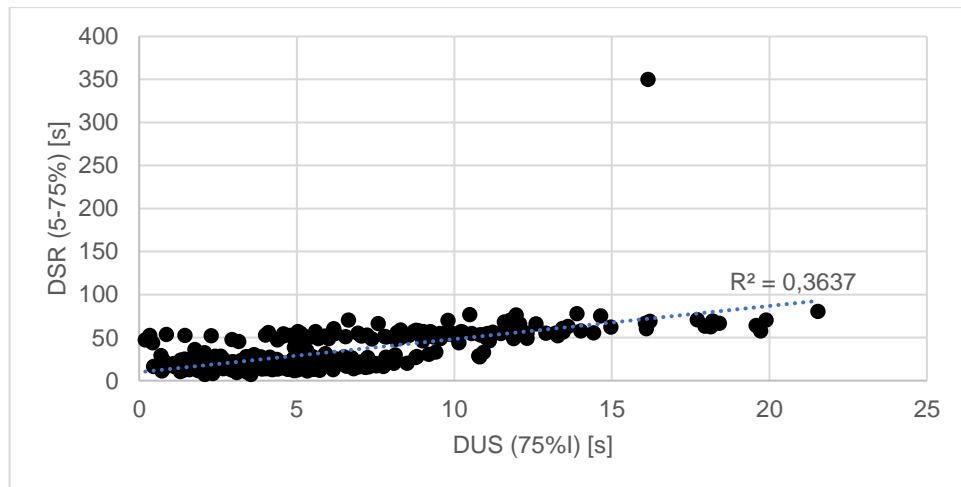


Figura 49. Correlación entre DUS (75%I) y DSR (5-95%)

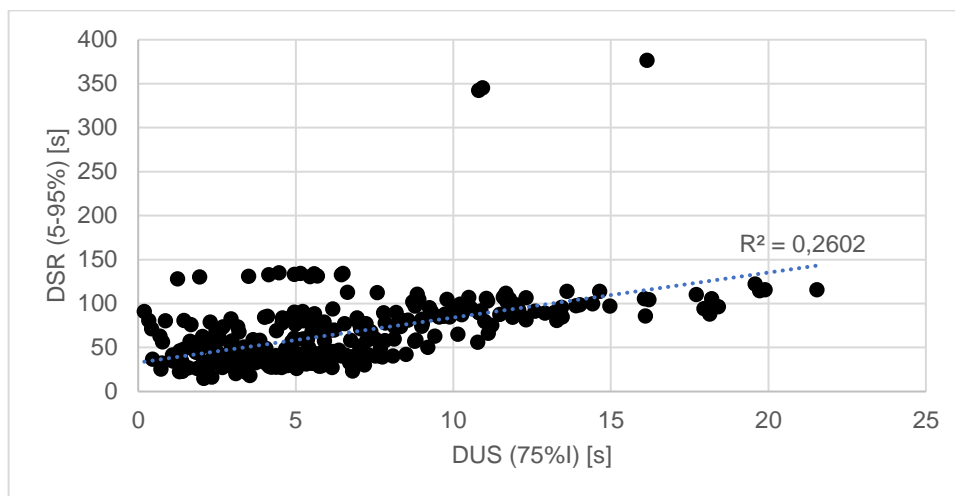


Figura 50. Correlación entre DSR(5-75%) y DSR(5-95%)

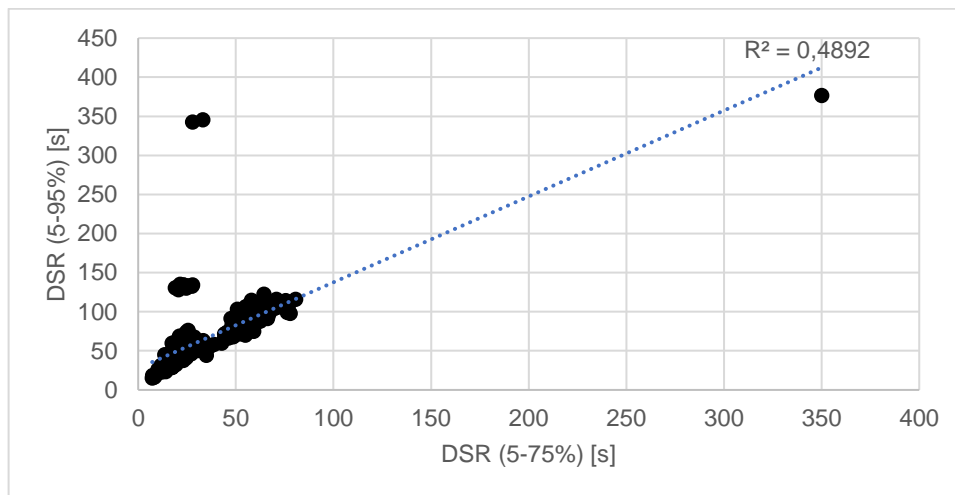


Tabla 11. Coeficiente de correlación entre definiciones duración

	<b>D<sub>BA</sub></b> <b>(0.05 g)</b>	<b>D<sub>BA</sub></b> <b>(0.1 g)</b>	<b>D<sub>BR</sub></b> <b>(20%)</b>	<b>D<sub>BR</sub></b> <b>(75%)</b>	<b>D<sub>UA</sub></b> <b>(0.05 g)</b>	<b>D<sub>UA</sub></b> <b>(0.1 g)</b>	<b>D<sub>US</sub></b> <b>(75%I)</b>	<b>D<sub>SR</sub></b> <b>(5-75%)</b>	<b>D<sub>SR</sub></b> <b>(5-95%)</b>
<b>D<sub>BA</sub></b> <b>(0.05 g)</b>	1.000	0.797	0.375	0.131	0.566	0.446	0.502	0.385	0.634
<b>D<sub>BA</sub></b> <b>(0.1 g)</b>	0.797	1.000	0.337	0.121	0.627	0.512	0.564	0.491	0.545
<b>D<sub>BR</sub></b> <b>(20%)</b>	0.375	0.337	1.000	0.225	0.217	0.133	0.263	0.240	0.414

	<b>D<sub>BA</sub></b> <b>(0.05 g)</b>	<b>D<sub>BA</sub></b> <b>(0.1 g)</b>	<b>D<sub>BR</sub></b> <b>(20%)</b>	<b>D<sub>BR</sub></b> <b>(75%)</b>	<b>D<sub>UA</sub></b> <b>(0.05 g)</b>	<b>D<sub>UA</sub></b> <b>(0.1 g)</b>	<b>D<sub>US</sub></b> <b>(75%I)</b>	<b>D<sub>SR</sub></b> <b>(5-75%)</b>	<b>D<sub>SR</sub></b> <b>(5-95%)</b>
<b>D<sub>BR</sub></b> <b>(75%)</b>	0.131	0.121	0.225	1.000	0.193	0.131	0.172	0.160	0.067
<b>D<sub>UA</sub></b> <b>(0.05 g)</b>	0.566	0.627	0.217	0.193	1.000	0.933	0.762	0.279	0.182
<b>D<sub>UA</sub></b> <b>(0.1 g)</b>	0.446	0.512	0.133	0.131	0.933	1.000	0.633	0.208	0.116
<b>D<sub>US</sub></b> <b>(75%I)</b>	0.502	0.564	0.263	0.172	0.762	0.633	1.000	0.364	0.260
<b>D<sub>SR</sub></b> <b>(5-75%)</b>	0.385	0.491	0.240	0.160	0.279	0.208	0.364	1.000	0.489
<b>D<sub>SR</sub></b> <b>(5-95%)</b>	0.634	0.545	0.414	0.067	0.182	0.116	0.260	0.489	1.000

La duración entre intervalos, para umbrales de aceleración absolutos (0.05g y 0.1g) presenta un coeficiente de correlación moderado con el resto de definiciones de duración. En el caso de la correlación entre sí de valores de duración entre intervalos para los umbrales absolutos definidos, se obtiene un alto coeficiente de correlación; que demuestra que podrían unificarse valores obtenidos por este método para diferentes umbrales a un solo umbral de aceleración, de forma directa.

La duración entre intervalos, para umbrales de aceleración relativos (20% y 75%) presenta un bajo coeficiente de correlación con el resto de definiciones de duración, incluso cuando se correlacionan entre sí valores de duración entre intervalos para los umbrales relativos definidos ( $R^2=0.217$ ). En el caso de la correlación entre valores de duración entre intervalos para un umbral del 20% y valores de duración significativa (5-75%), se obtiene un coeficiente de correlación moderado.

La duración uniforme, para umbrales de aceleración absolutos (0.05g y 0.1g) presenta un coeficiente de correlación moderado con el resto de duraciones basadas en umbrales

absolutos, y un bajo coeficiente de correlación con las definiciones basadas en umbrales relativos. En el caso de la correlación entre sí de valores de duración uniforme para los umbrales absolutos definidos, se obtiene un alto coeficiente de correlación; que demuestra que podrían unificarse valores obtenidos por este método para diferentes umbrales a un solo umbral de aceleración, de forma directa.

La duración significativa, para umbrales de aceleración relativos (5-75% y 5-95%) presenta un coeficiente de correlación moderado con el resto de definiciones de duración, incluso cuando se correlacionan entre sí valores de duración significativa para los umbrales relativos definidos ( $R^2=0.494$ ). En el caso de la correlación entre valores de duración significativa y valores de duración uniforme, se obtiene un bajo coeficiente de correlación.

#### **4.3.3. Correlación entre duración y número de ciclos**

La correlación entre los valores de duración y número de ciclos para cada registro se realiza con el fin de verificar hasta qué punto un parámetro puede ponerse en función de otro y determinar las características del movimiento sísmico que intervienen en la dispersión de dicha correlación. Se ha demostrado que las correlaciones entre diferentes definiciones de duración y número de ciclos son a menudo muy pobres, y está claro que, en el mejor de los casos, los siguientes análisis podrían encontrar correlaciones entre algunas definiciones específicas de los dos parámetros (*Bommer, et al., 2006*). A continuación, se presentan los resultados obtenidos para cada combinación.

Figura 51. Correlación entre DBA (0.05g) y NPA (0.05g)

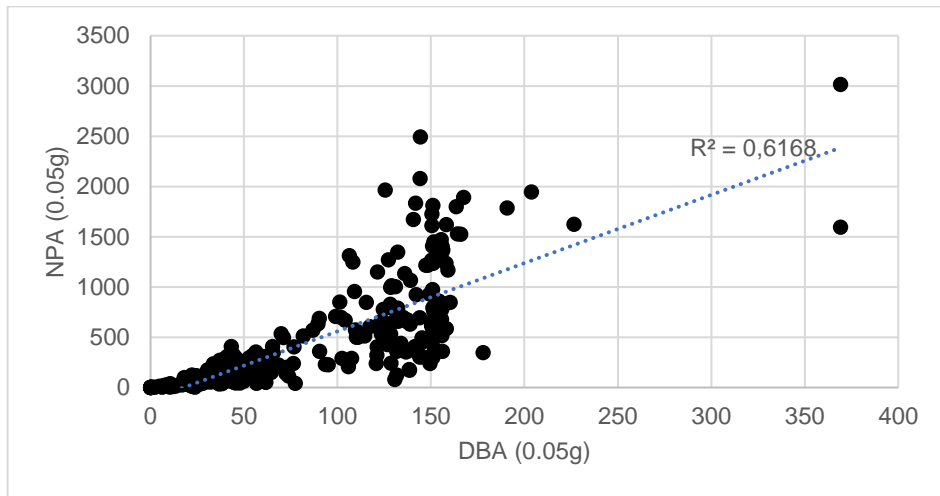
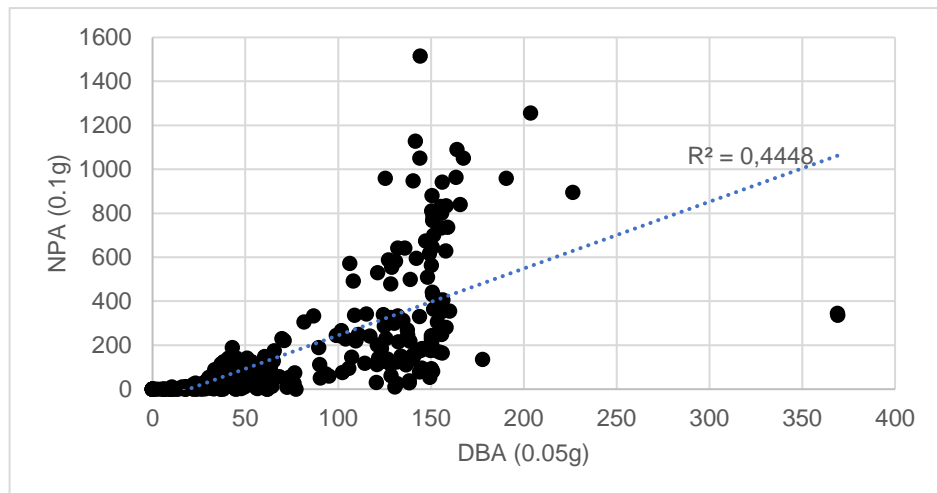


Figura 52. Correlación entre DBA (0.05g) y NPA(0.1g)



La duración entre intervalos y el número de ciclos para umbrales absolutos tienen una correlación media entre sí, como es de esperarse la correlación más alta se da entre las definiciones que toman el mismo umbral de aceleración absoluto. A pesar de que se tienen en cuenta los mismos periodos para el cálculo de los parámetros, se observa una dispersión alta, ocasionada por las diferencias en el contenido frecuencial y la clasificación de sitio de cada dato.

Figura 53. Correlación entre DBA (0.05g) y NPR(20%)

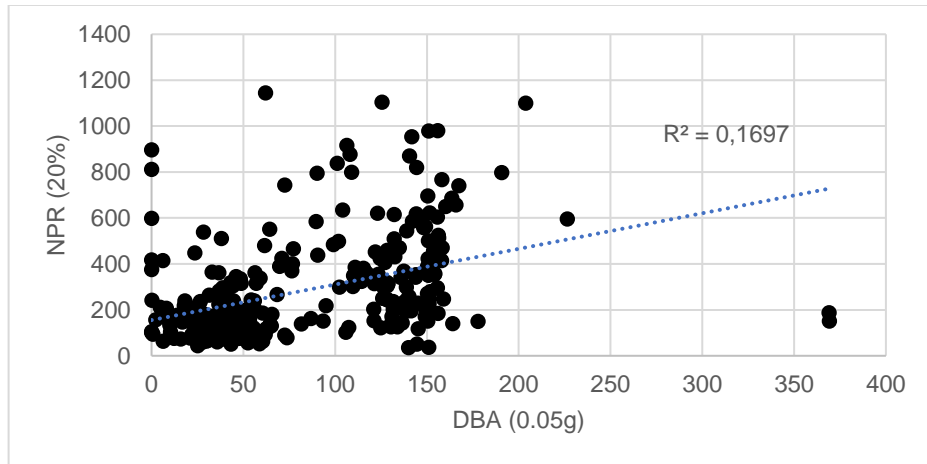


Figura 54. Correlación entre DBA (0.05g) y NPR(60%)

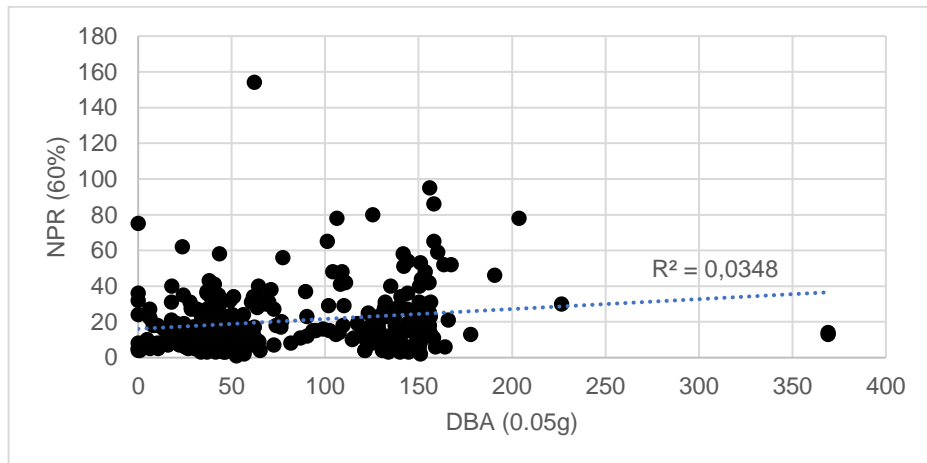


Figura 55. Correlación entre DBA (0.1g) y NPA(0.05g)

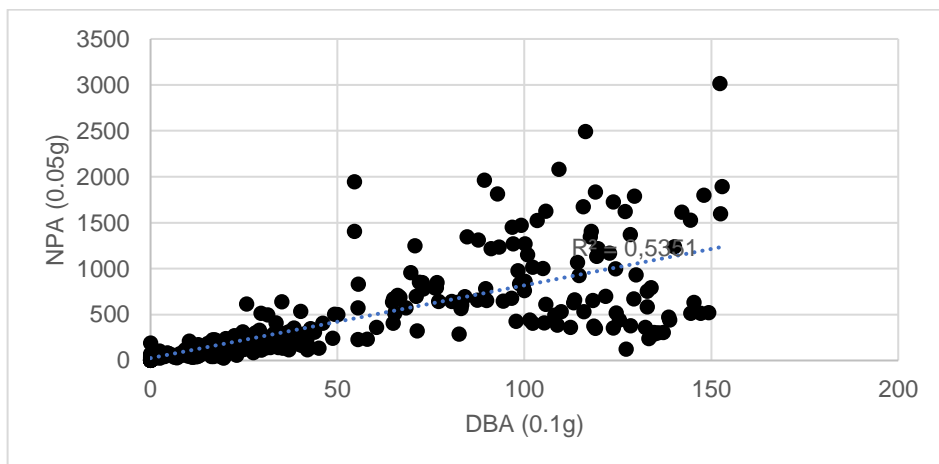


Figura 56. Correlación entre DBA (0.1g) y NPA(0.1g)

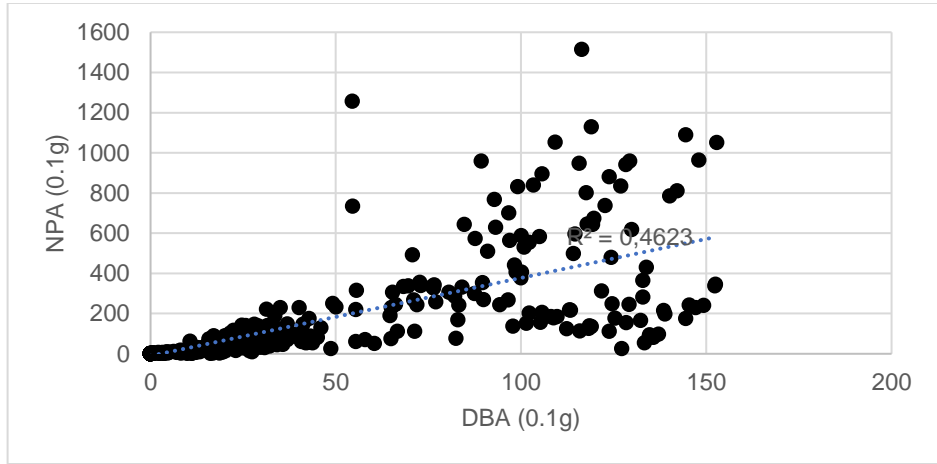


Figura 57. Correlación entre DBA(0.1g) y NPR(20%)

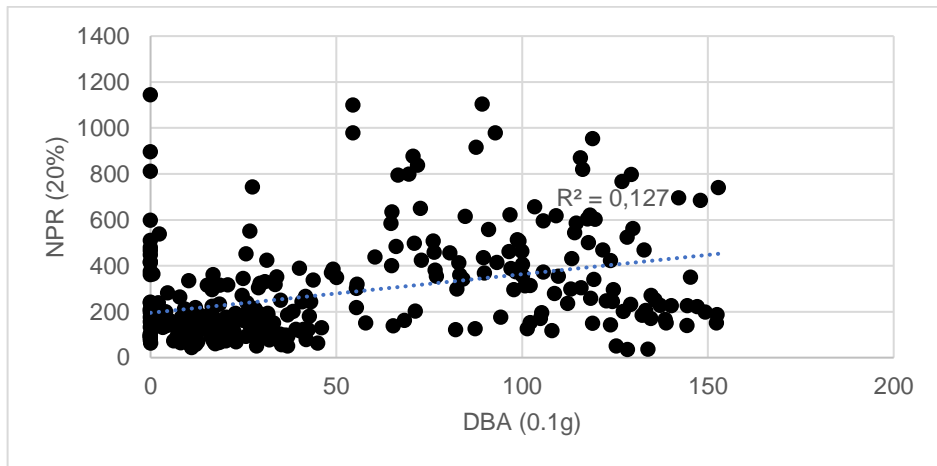


Figura 58. Correlación entre DBA(0.1g) y NPR(60%)

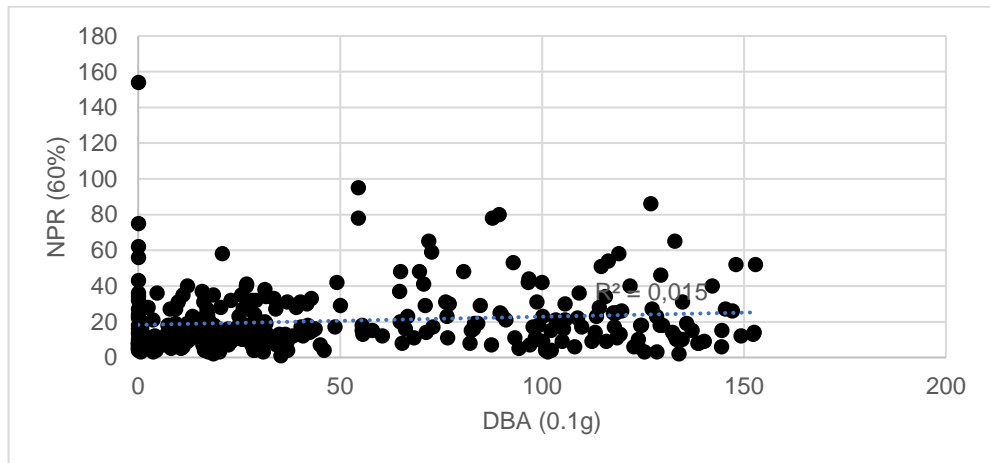


Figura 59. Correlación entre DBR(20%) y NPA(0.05g)

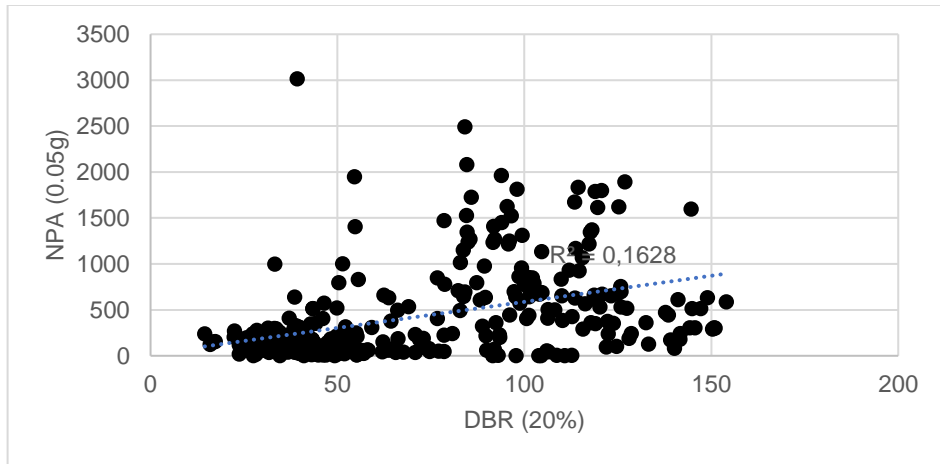


Figura 60. Correlación entre DBR(20%) y NPA(0.1g)

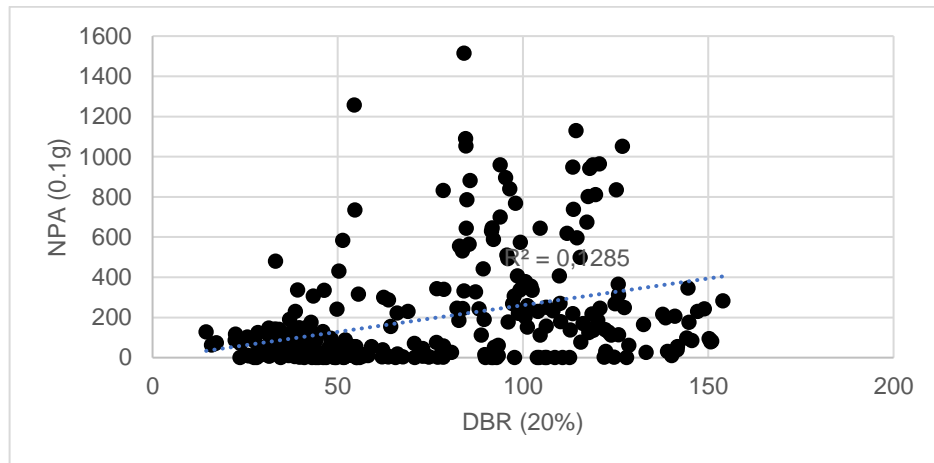


Figura 61. Correlación entre DBR(20%) y NPR(20%)

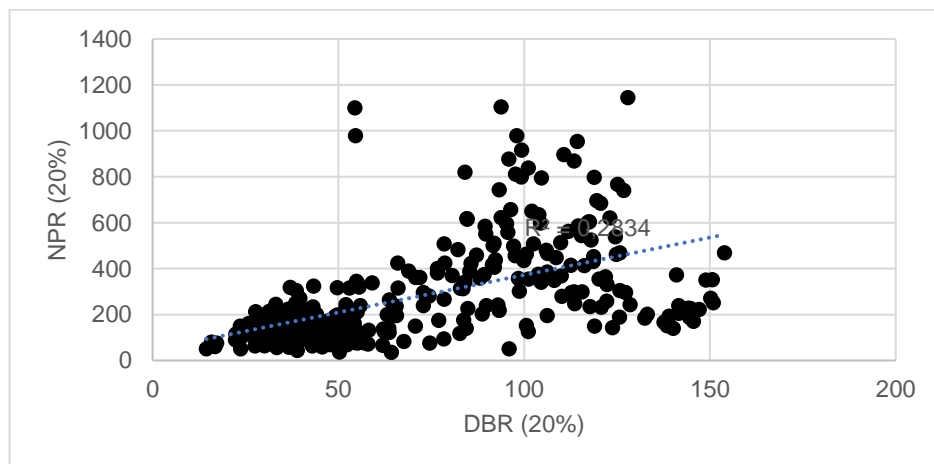


Figura 62. Correlación entre DBR(20%) y NPR(60%)

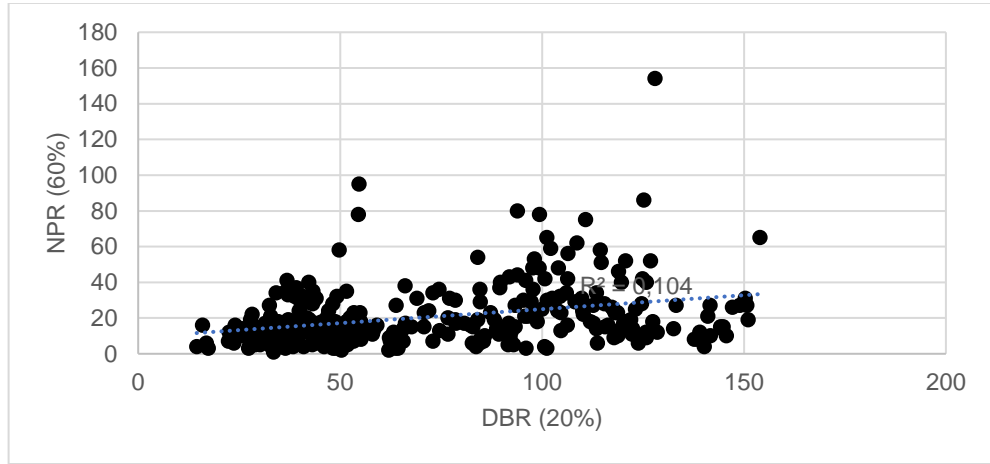


Figura 63. Correlación entre DBR(75%) y NPA(0.05g)

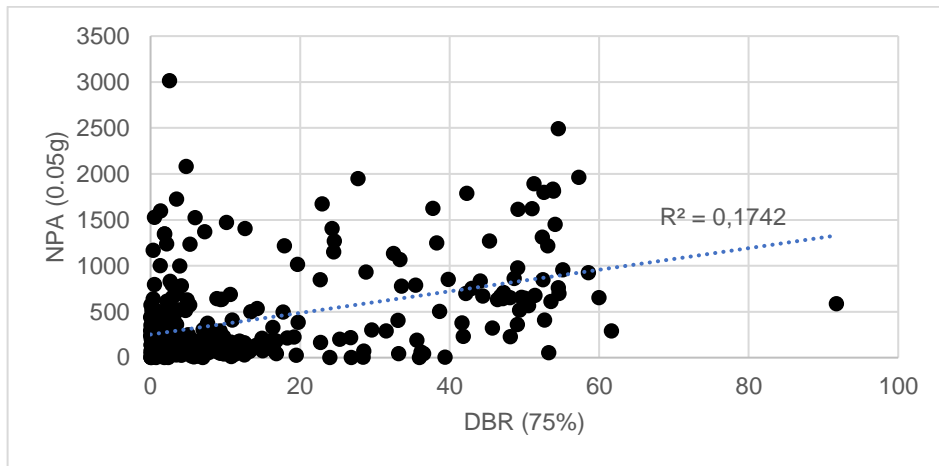


Figura 64. Correlación entre DBR(75%) y NPA(0.1g)

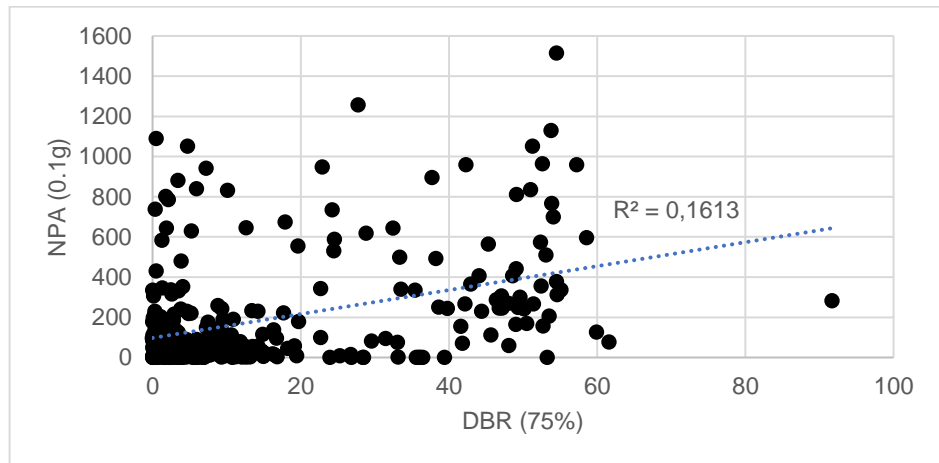


Figura 65. Correlación entre DBR(75%) y NPR(20%)

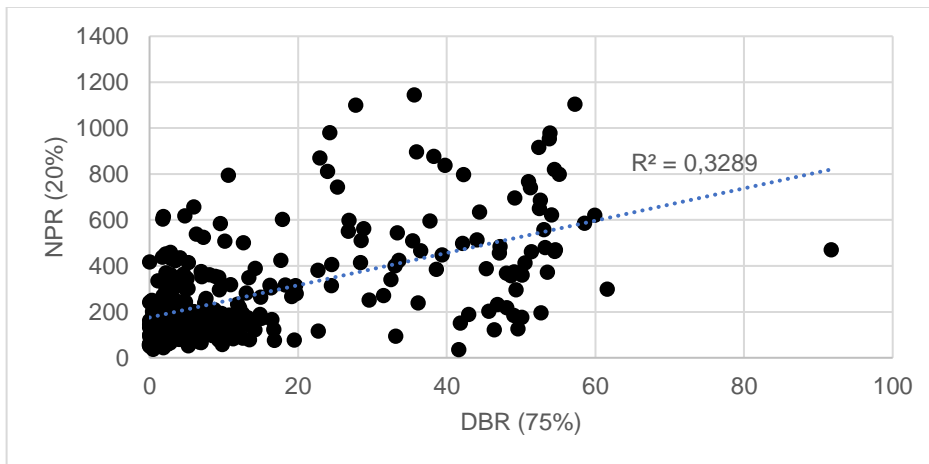


Figura 66. Correlación entre DBR (75%) y NPR(60%)

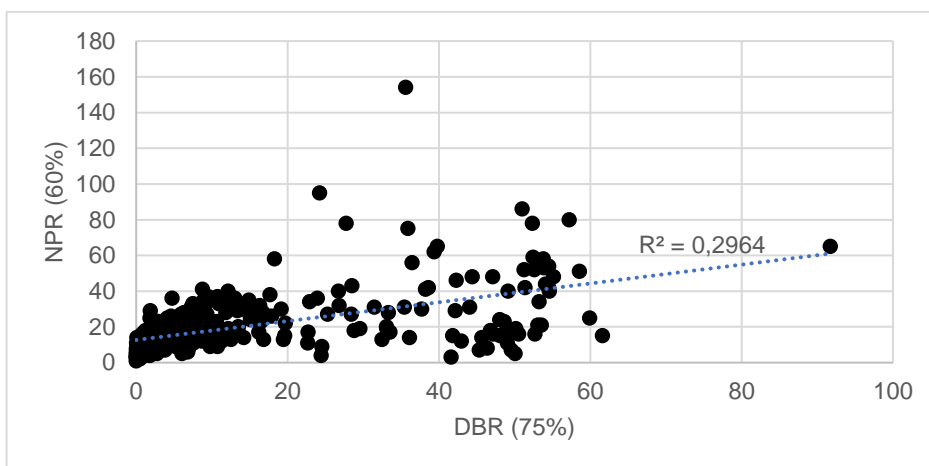


Figura 67. Correlación entre DUA (0.05g) y NPA(0.05g)

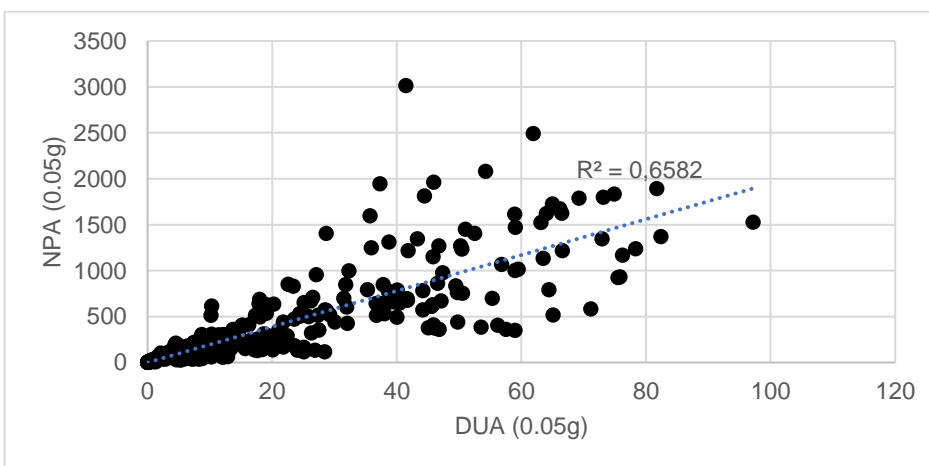


Figura 68. Correlación entre DUA (0.05g) y NPA(0.1g)

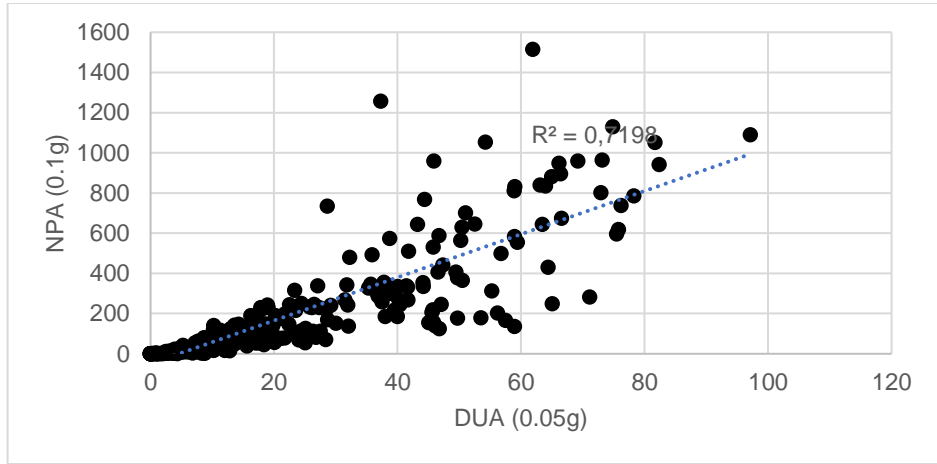


Figura 69. Correlación entre DUA(0.05g) y NPR(20%)

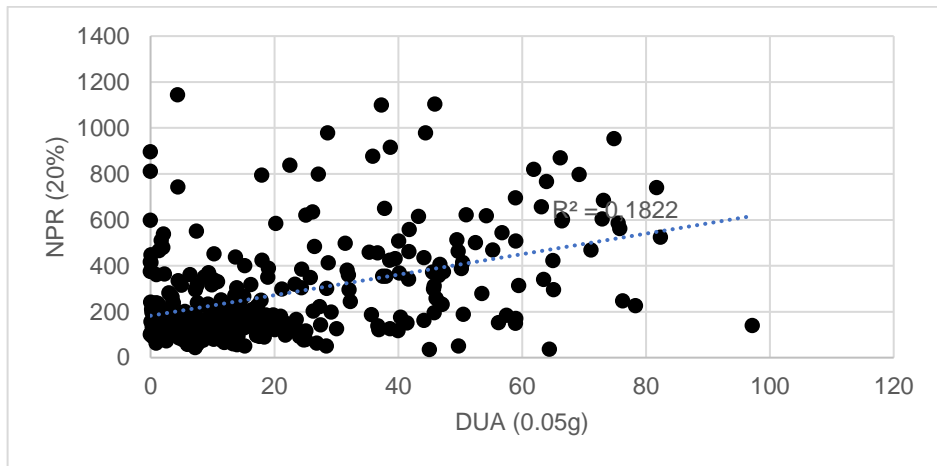


Figura 70. Correlación entre DUA (0.05g) y NPR(60%)

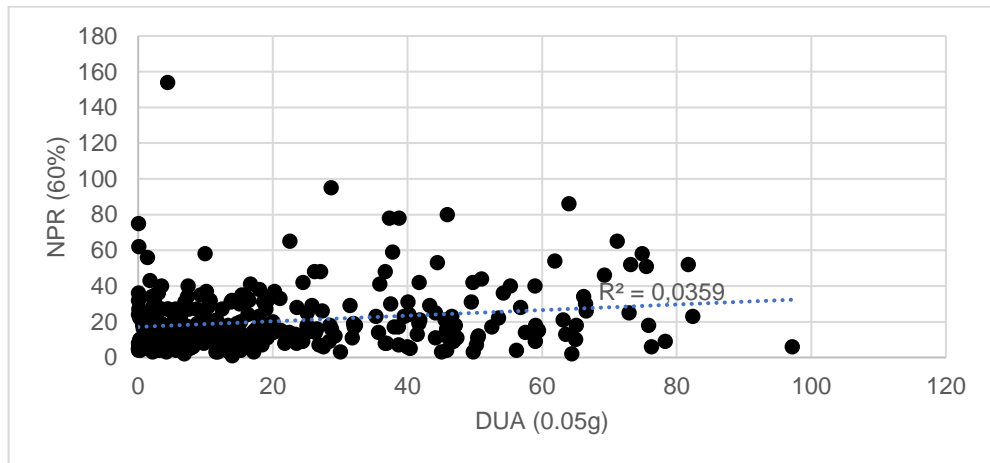


Figura 71. Correlación entre DUA (0.1g) y NPA(0.05g)

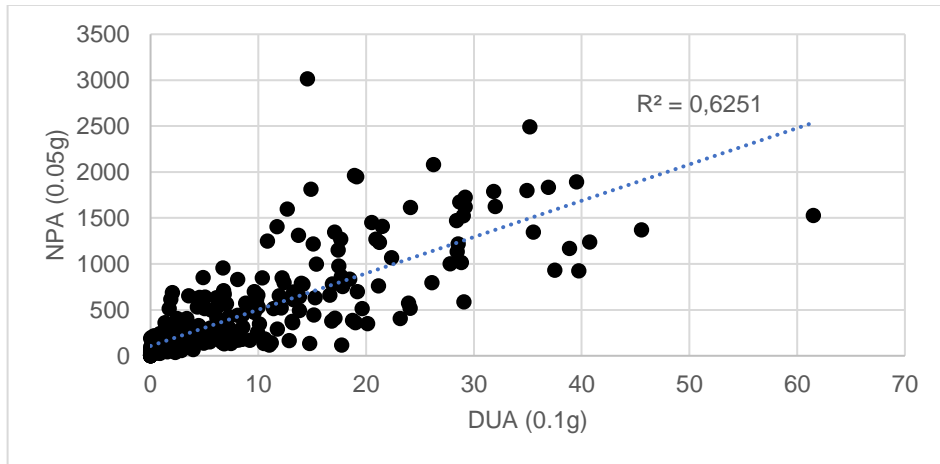


Figura 72. Correlación entre DUA(0.1g) y NPA(0.1g)

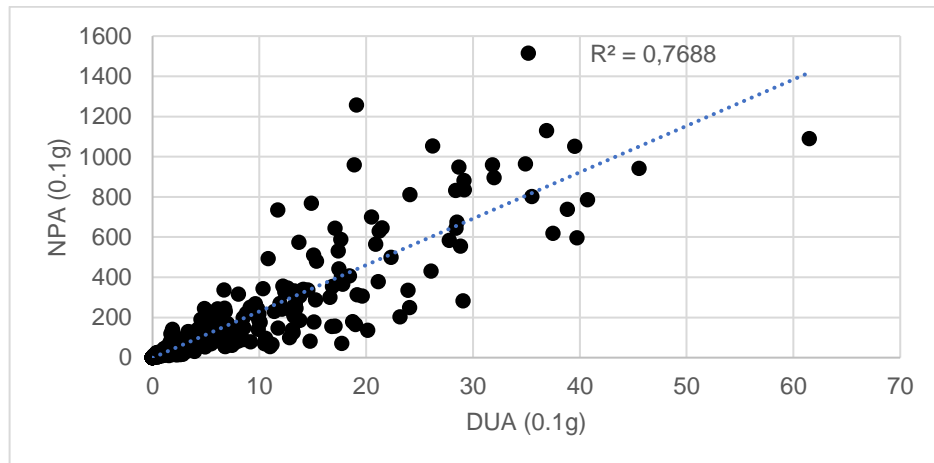


Figura 73. Correlación entre DUA (0.1g) y NPR(20%)

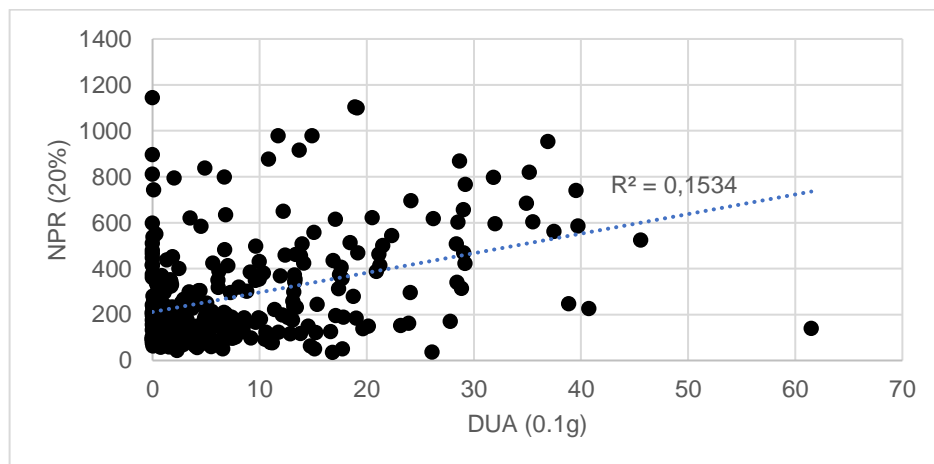


Figura 74. Correlación entre DUA (0.1g) y NPR(60%)

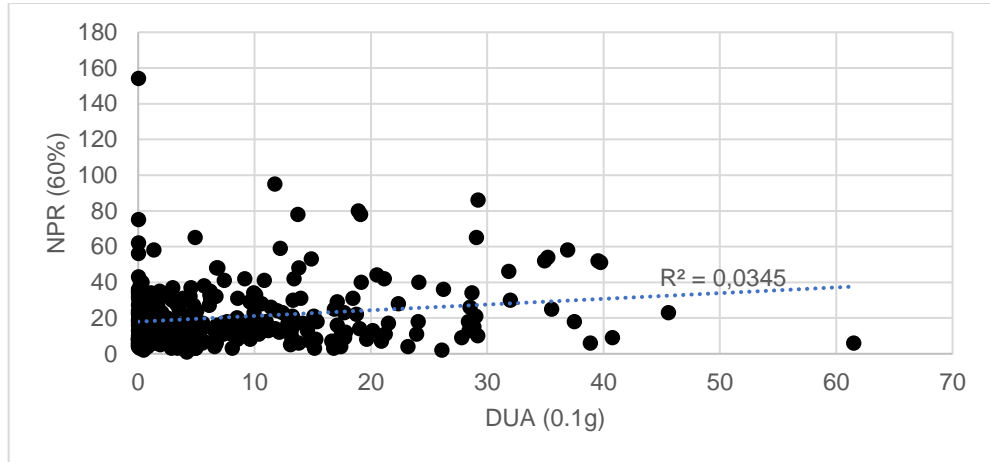


Figura 75. Correlación entre DUS y NPA(0.05g)

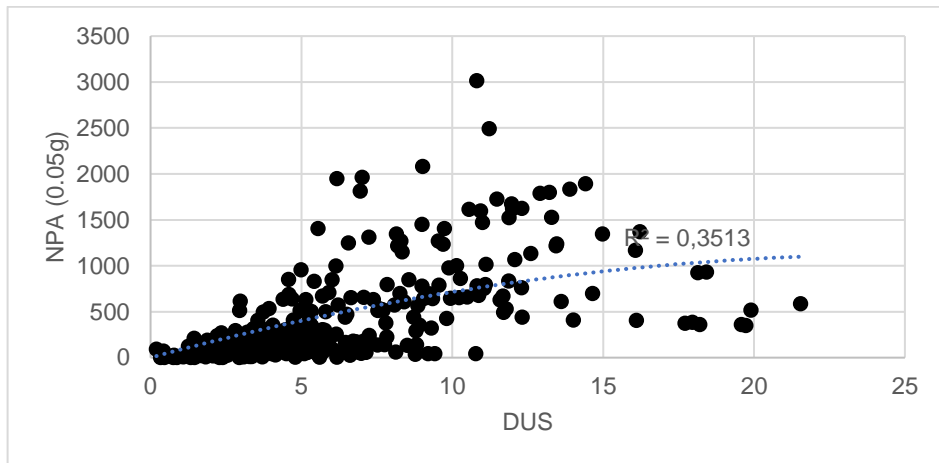


Figura 76. Correlación entre DUS y NPA(0.1g)

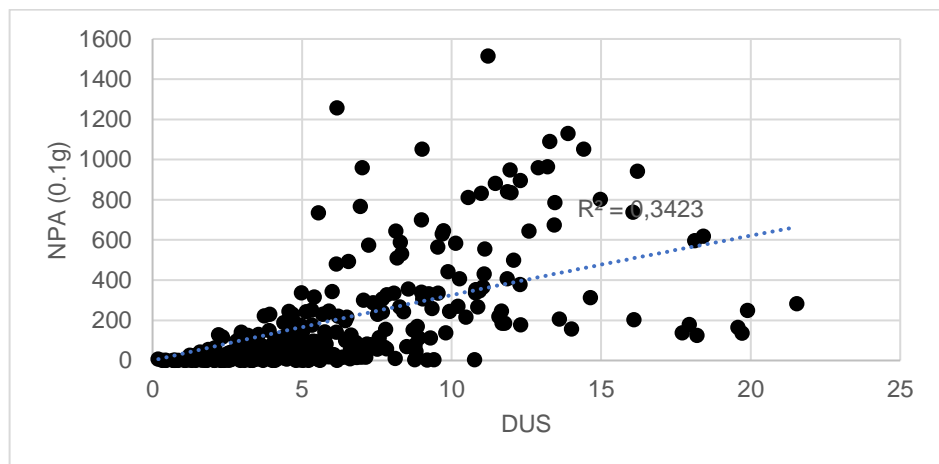


Figura 77. Correlación entre DUS y NPR(20%)

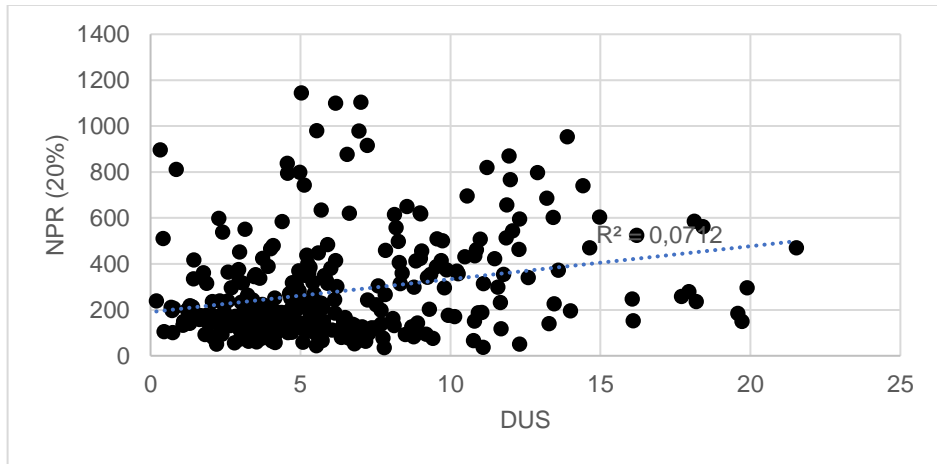


Figura 78. Correlación entre DUS y NPR(60%)

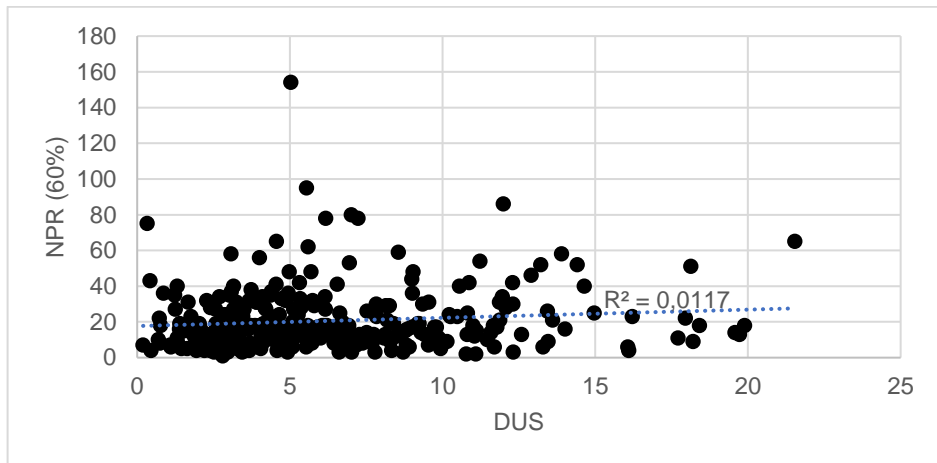


Figura 79. Correlación entre DSR(5-75%) y NPA(0.05g)

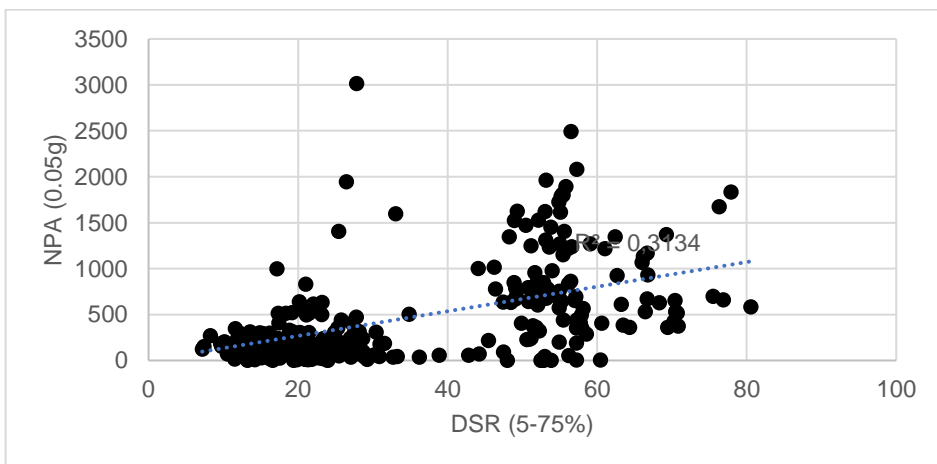


Figura 80. Correlación entre DSR(5-75%) y NPA(0.1g)

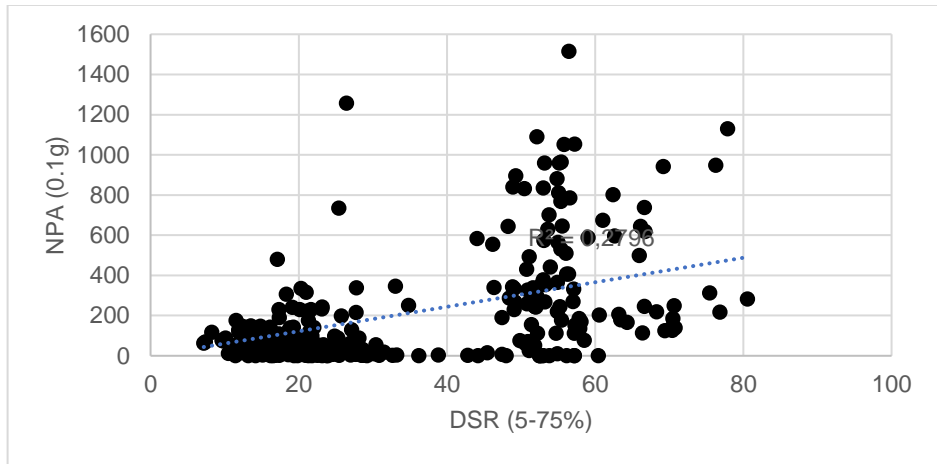


Figura 81. Correlación entre DSR(5-75%) y NPR(20%)

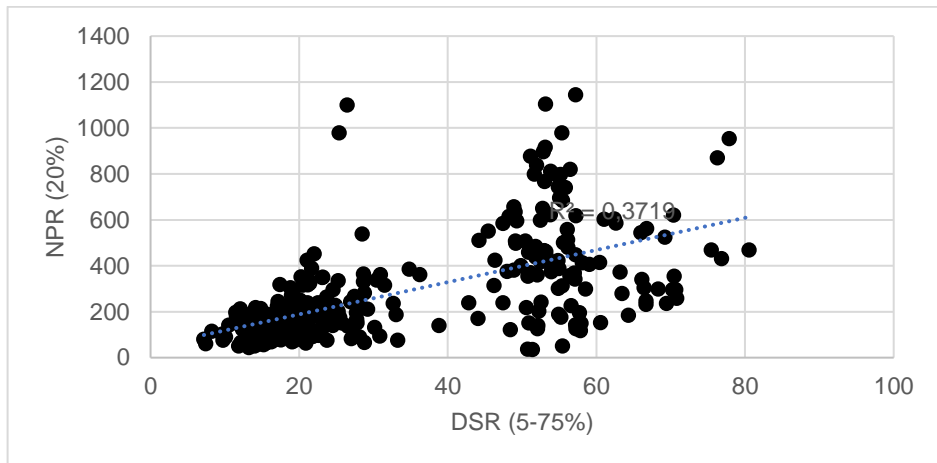


Figura 82. Correlación entre DSR(5-75%) y NPR(60%)

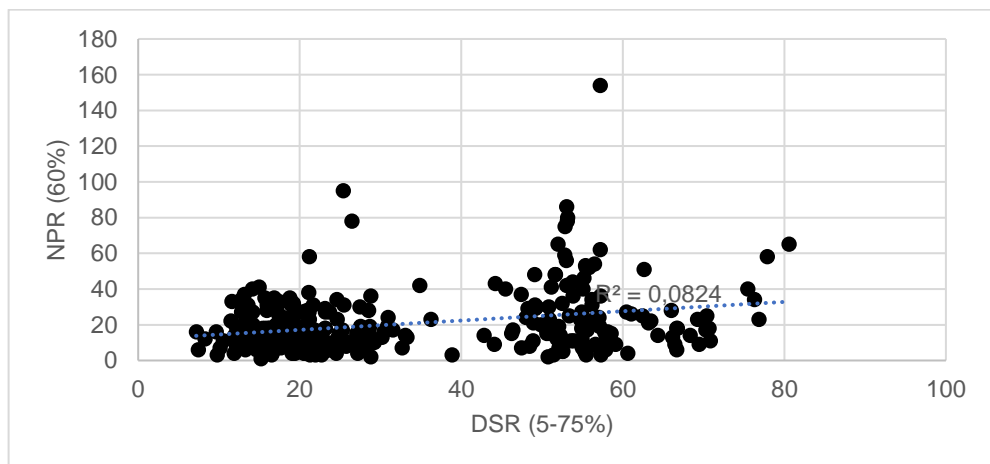


Figura 83. Correlación entre DSR(5-95%) y NPA(0.05g)

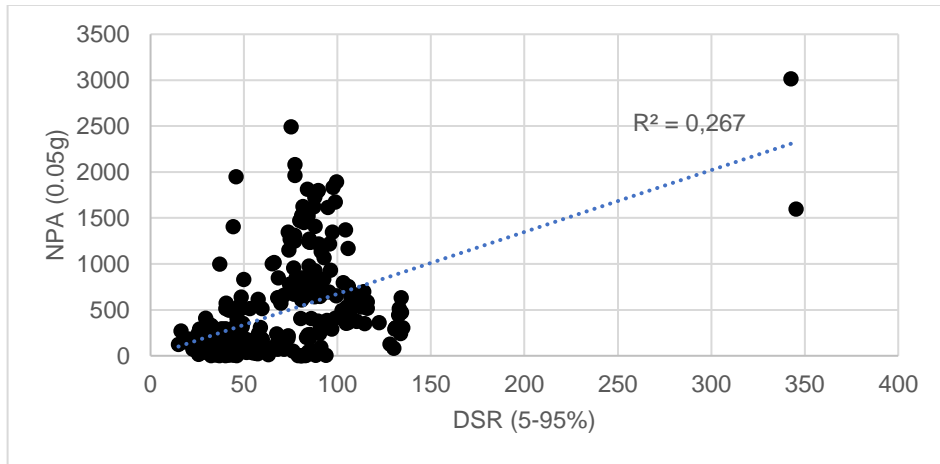


Figura 84. Correlación entre DSR(5-95%) y NPA(0.1g)

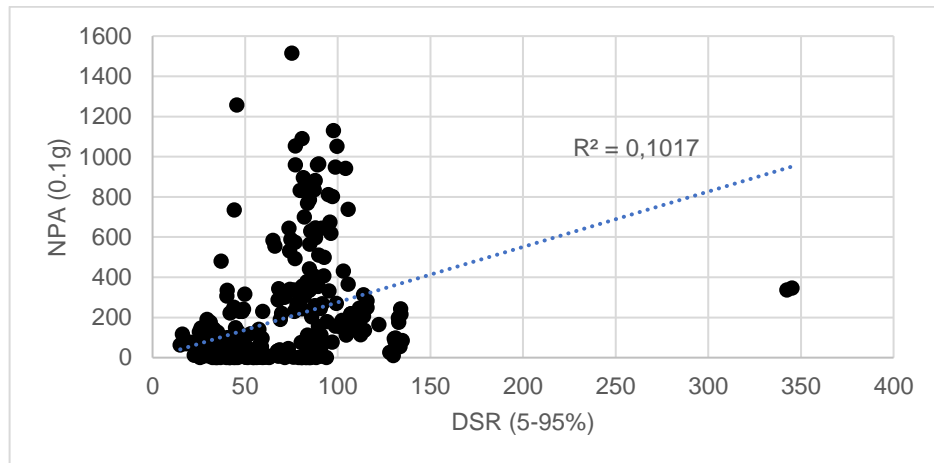


Figura 85. Correlación entre DSR(5-95%) y NPR(20%)

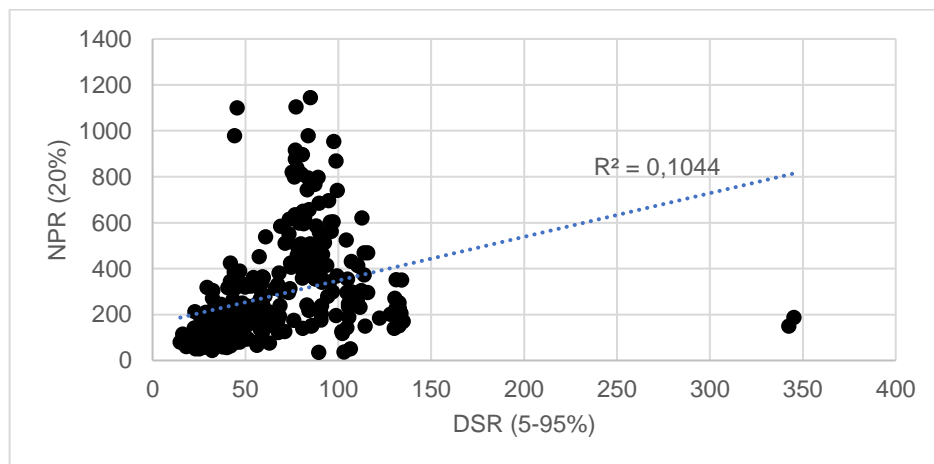


Figura 86. Correlación entre DSR(5-95%) y NPR(60%)

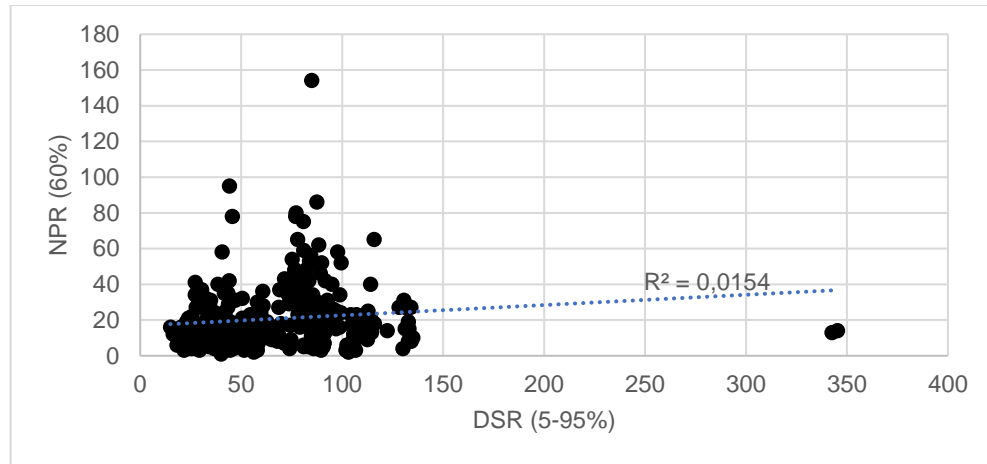


Tabla 12. Coeficiente de correlación entre número de ciclos y duraciones

	NPA (0.05 g)	NPA (0.1 g)	NPR (20%)	NPR (60%)
<b>D<sub>BA</sub> (0.05 g)</b>	0.617	0.445	0.170	0.035
<b>D<sub>BA</sub> (0.1 g)</b>	0.535	0.462	0.127	0.015
<b>D<sub>BR</sub> (20%)</b>	0.163	0.129	0.283	0.104
<b>D<sub>BR</sub> (75%)</b>	0.174	0.161	0.329	0.296
<b>D<sub>UA</sub> (0.05 g)</b>	0.658	0.720	0.182	0.036
<b>D<sub>UA</sub> (0.1 g)</b>	0.625	0.769	0.153	0.035
<b>D<sub>US</sub> (75%I)</b>	0.351	0.342	0.071	0.011
<b>D<sub>SR</sub> (5-75%)</b>	0.313	0.280	0.372	0.082
<b>D<sub>SR</sub> (5-95%)</b>	0.267	0.102	0.104	0.015

La duración entre intervalos para umbrales absolutos presenta un coeficiente de correlación moderado con el número de ciclos contados a partir de umbrales absolutos, y una correlación casi nula en el caso de umbrales relativos. Por su parte, la duración entre intervalos para umbrales relativos presenta un coeficiente de correlación moderado con el número de ciclos contados a partir de umbrales relativos, y una correlación casi nula en el caso de umbrales absolutos.

La mejor correlación entre definiciones de duración y número de ciclos se da entre la duración uniforme y el número de ciclos, para un umbral absoluto de 0.1 g. Para un umbral de 0.05 g el coeficiente de correlación se reduce aproximadamente en un 50%. En el caso de la duración uniforme y el número de ciclos contados a partir de umbrales relativos la correlación es casi nula.

La duración uniforme para el 75% de la intensidad sísmica presenta coeficientes de correlación con el número de ciclos menores a los obtenidos para umbrales de aceleración absolutos. La correlación de este concepto con el número de ciclos contados a partir de umbrales relativos es casi nula.

El concepto de duración significativa muestra mejores correlaciones para el intervalo de 5 a 75% de la integral del cuadrado de la aceleración, siendo los coeficientes de correlación moderados para umbrales absolutos, y bajos para umbrales relativos.

Los resultados obtenidos sugieren que la inclusión del contenido frecuencial podría mejorar el coeficiente de correlación, en los casos en los que se obtuvieron correlaciones moderadas.

## 5. INFLUENCIA DE LA FRECUENCIA EN LA CORRELACIÓN ENTRE DURACIÓN Y NÚMERO DE CICLOS

La dispersión en las correlaciones entre el número efectivo de ciclos y la duración del sismo se debe principalmente a las diferencias en el contenido frecuencial de cada evento. A continuación, se evalúan las correlaciones, involucrando varios conceptos de periodo de un movimiento sísmico, con el fin de verificar con cuales definiciones se pueden mejorar las correlaciones propuestas en el capítulo anterior.

### 5.1. Definiciones de periodo

Se han propuesto varias definiciones para el contenido frecuencial de un movimiento sísmico. Para el presente análisis se tomó en cuenta el periodo espectral promedio y el periodo espectral predominante, propuestos por (Rathje, et al., 2014), y el periodo dominante en el intervalo, propuesto por (Bommer, et al., 2006).

#### 5.1.1. Periodo espectral promedio

El periodo espectral promedio,  $T_{avg}$ , se calcula a partir del espectro de respuesta de aceleración, así:

$$T_{avg} = \frac{\sum_i T_i \left( \frac{S_g(T_i)}{PGA} \right)^2}{\sum_i \left( \frac{S_g(T_i)}{PGA} \right)^2} \quad (30)$$

A continuación, se muestran las correlaciones entre las definiciones de duración y número de ciclos que presentaron mejores coeficientes de correlación, separadas para diferentes intervalos de periodo espectral promedio. Los rangos de periodo escogidos corresponden a aquellos en los que se obtiene un mayor coeficiente de correlación.

Figura 87. Correlaciones entre DBA (0.1g) y NPA(0.1g), usando  $T_{avg}$

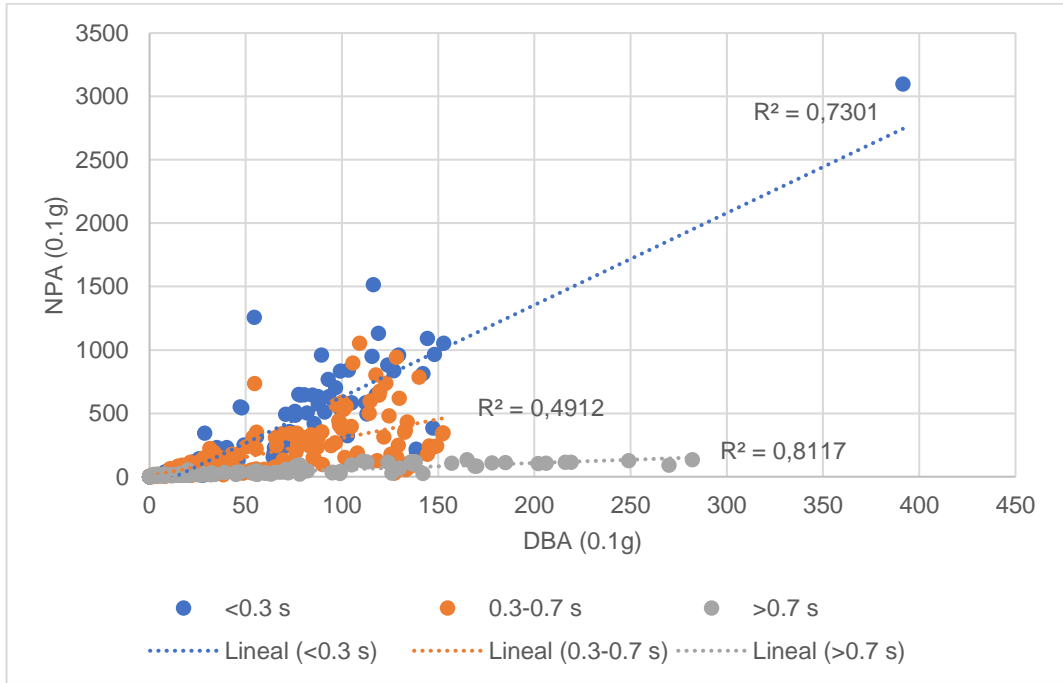


Figura 88. Correlaciones entre DBR(75%) y NPR(60%), usando  $T_{avg}$

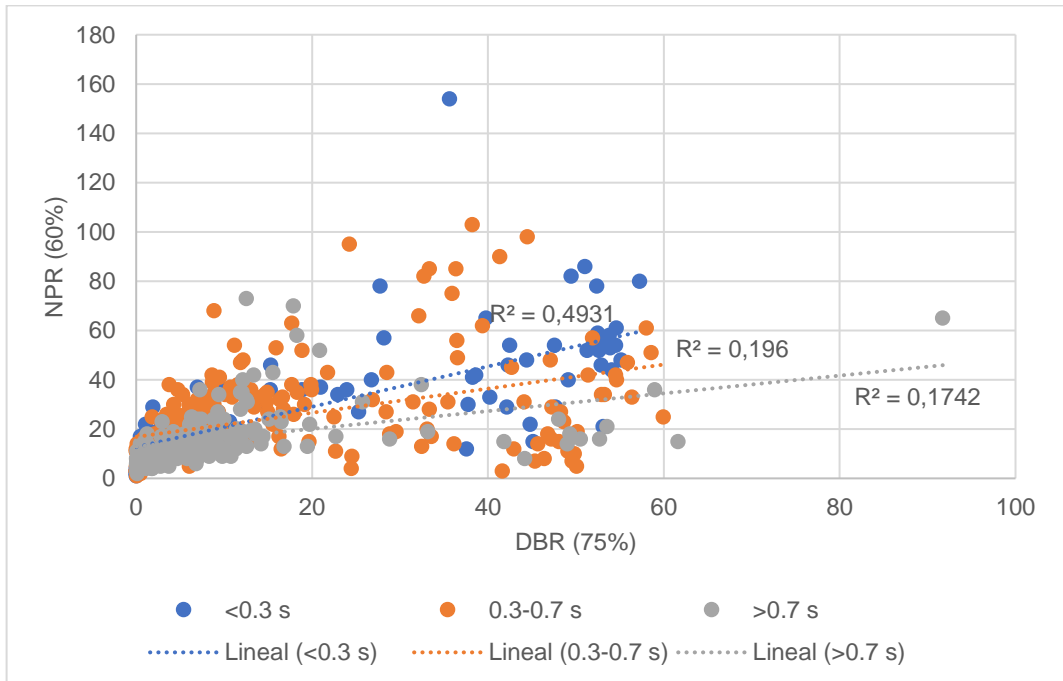


Figura 89. Correlaciones entre DUA(0.1g) y NPA(0.1g), usando  $T_{avg}$

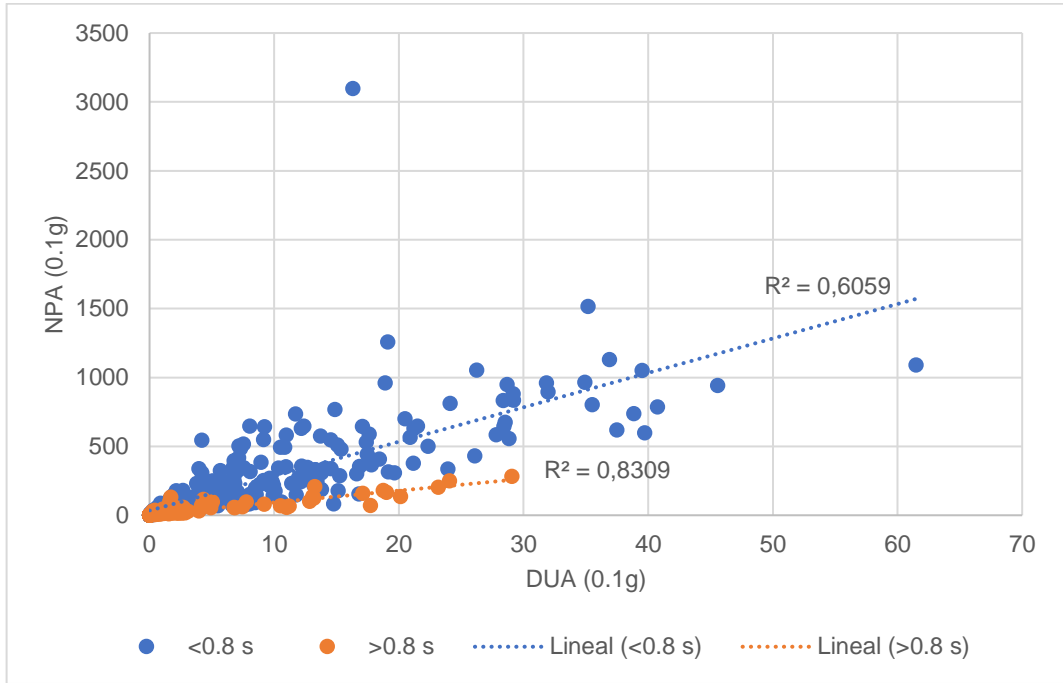


Figura 90. Correlaciones entre DUS(75%) y NPA(0.1g), usando  $T_{avg}$

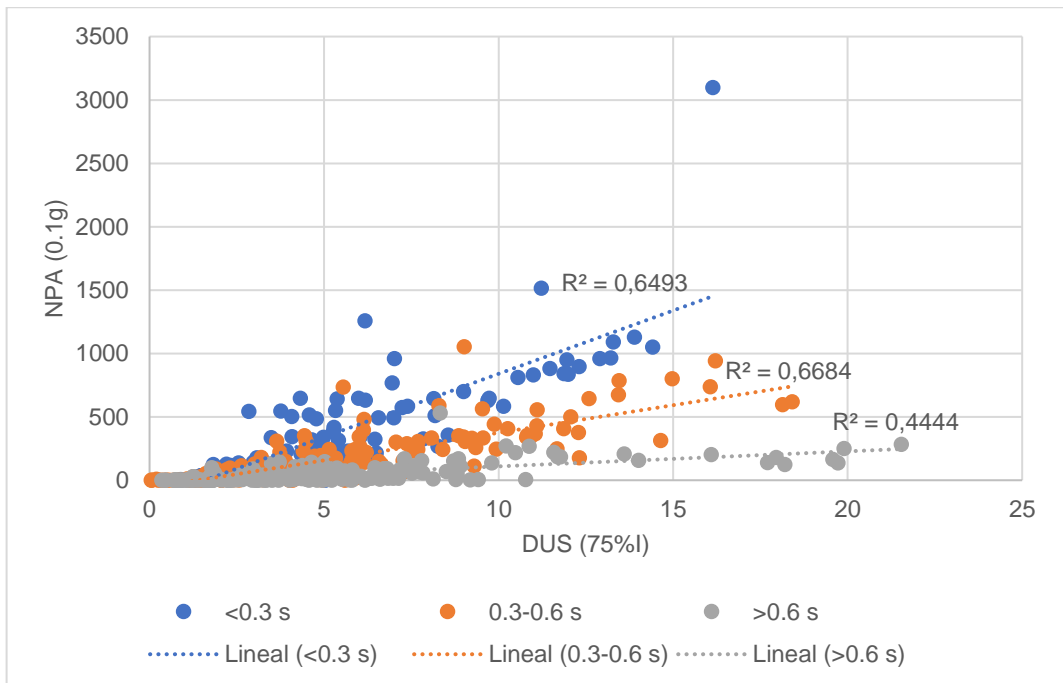
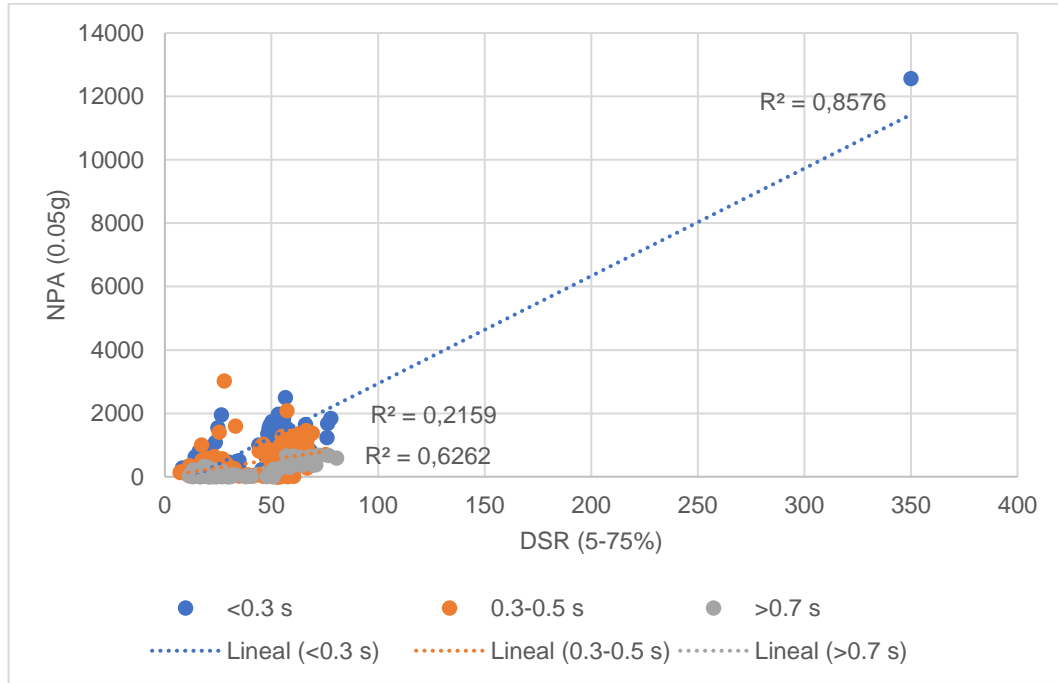


Figura 91. Correlaciones entre DSR(5-75%) y NPA(0.05g), usando  $T_{avg}$



### 5.1.2. Periodo espectral predominante

El periodo espectral predominante suavizado,  $T_0$ , se evalúa utilizando el 5% de amortiguamiento en el espectro de respuesta de aceleración, así:

$$T_0 = \frac{\sum_i T_i \ln \left[ \frac{S_g(T_i)}{PGA} \right]}{\sum_i \ln \left[ \frac{S_g(T_i)}{PGA} \right]} \quad (31)$$

A continuación, se muestran las correlaciones entre las definiciones de duración y número de ciclos que presentaron mejores coeficientes de correlación, separadas para diferentes intervalos de periodo espectral predominante.

Figura 92. Correlaciones entre DBA (0.1g) y NPA(0.1g), usando  $T_0$

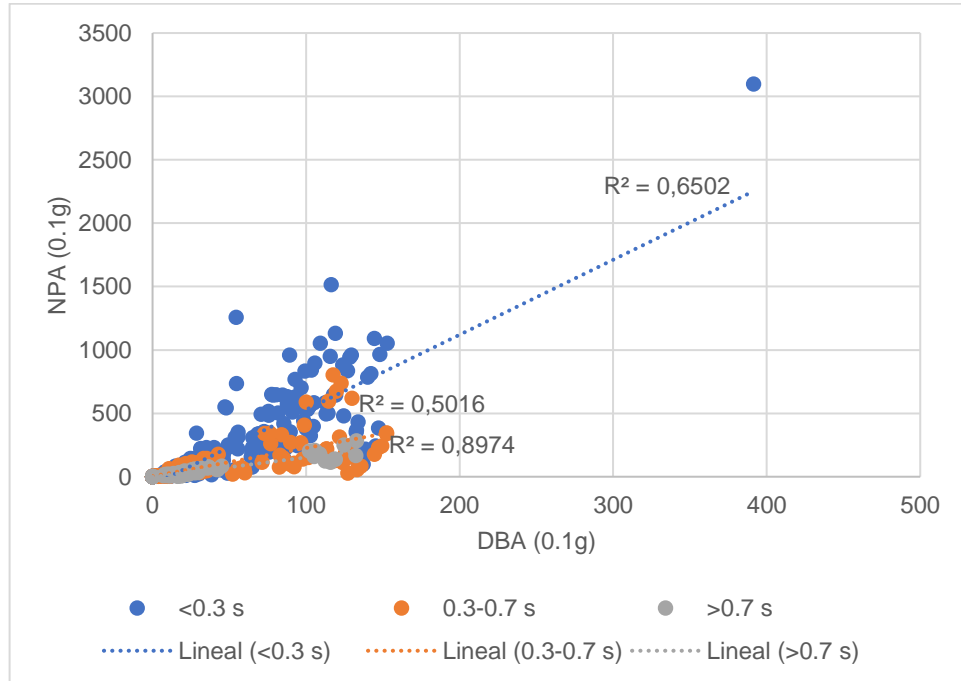


Figura 93. Correlaciones entre DBR(75%) y NPR(60%), usando  $T_0$

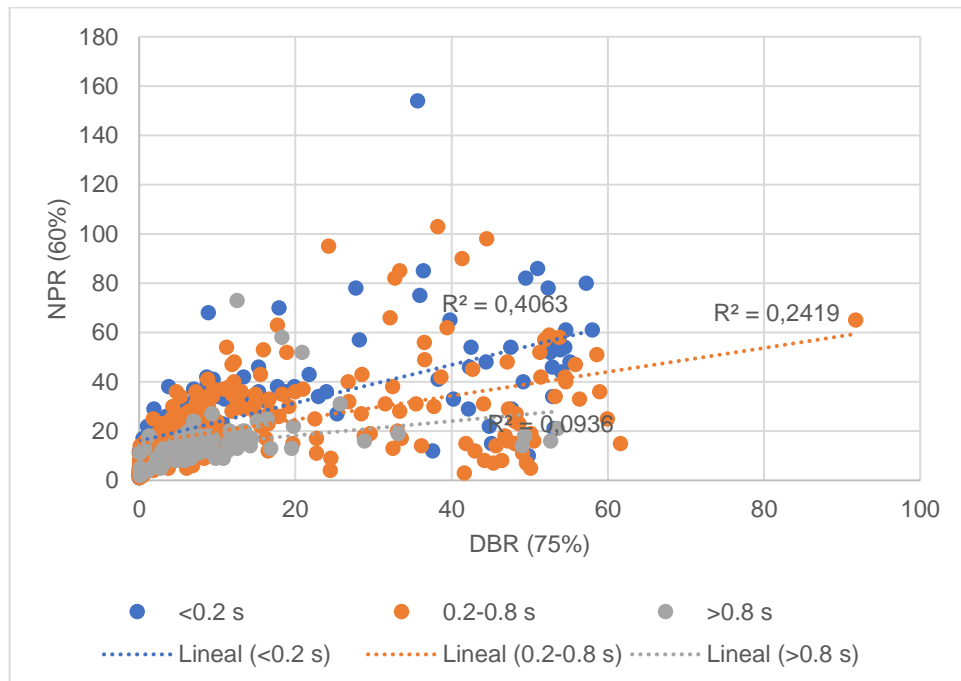


Figura 94. Correlaciones entre DUA(0.1g) y NPA(0.1g), usando  $T_0$

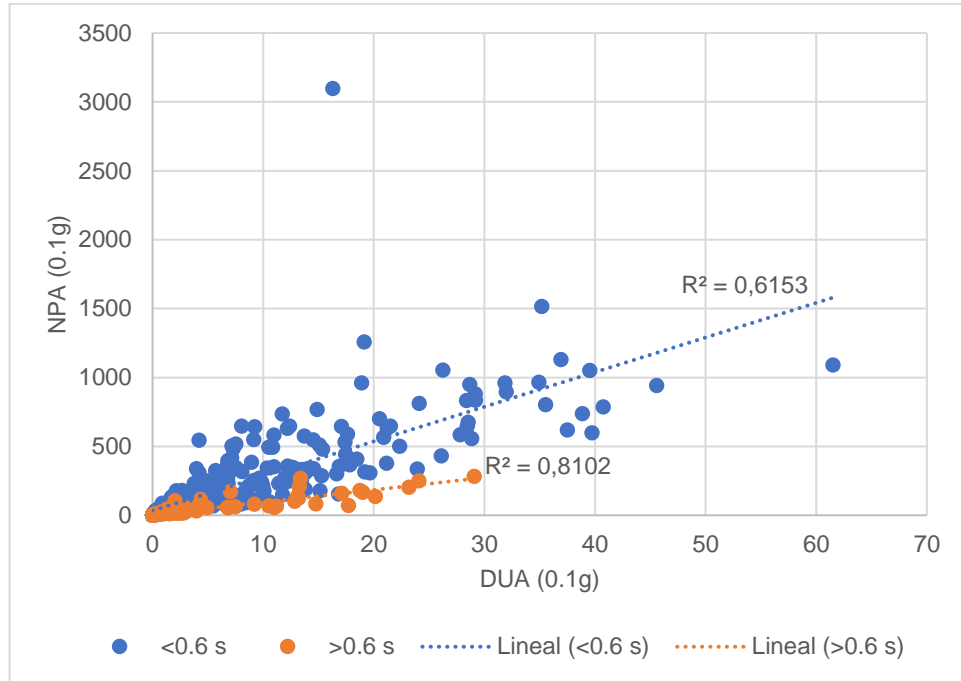


Figura 95. Correlaciones entre DUS(75%I) y NPA(0.1g), usando  $T_0$

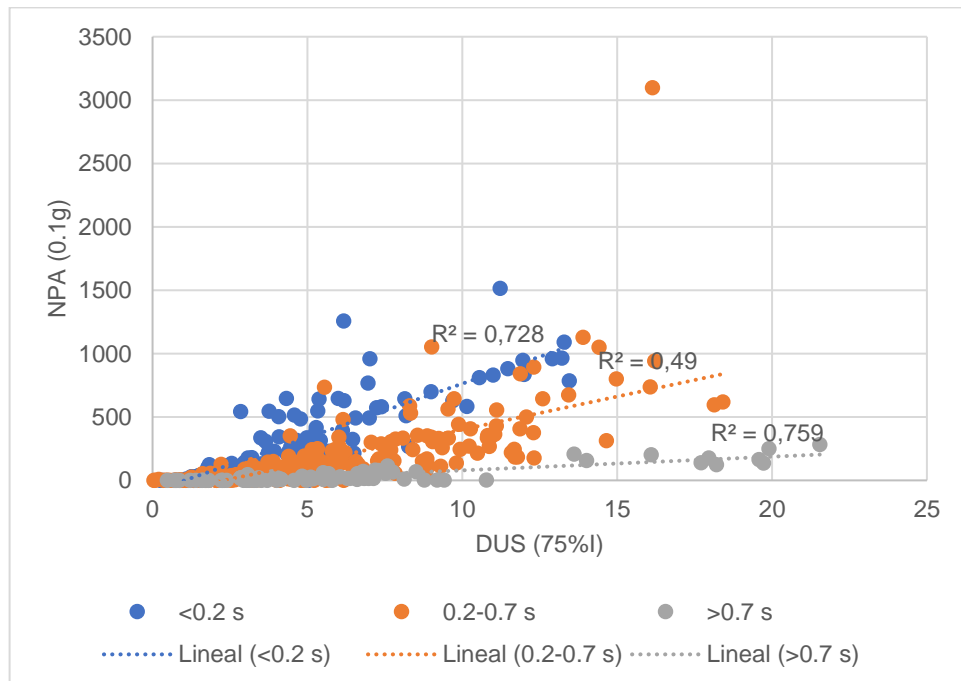
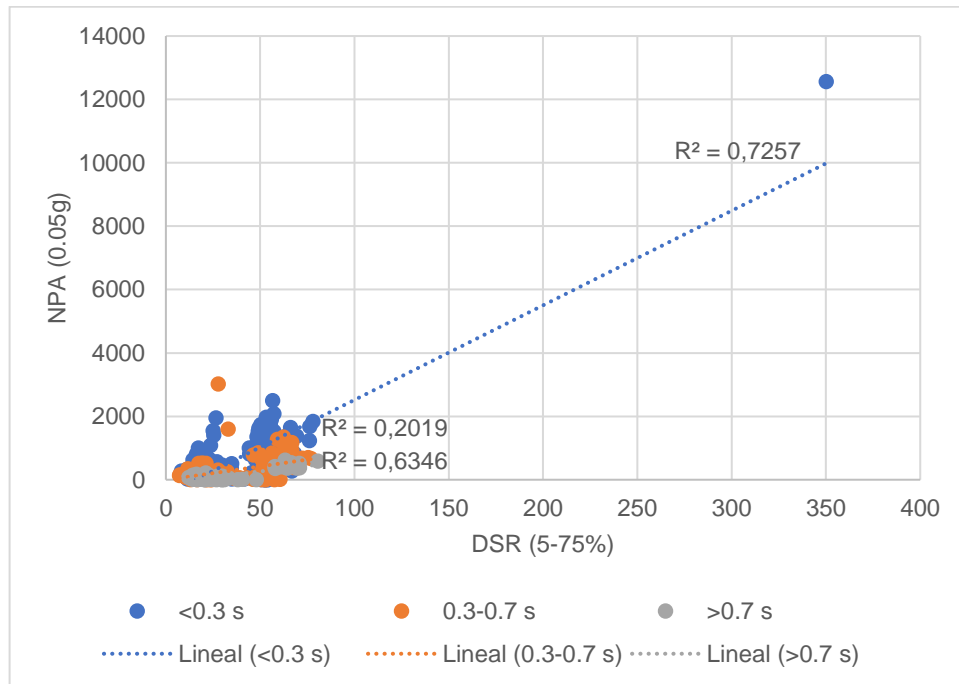


Figura 96. Correlaciones entre DSR(5-75%) y NPA(0.05g), usando  $T_0$



### 5.1.3. Periodo dominante en el intervalo

El periodo dominante en el intervalo fue propuesto por (Bommer, et al., 2006), y corresponde a la simplificación del periodo espectral predominante, se mide como la diferencia aritmética entre el primer y el último periodo en el que cierto umbral de aceleración en excedido.

A continuación, se muestran las correlaciones entre las definiciones de duración y número de ciclos que presentaron mejores coeficientes de correlación, separadas para diferentes intervalos de periodo dominante en el intervalo, con umbrales de aceleración de 1.2g, 1.75 g y 2g.

Figura 97. Correlaciones entre DBA(0.1g) y NPA(0.1g), usando  $T_n(1.2g)$

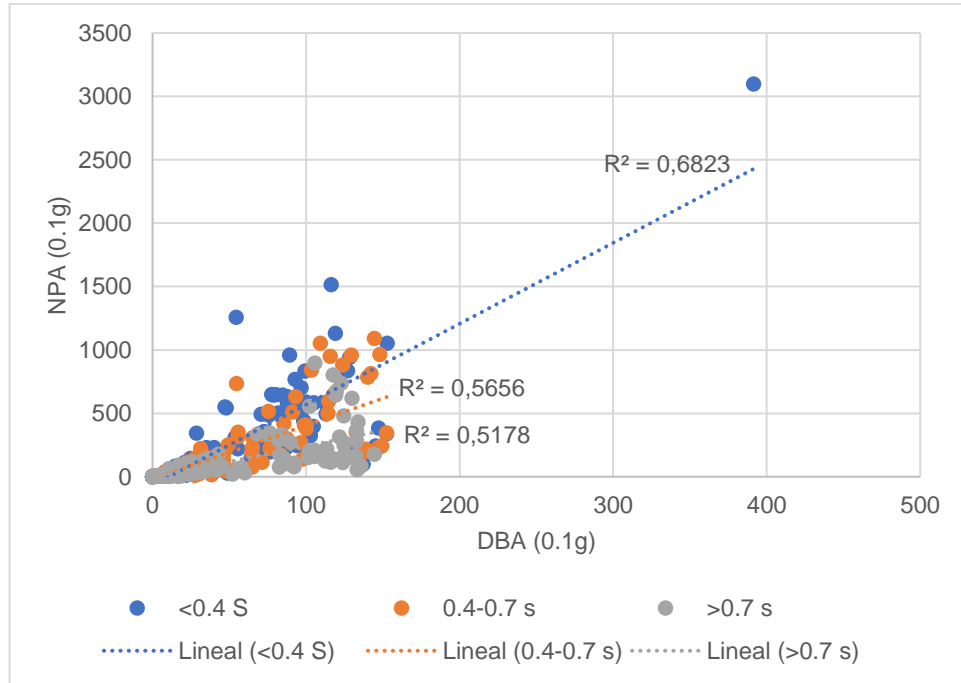


Figura 98. Correlaciones entre DBR(75%) y NPR(60%), usando  $T_n(1.2g)$

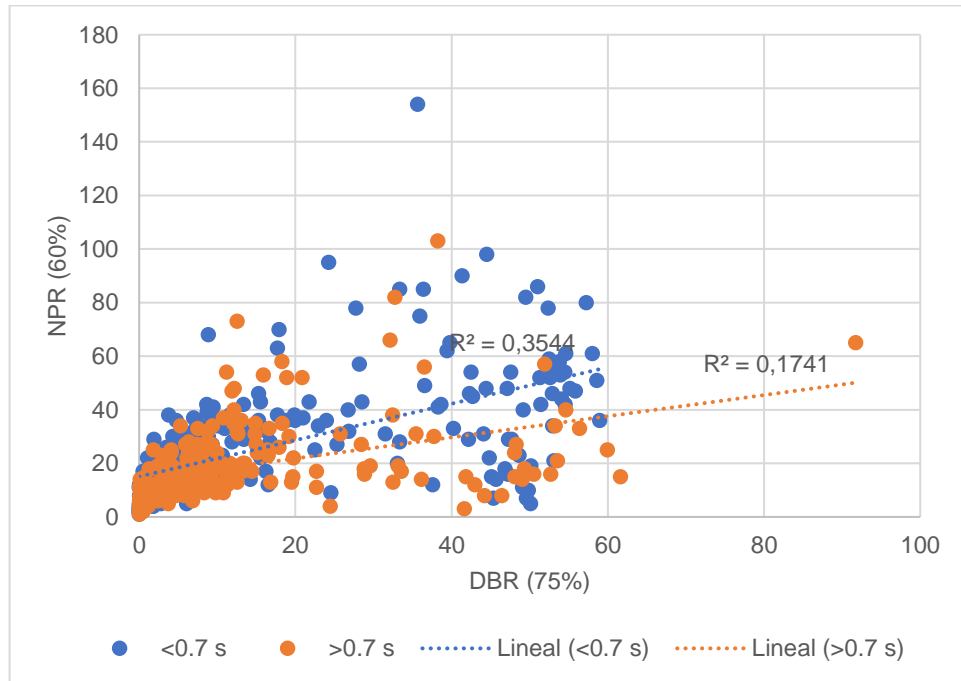


Figura 99. Correlaciones entre DUA(0.1g) y NPA(0.1g), usando  $T_n(1.2g)$

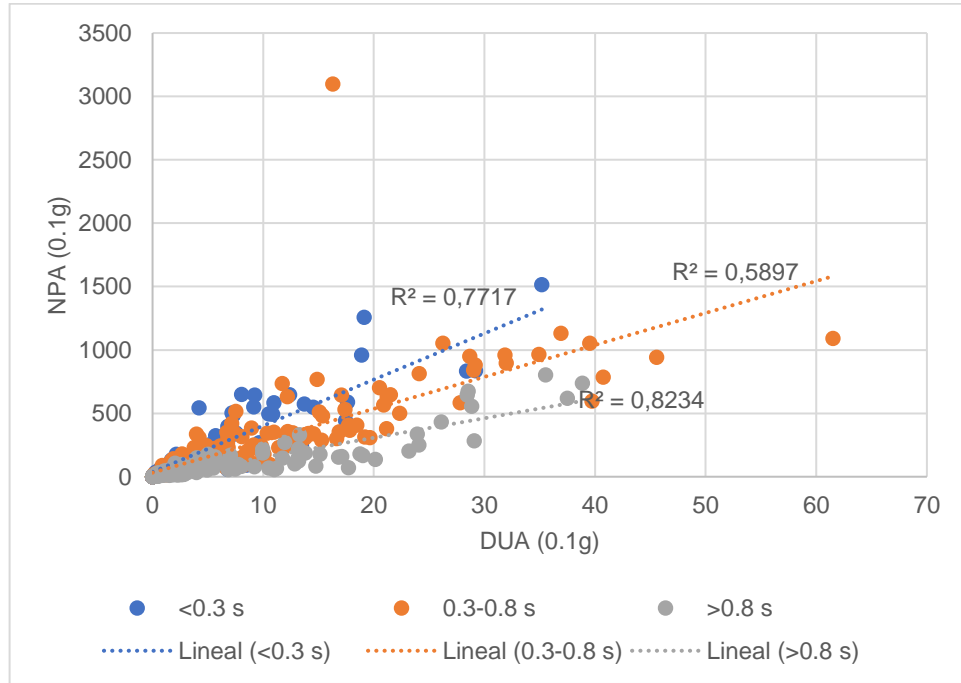


Figura 100. Correlaciones entre DUS(75%I) y NPA(0.1g), usando  $T_n(1.2g)$

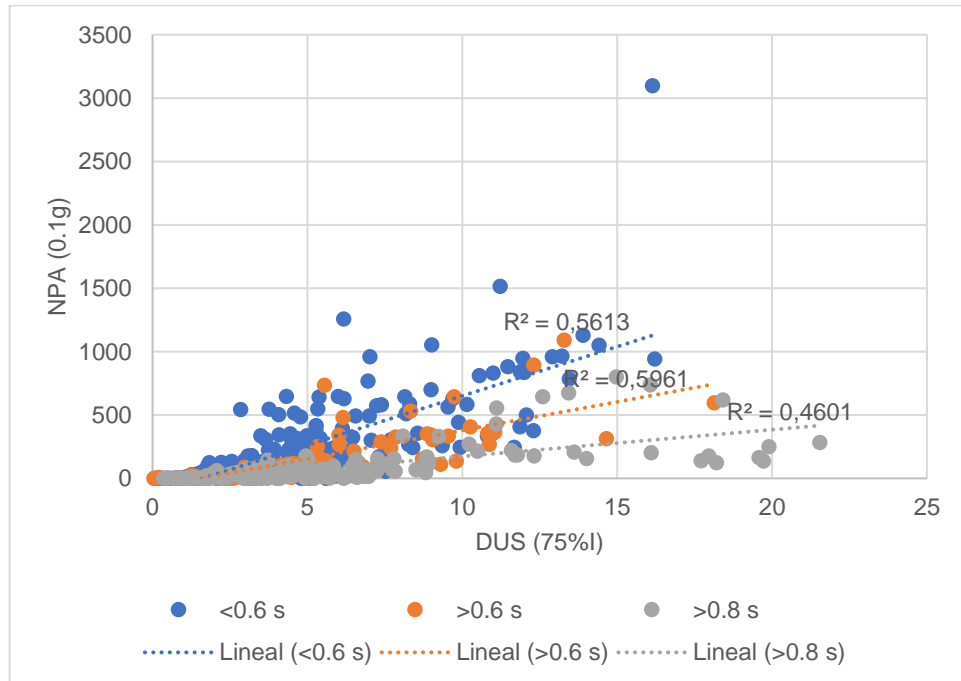


Figura 101. Correlaciones entre DSR(5-75%) y NPA(0.05g), usando  $T_n(1.2g)$

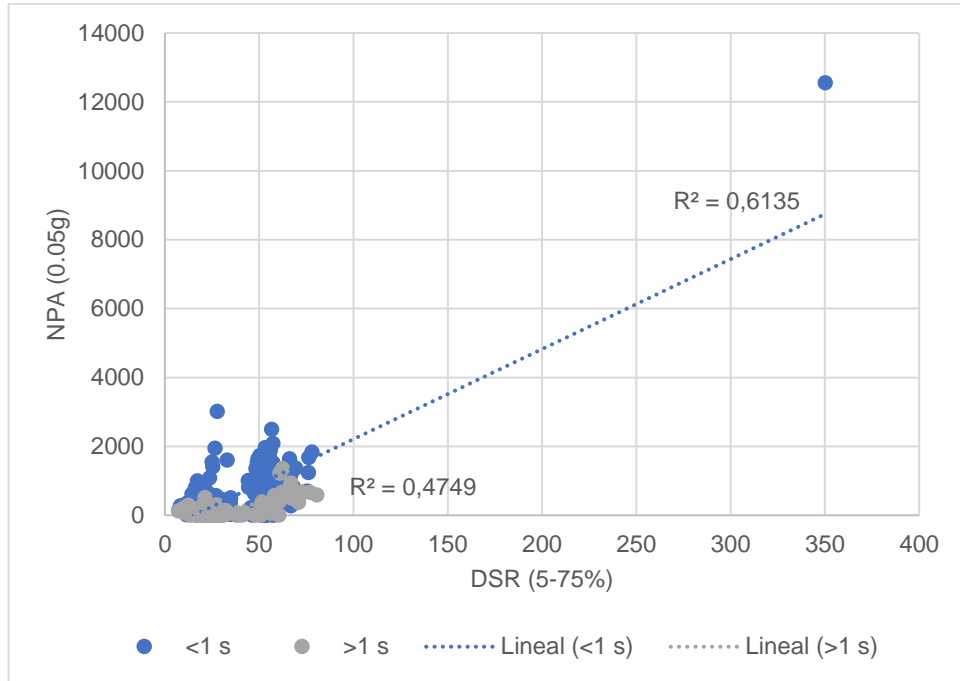


Figura 102. Correlaciones entre DBA(0.1g) y NPA(0.1g), usando  $T_n(1.75g)$

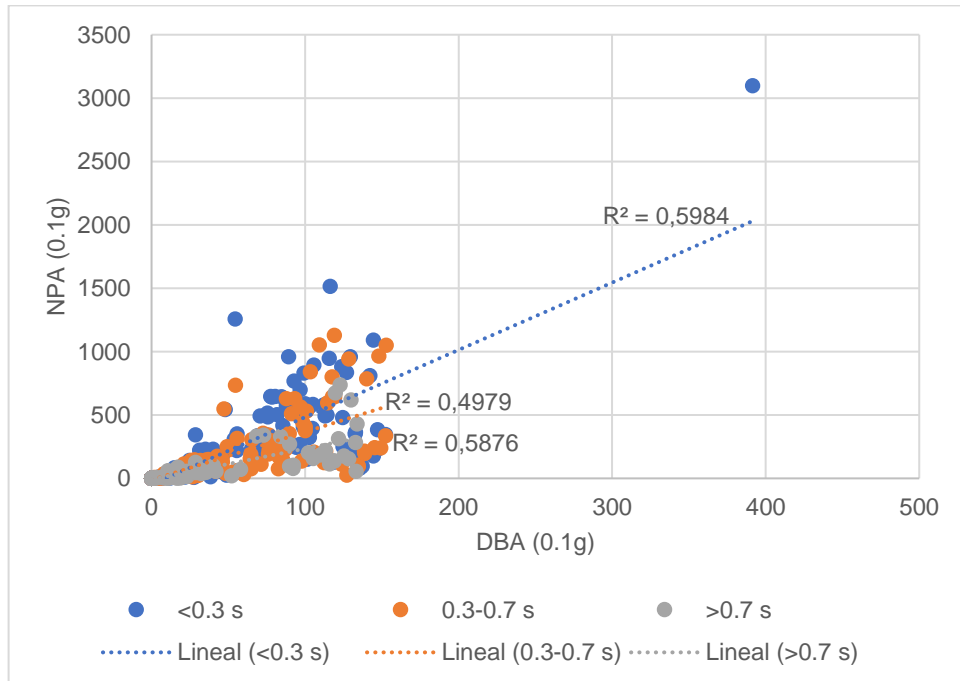


Figura 103. Correlaciones entre DBR(75%) y NPR(60%), usando  $T_n(1.75g)$

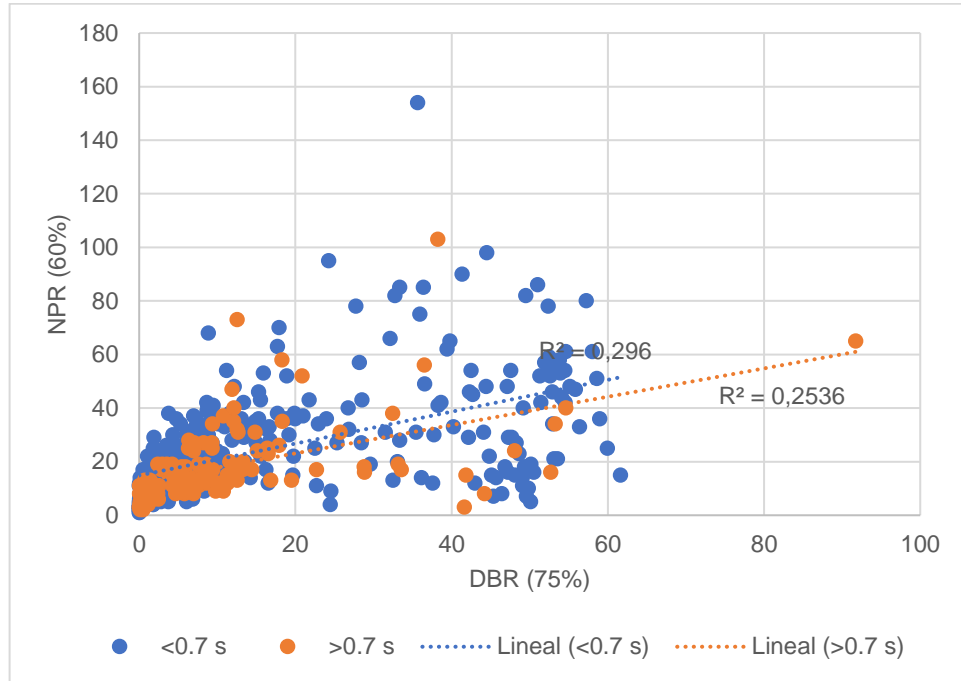


Figura 104. Correlaciones entre DUA(0.1g) y NPA(0.1g), usando  $T_n(1.75g)$

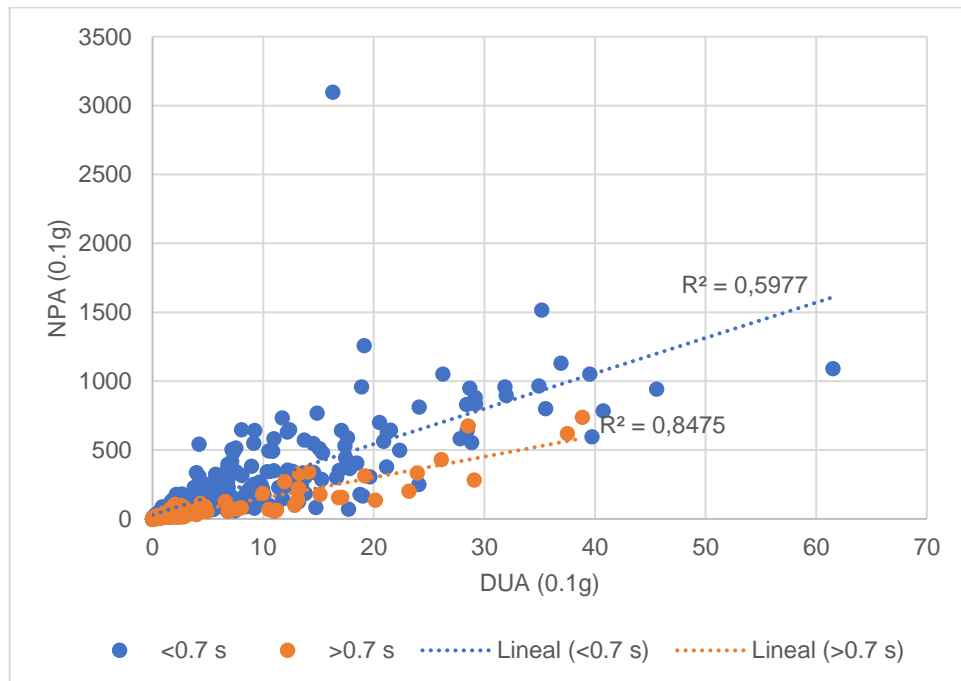


Figura 105. Correlaciones entre DUS(75%I) y NPA(0.1g), usando  $T_n(1.75g)$

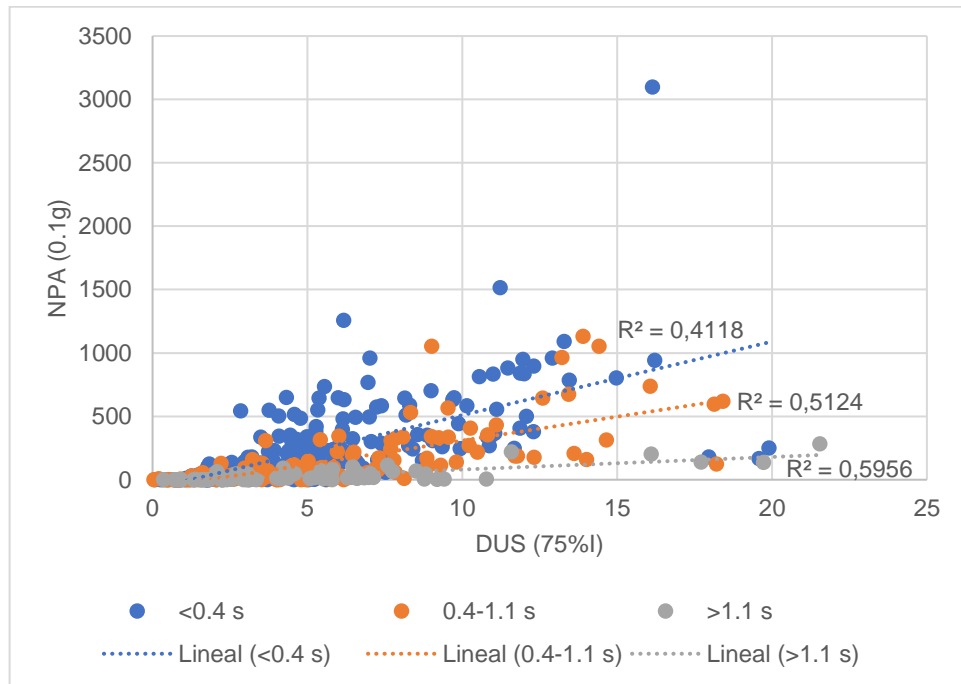


Figura 106. Correlaciones entre DSR(5-75%) y NPA(0.05g), usando  $T_n(1.75g)$

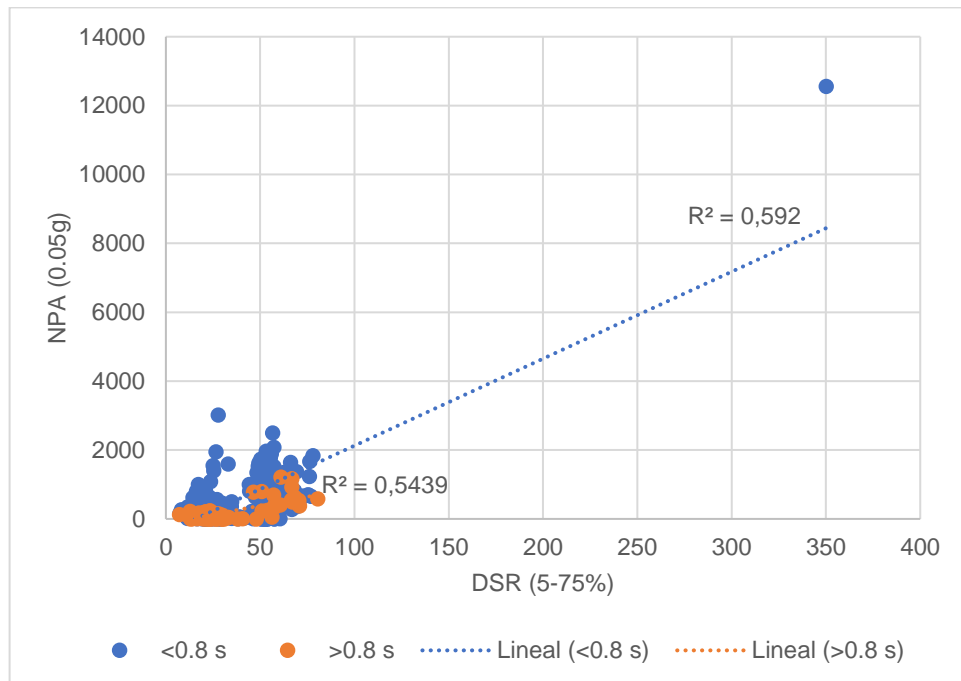


Figura 107. Correlaciones entre DBA(0.1g) y NPA(0.1g), usando  $T_n(2g)$

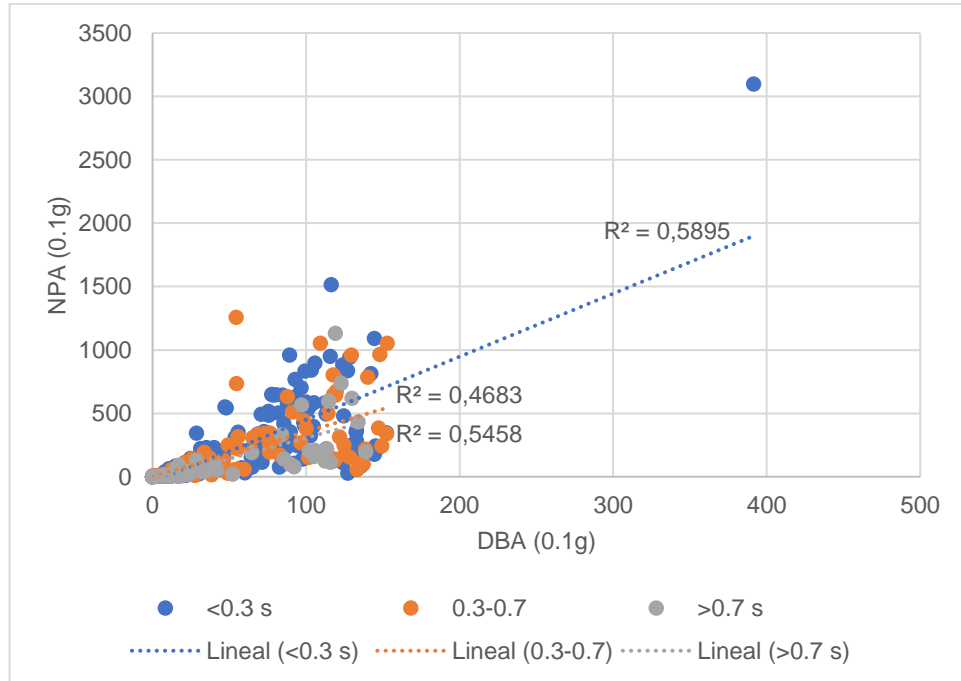


Figura 108. Correlaciones entre DBR(75%) y NPR(60%), usando  $T_n(2g)$

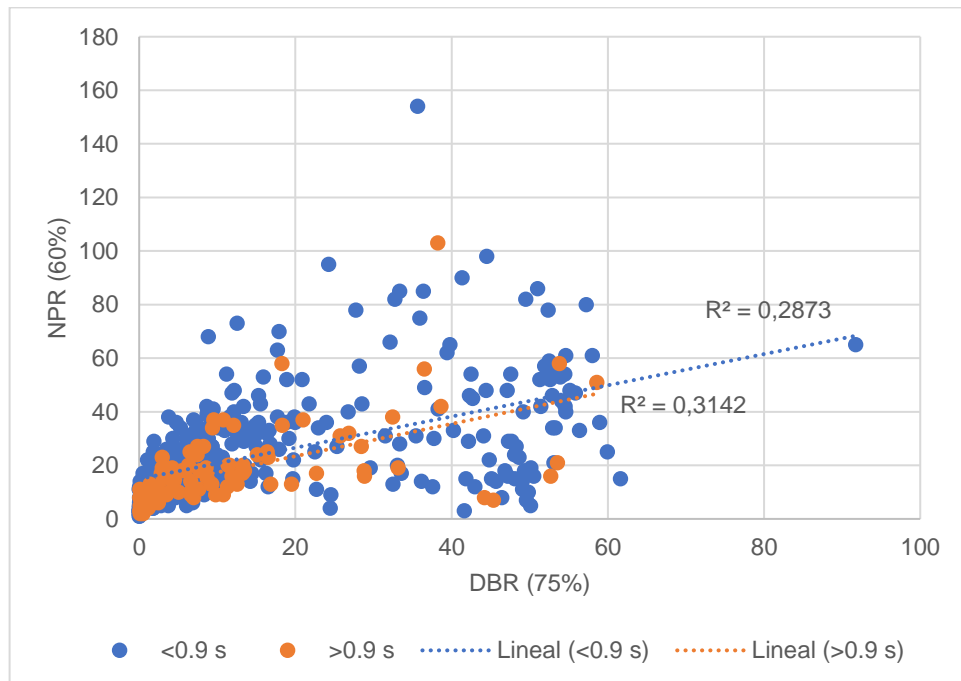


Figura 109. Correlaciones entre DUA(0.1g) y NPA(0.1g), usando  $T_n(2g)$

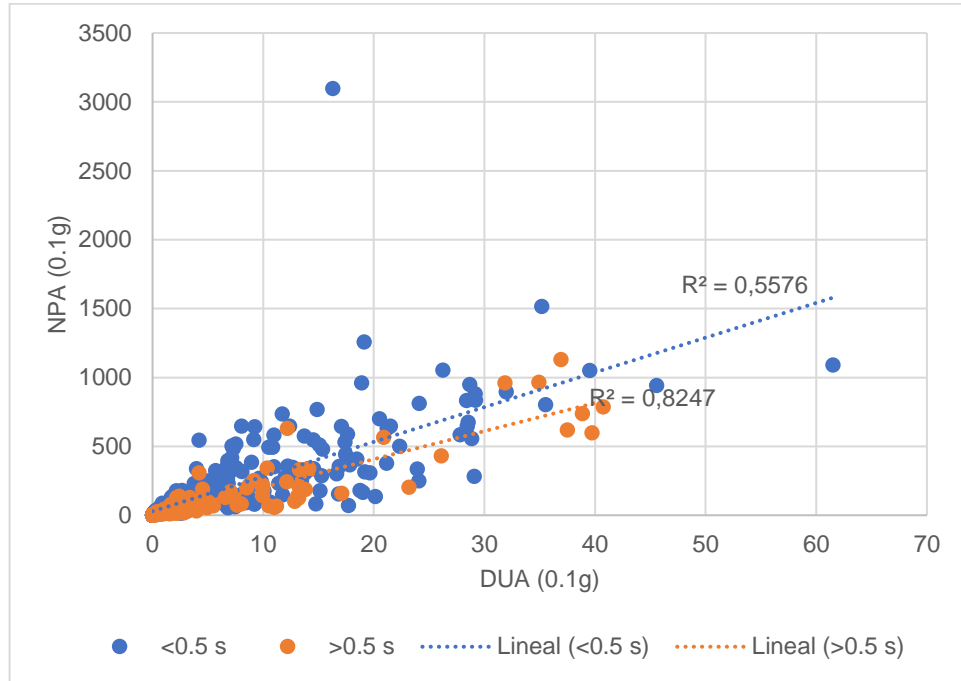


Figura 110. Correlaciones entre DUS(75%I) y NPA(0.1g), usando  $T_n(2g)$

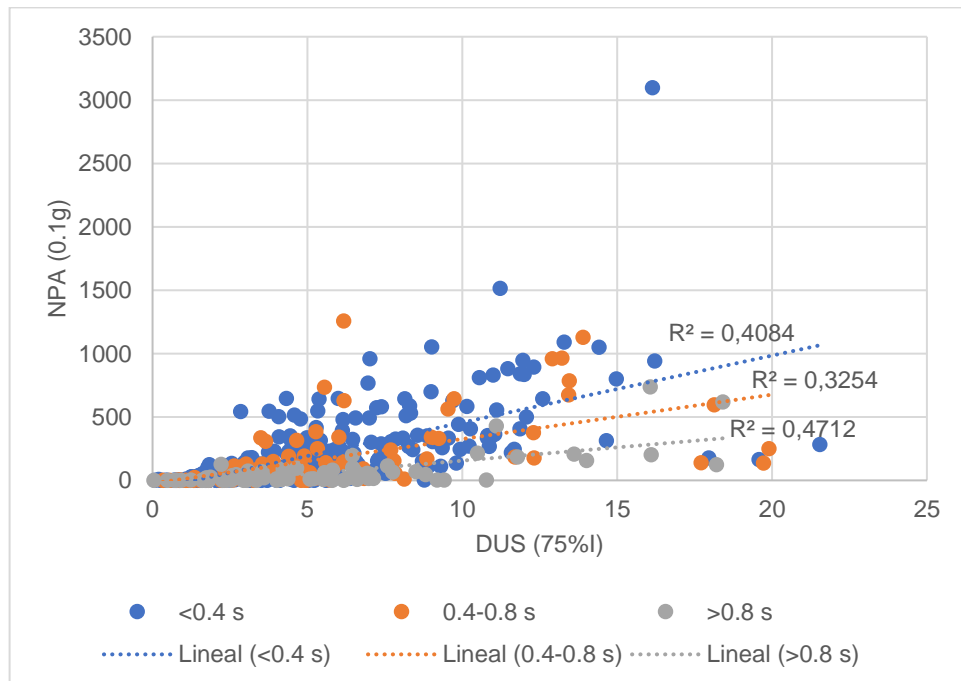


Figura 111. Correlaciones entre DSR(5-75%) y NPA(0.05g), usando  $T_n(2g)$

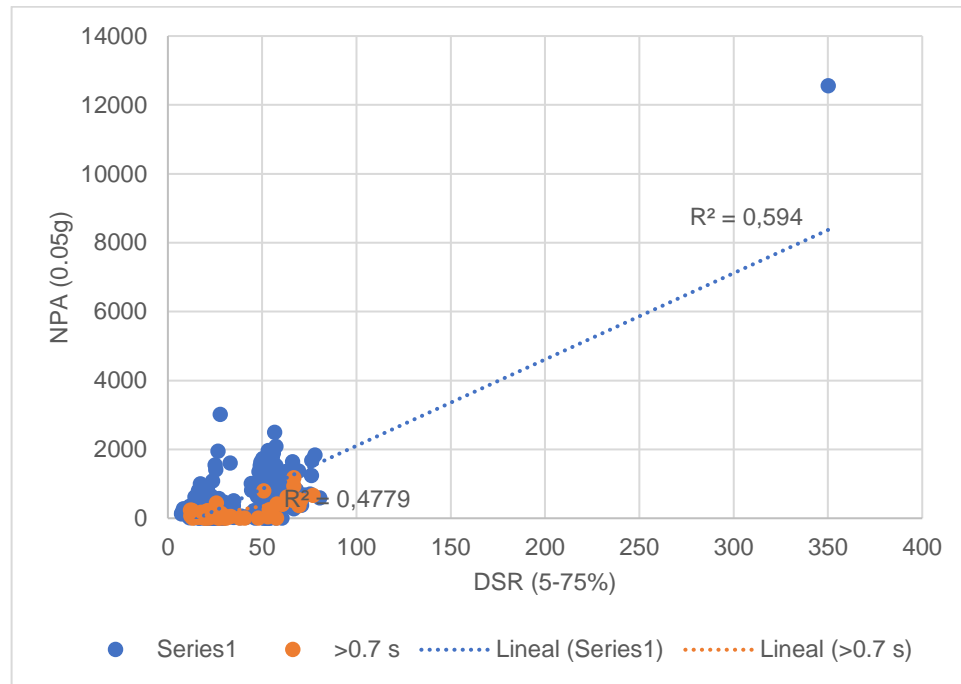


Tabla 13. Correlaciones entre DBA(0.1g) y NPA (0.1g) agrupadas por periodo

Definición de periodo	Rango de valores de periodo (s)			Coeficiente de correlación, $R^2$		
	Intervalo 1	Intervalo 2	Intervalo 3	Intervalo 1	Intervalo 2	Intervalo 3
$T_{avg}$	0-0.3	0.3-0.7	>0.7	0.73	0.49	0.81
$T_0$	0-0.3	0.3-0.7	>0.7	0.65	0.50	0.90
$T_n(1.2g)$	0-0.4	0.4-0.7	>0.7	0.68	0.57	0.52
$T_n(1.75g)$	0-0.3	0.3-0.7	>0.7	0.60	0.50	0.59
$T_n(2g)$	0-0.3	0.3-0.7	>0.7	0.59	0.47	0.55

Tabla 14. Correlaciones entre DBR (75%) y NPR (60%) agrupadas por periodo

Definición de periodo	Rango de valores de periodo (s)			Coeficiente de correlación, $R^2$		
	Intervalo 1	Intervalo 2	Intervalo 3	Intervalo 1	Intervalo 2	Intervalo 3
$T_{avg}$	0-0.3	0.3-0.7	>0.7	0.49	0.20	0.17
$T_0$	0-0.2	0.2-0.8	>0.8	0.41	0.24	0.09
$T_n(1.2g)$	0-0.7	>0.7	-	0.35	0.17	-
$T_n(1.75g)$	0-0.7	>0.7	-	0.30	0.25	-
$T_n(2g)$	0-0.9	>0.9	-	0.29	0.31	-

Tabla 15. Correlaciones entre DUA (0.1g) y NPA (0.1g) agrupadas por periodo

Definición de periodo	Rango de valores de periodo (s)			Coeficiente de correlación, R <sup>2</sup>		
	Intervalo 1	Intervalo 2	Intervalo 3	Intervalo 1	Intervalo 2	Intervalo 3
T <sub>avg</sub>	0-0.8	>0.8	-	0.61	0.83	-
T <sub>0</sub>	0-0.6	>0.6	-	0.62	0.81	-
T <sub>n</sub> (1.2g)	0-0.3	0.3-0.8	>0.8	0.77	0.59	0.82
T <sub>n</sub> (1.75g)	0-0.7	>0.7	-	0.60	0.85	-
T <sub>n</sub> (2g)	0-0.5	>0.5	-	0.56	0.82	-

Tabla 16. Correlaciones entre DUS (75%I) y NPA (0.1g) agrupadas por periodo

Definición de periodo	Rango de valores de periodo (s)			Coeficiente de correlación, R <sup>2</sup>		
	Intervalo 1	Intervalo 2	Intervalo 3	Intervalo 1	Intervalo 2	Intervalo 3
T <sub>avg</sub>	0-0.3	0.3-0.6	>0.6	0.65	0.67	0.44
T <sub>0</sub>	0-0.2	0.2-0.7	>0.7	0.73	0.49	0.76
T <sub>n</sub> (1.2g)	0-0.6	0.6-0.8	>0.8	0.56	0.60	0.46
T <sub>n</sub> (1.75g)	0-0.4	0.4-1.1	>1.1	0.41	0.51	0.60
T <sub>n</sub> (2g)	0-0.4	0.4-0.8	>0.8	0.41	0.33	0.47

Tabla 17. Correlaciones entre DSR (5-75%) y NPA (0.05g) agrupadas por periodo

Definición de periodo	Rango de valores de periodo (s)			Coeficiente de correlación, R <sup>2</sup>		
	Intervalo 1	Intervalo 2	Intervalo 3	Intervalo 1	Intervalo 2	Intervalo 3
T <sub>avg</sub>	0-0.3	0.3-0.7	>0.7	0.86	0.22	0.63
T <sub>0</sub>	0-0.3	0.3-0.7	>0.7	0.73	0.20	0.63
T <sub>n</sub> (1.2g)	0-1.0	>1.0	-	0.61	0.47	-
T <sub>n</sub> (1.75g)	0-0.8	>0.8	-	0.59	0.54	-
T <sub>n</sub> (2g)	0-0.7	>0.7	-	0.59	0.48	-

En general, la agrupación de los datos de acuerdo con el contenido frecuencial mejora notablemente la correlación entre las diferentes definiciones de duración y número de ciclos. Cabe resaltar los siguientes detalles:

- Los mejores coeficientes de correlación entre DBA (0.1g) – NPA (0.1g) y DUA (0.1g) – NPA (0.1g) se obtienen para periodos mayores a 0.7 segundos.
- Los mejores coeficientes de correlación entre DUS (75%I) – NPA (0.1g) y DSR (5-75%) – NPA (0.1g) se obtienen para periodos menores a 0.3 segundos. Los registros sísmicos

que corresponden a los puntos de mayor dispersión evidencian la notable influencia de las formas de onda en el número de ciclos, y por tanto en el nivel de correlación.

- La correlación entre *DBR (75%) – NPR (60%)* solo mejora levemente en el rango de periodos bajos, utilizando los periodos espectrales promedio y predominante. Para periodos entre 0.3 y 0.7 segundos la correlación entre *DBA (0.1g) – NPA (0.1g)* y *DSR (5-75%)* y *NPA (0.05g)* desmejora considerablemente.
- Los mejores coeficientes de correlación se obtienen al agrupar los datos según los periodos espectrales promedio y predominante.

## 5.2. Correlación entre el periodo y la velocidad de onda de corte

Así como se han concebido sistemas de clasificación de suelos a partir de la velocidad de onda de corte, diferentes investigadores han propuesto sistemas de clasificación de sitio basados en el periodo espectral predominante del suelo, por ejemplo, (Zaré, et al., 1999), (Ghasemi, et al., 2009), (Di Alessandro, et al., 2012). De lo anterior, se presume una relación directa entre el periodo y la clasificación de sitio por velocidad de onda de corte, que sería de gran utilidad para incluir el efecto del contenido frecuencial en modelos simplificados de evaluación del potencial de licuación.

*Tabla 18. Clasificación de sitio basada en el periodo natural del suelo*

<i>Clase</i>	<i>Descripción</i>	<i>Rango periodo natural</i>
I	Roca/Suelo rígido	$T < 0.2 \text{ s}$
II	Suelo duro	$0.2 \text{ s} \leq T < 0.4 \text{ s}$
III	Suelo medio	$0.4 \text{ s} \leq T < 0.6 \text{ s}$
IV	Suelo blando	$T \geq 0.6 \text{ s}$

*Adaptado de:* (Di Alessandro, et al., 2012)

A continuación, se presentan las correlaciones entre la velocidad de onda de corte promedio ( $V_{s30}$ ) del depósito de suelo y cada una de las definiciones de periodo presentadas.

Figura 112. Correlación entre la Vs30 y el periodo espectral promedio

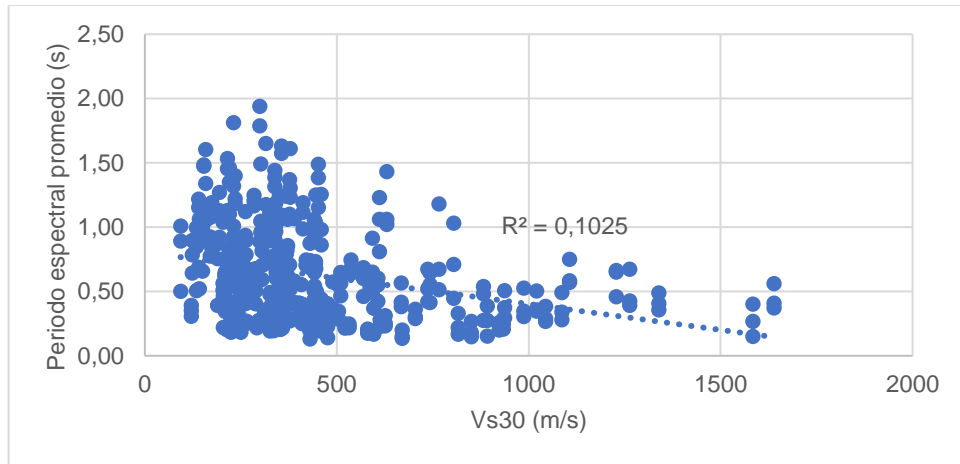


Figura 113. Correlación entre la Vs30 y el periodo espectral predominante

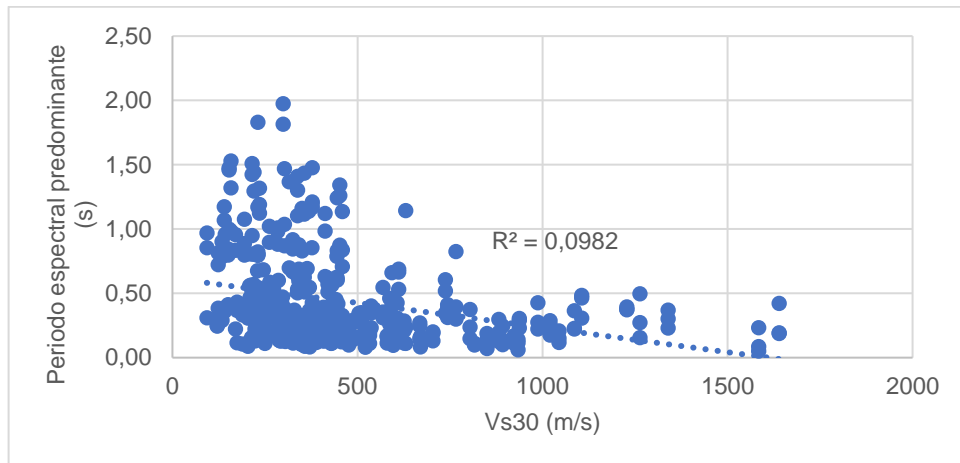


Figura 114. Correlación entre la Vs30 y el periodo espectral dominante en el intervalo (1.2g)

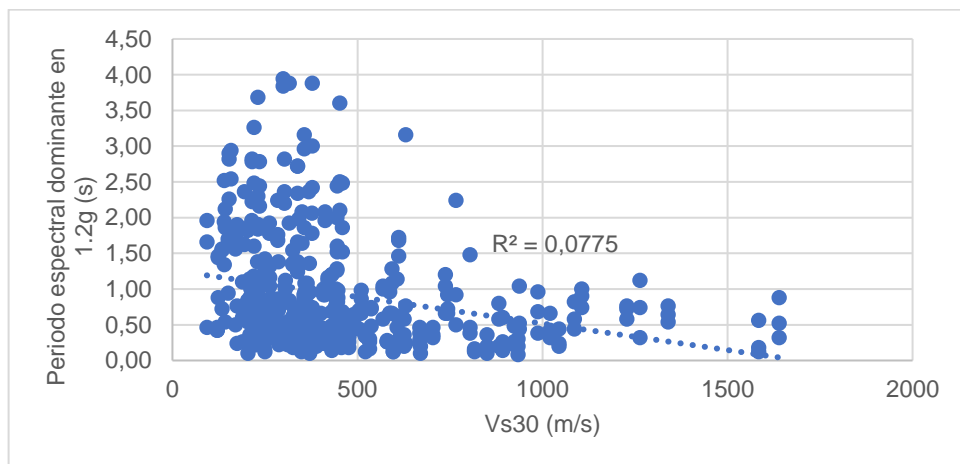


Figura 115. Correlación entre la Vs30 y el periodo espectral dominante en el intervalo (1.75g)

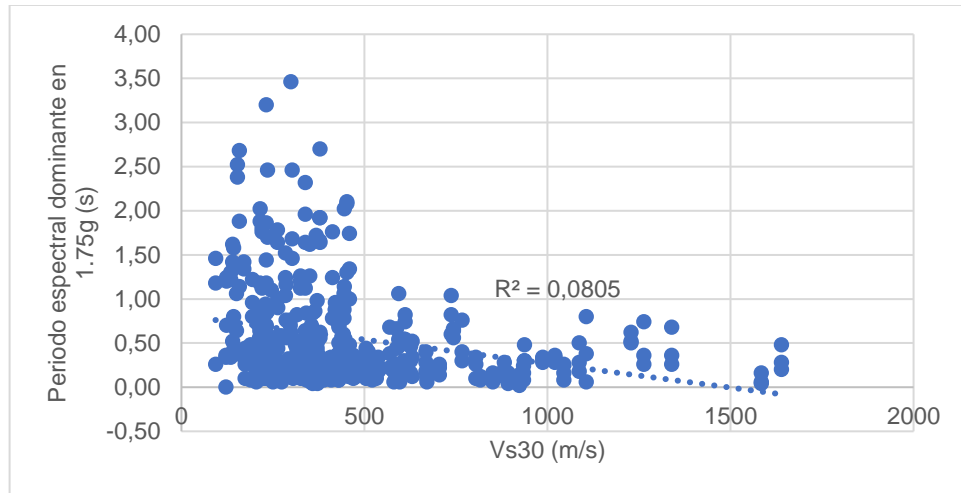
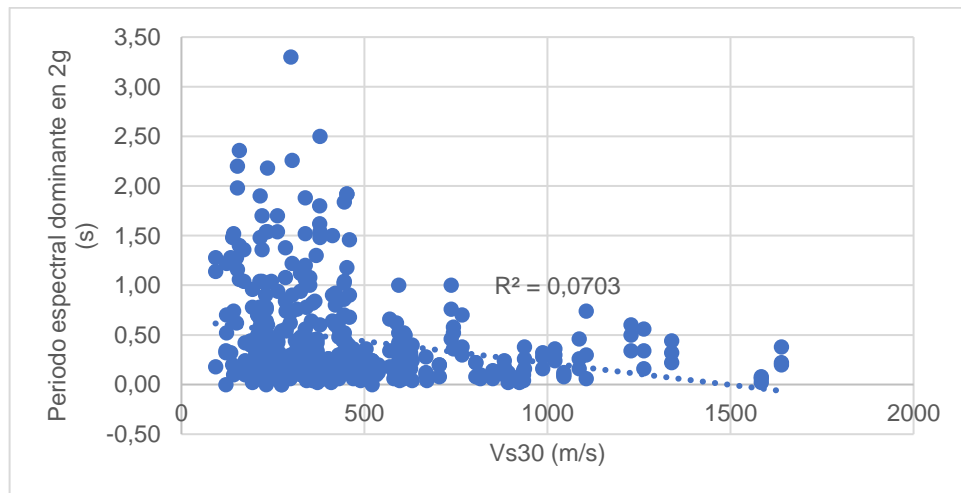


Figura 116. Correlación entre la Vs30 y el periodo espectral dominante en el intervalo (2g)



### 5.3. Modelo matemático para predecir el número de ciclos

En una onda regular, de frecuencia constante (Figura 112), el número de ciclos y la duración total tienen una relación de directa proporcionalidad, condicionada por el periodo. Para este caso, el número de ciclos es equivalente al cociente entre la duración y el periodo.

$$N = \frac{D}{T} \quad (32)$$

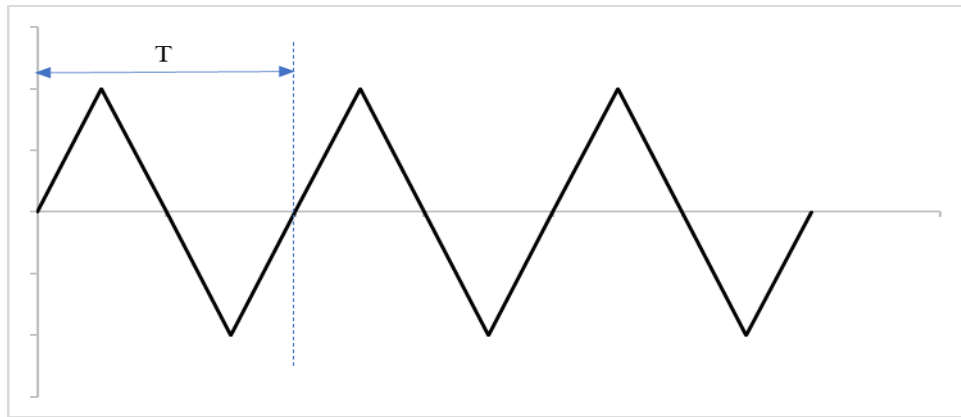
Donde:

$N$ : Número de ciclos.

$D$ : Duración total de la onda.

$T$ : Periodo constante.

*Figura 117. Representación gráfica de una onda de periodo constante*



En ondas irregulares, como el caso de los acelerogramas, a pesar de que lo expuesto anteriormente no es igualmente válido, se espera una fuerte correlación entre el número de ciclos y el cociente duración/periodo. A continuación, se presenta la correlación entre el parámetro  $D/T$  y  $N$  para las definiciones de duración y número de ciclos en las que se obtuvieron mejores coeficientes de correlación. Adicionalmente, se presenta en cada caso la separación de las correlaciones según el tipo de perfil de suelo, para evaluar la influencia de este en el mejoramiento de las correlaciones.

Figura 118. Correlación entre DBA(0.1g)/Tavg y NPA(0.1g)

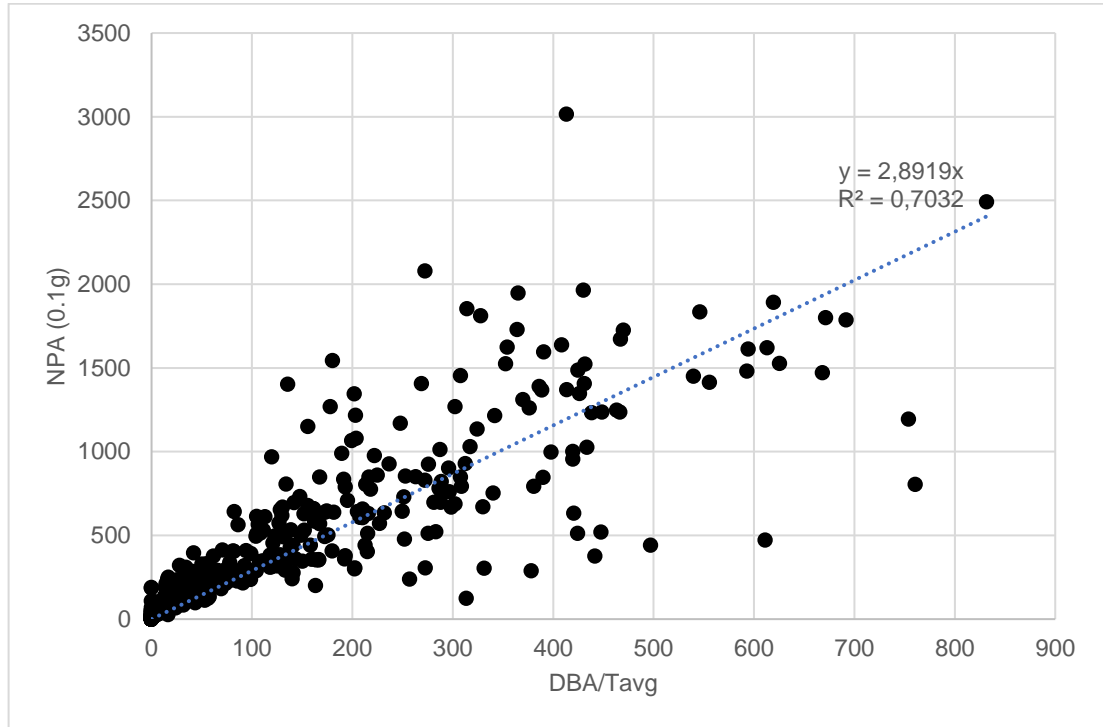


Figura 119. Correlación entre DBA(0.1g)/Tavg y NPA(0.1g), según perfil de suelo

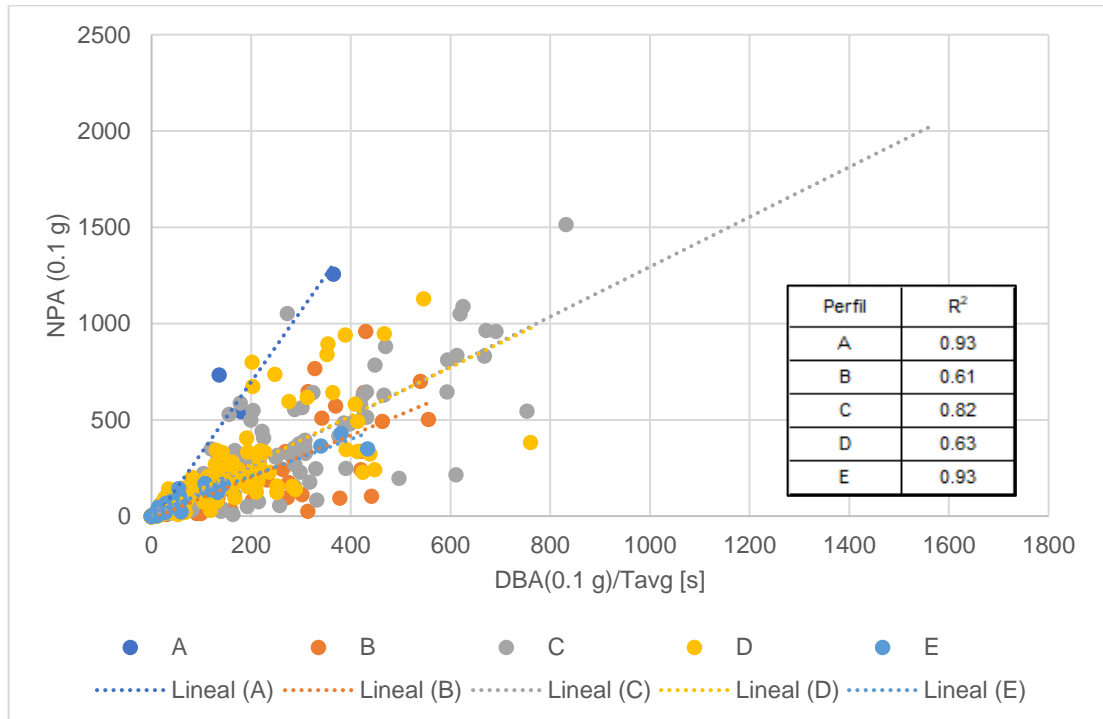


Figura 120. Correlación entre DBA(0.1g)/T0 y NPA(0.1g)

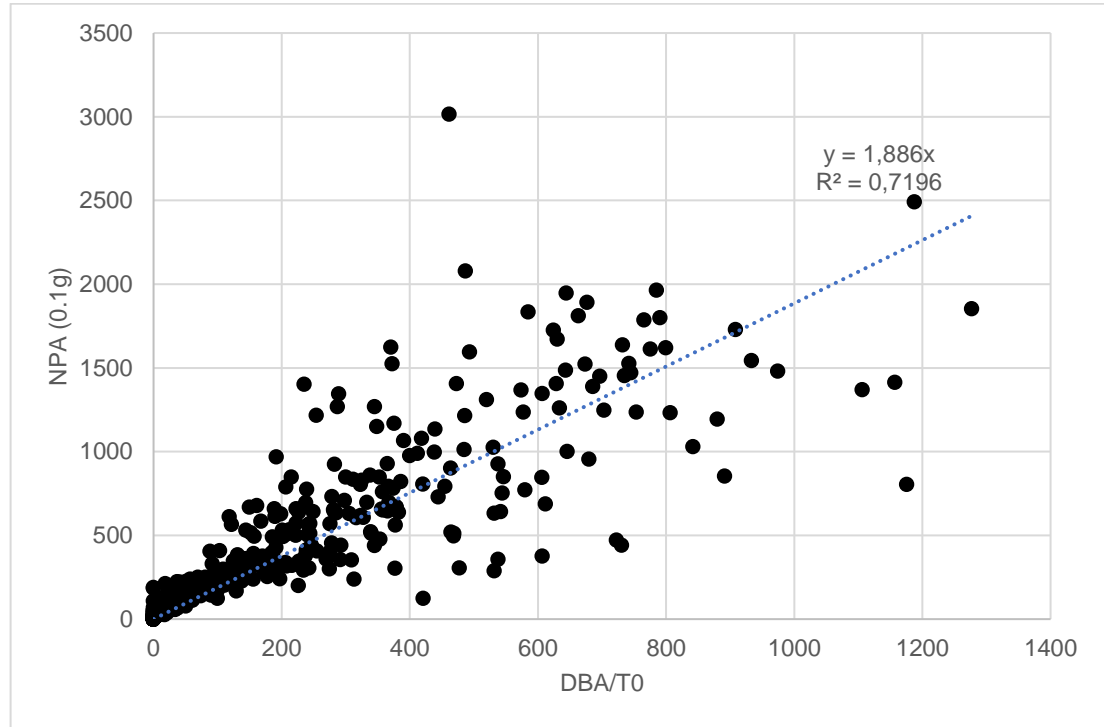


Figura 121. Correlación entre DBA(0.1g)/T0 y NPA(0.1g), según perfil de suelo

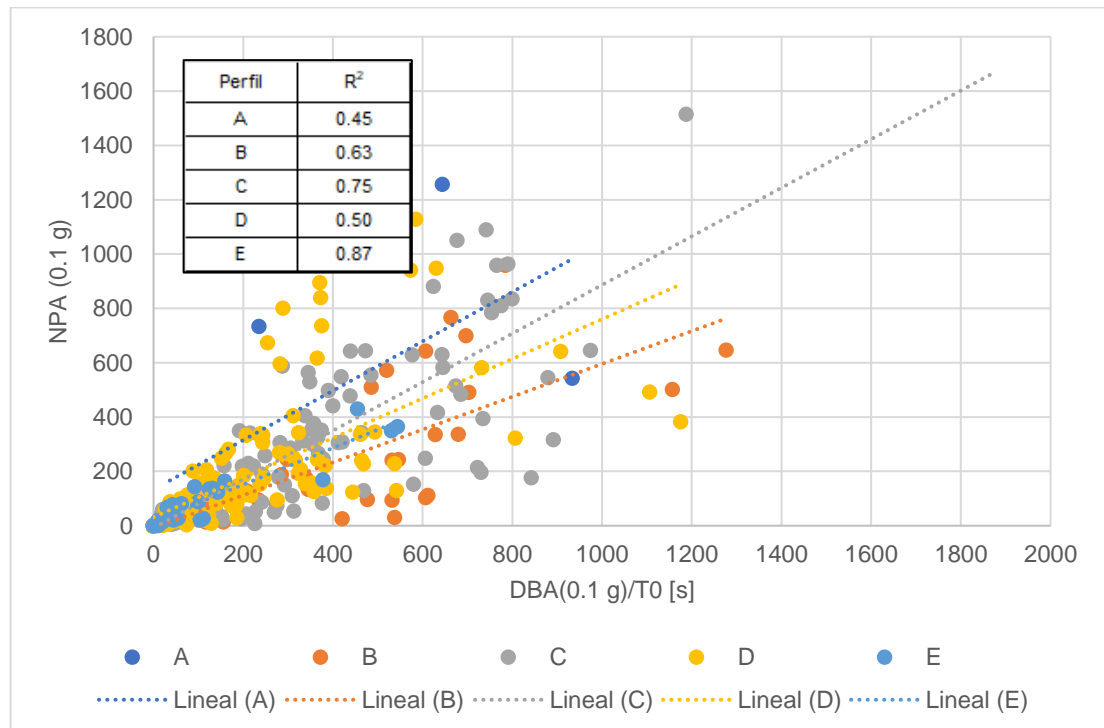


Figura 122. Correlación entre DBA(0.1g)/Tn(1.2g) y NPA(0.1g)

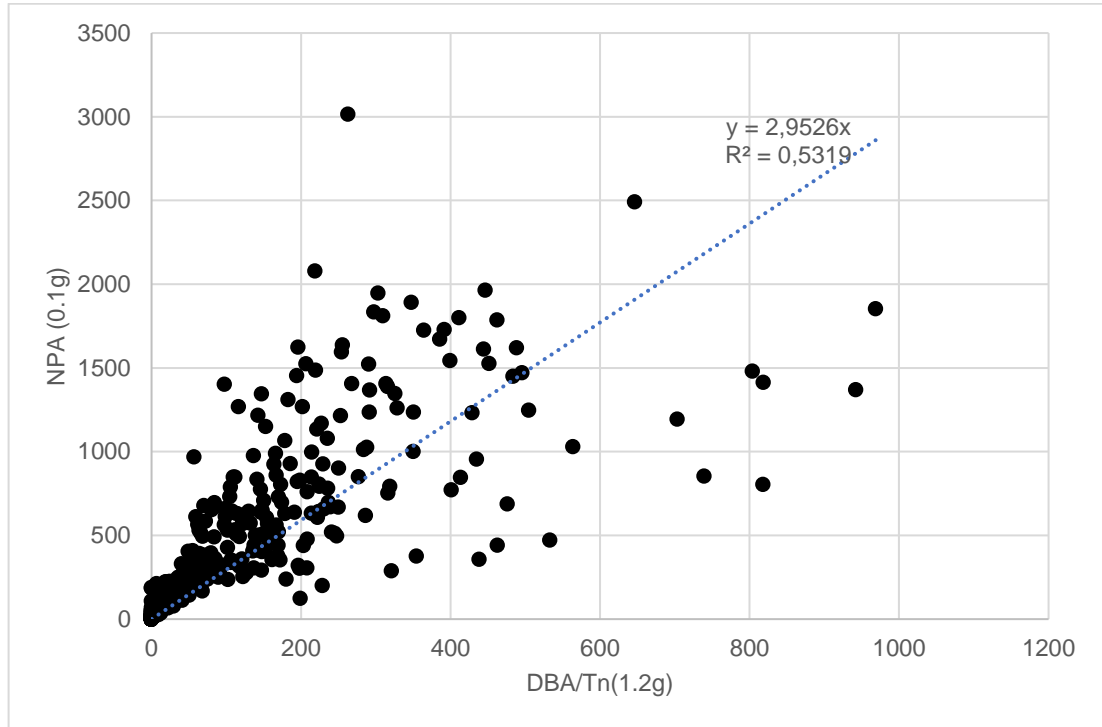


Figura 123. Correlación entre DBA(0.1g)/Tn(1.2g) y NPA(0.1g), según perfil de suelo

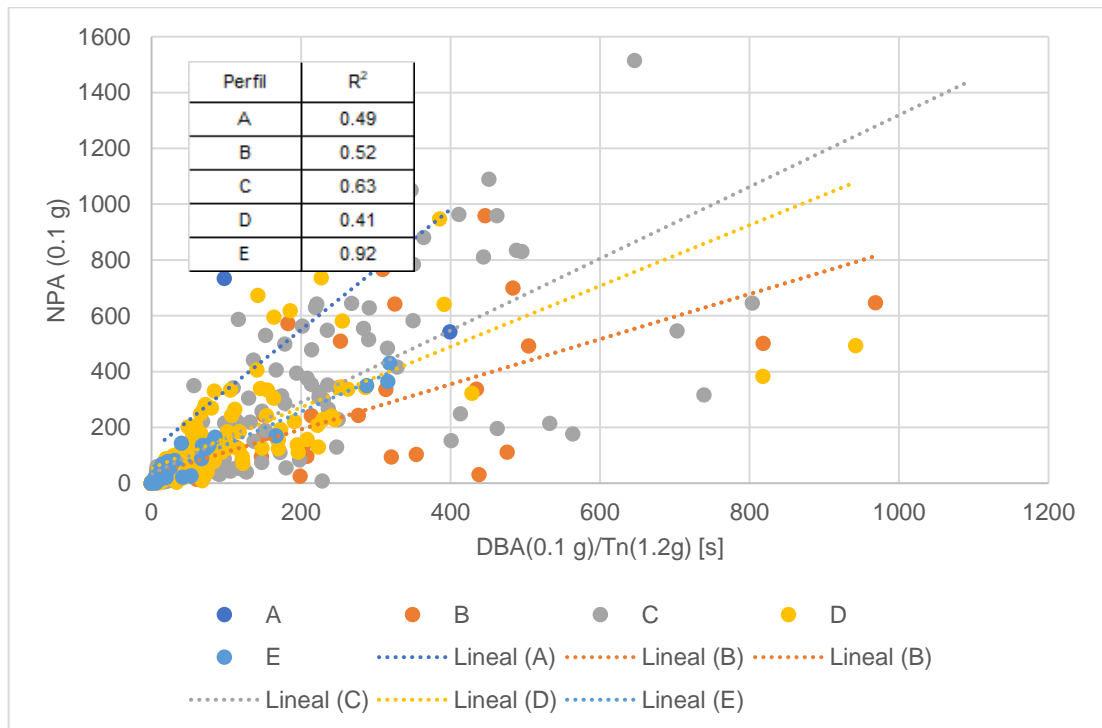


Figura 124. Correlación entre DBA(0.1g)/Tn(1.75g) y NPA(0.1g)

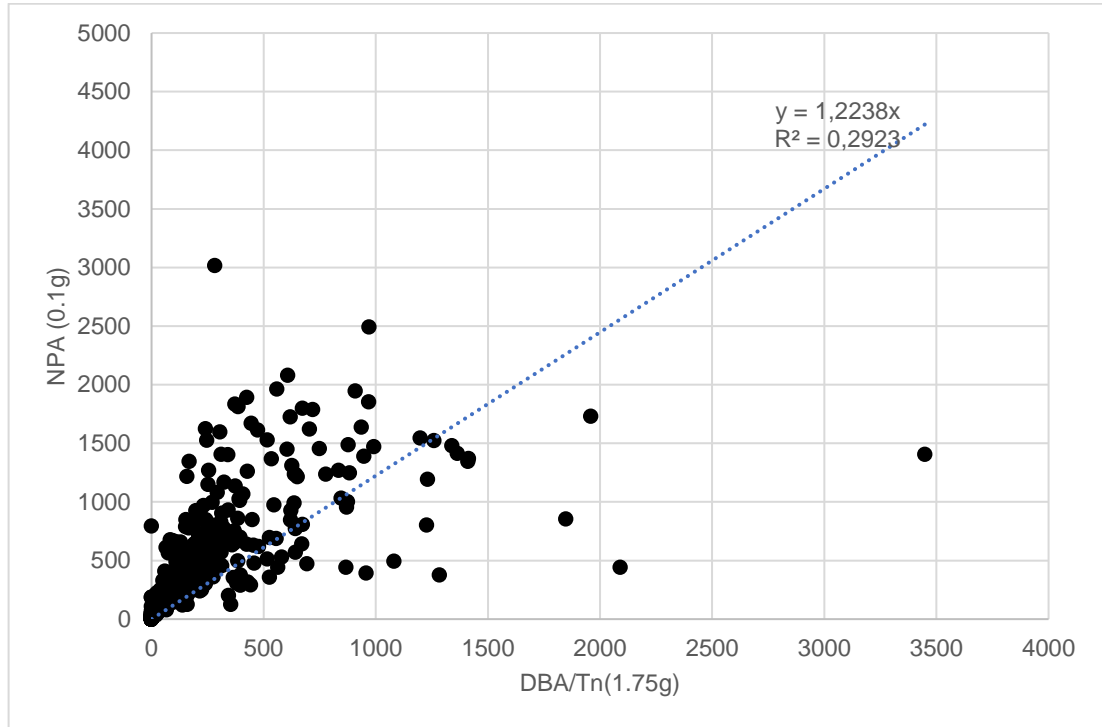


Figura 125. Correlación entre DBA(0.1g)/Tn(1.75g) y NPA(0.1g), según perfil de suelo

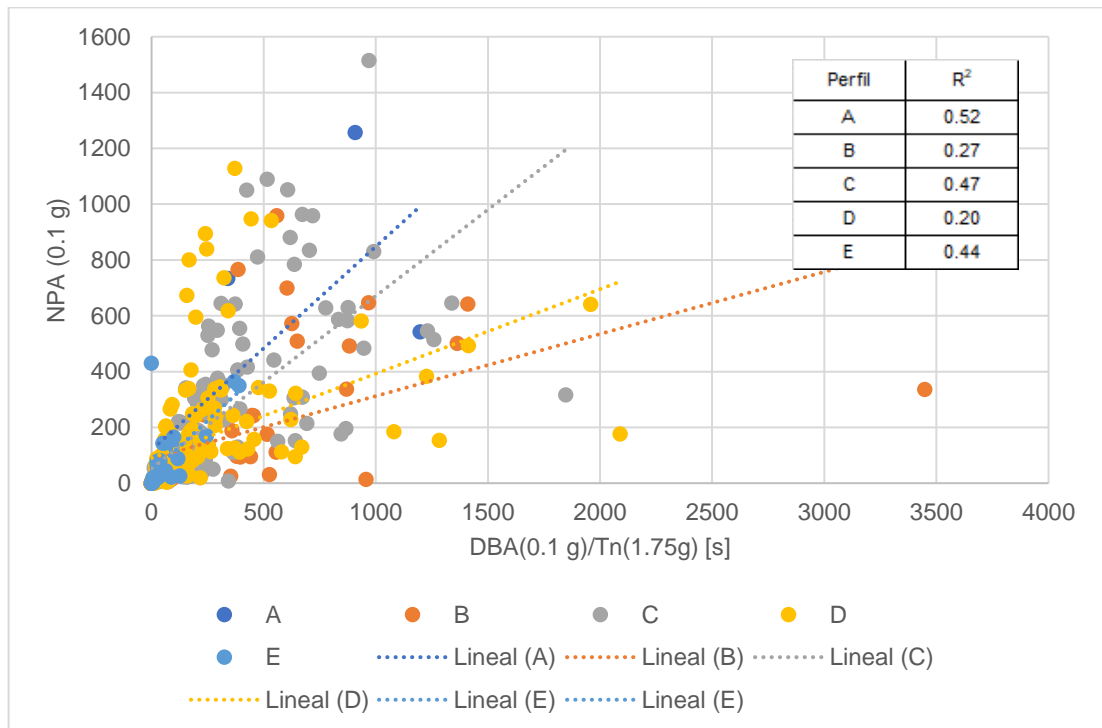


Figura 126. Correlación entre DBA(0.1g)/Tn(2g) y NPA(0.1g)

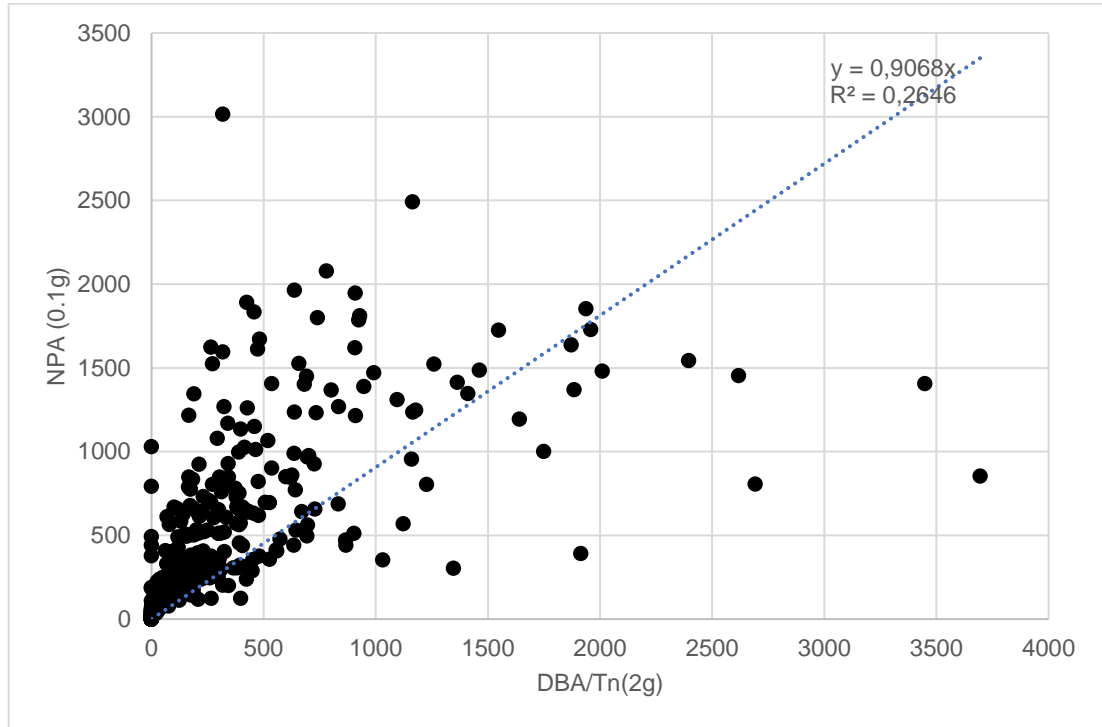


Figura 127. Correlación entre DBA(0.1g)/Tn(2g) y NPA(0.1g), según perfil de suelo

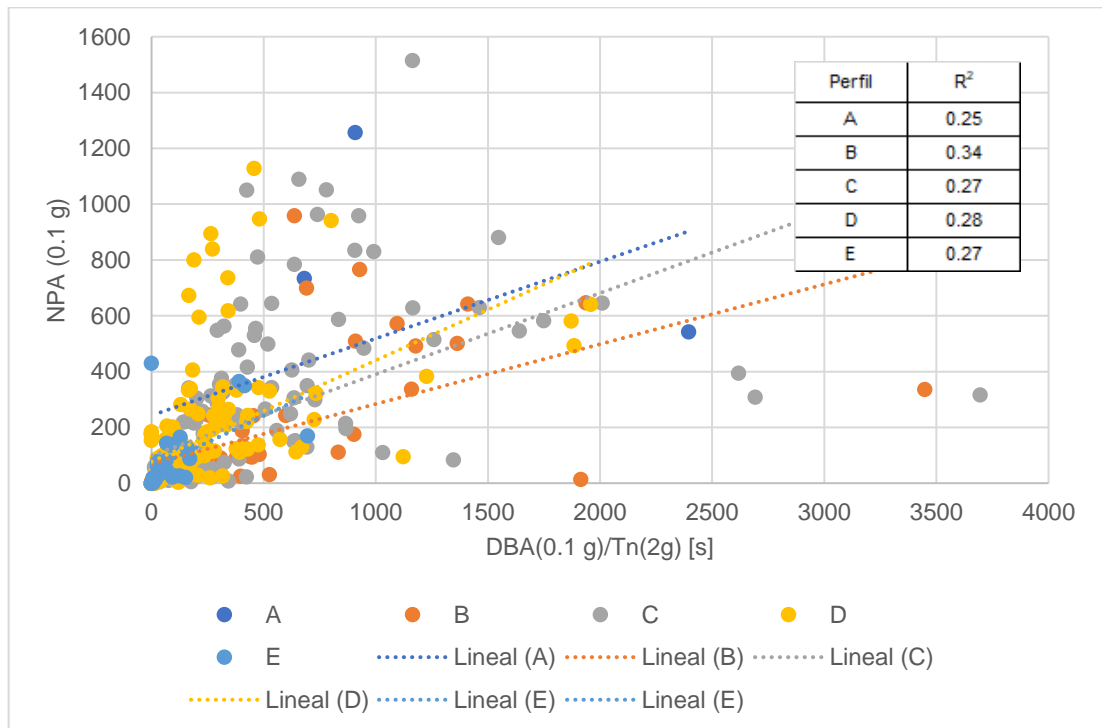


Figura 128. Correlación entre  $DBR(75\%)/T_{avg}$  y  $NPR(60\%)$

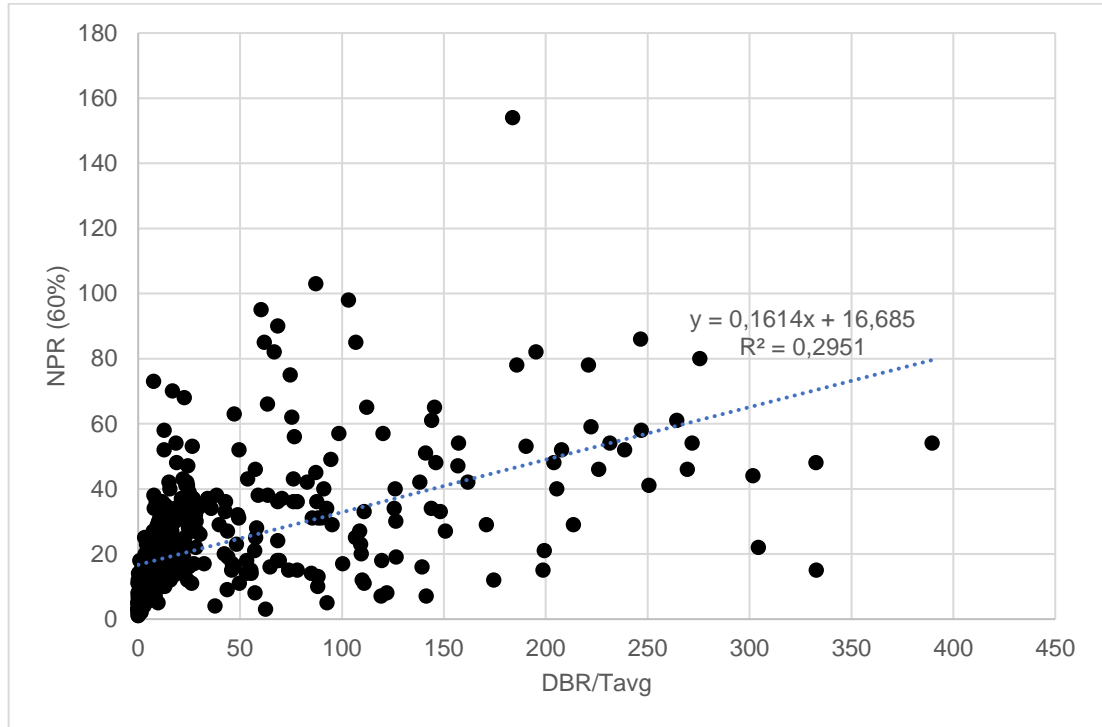


Figura 129. Correlación entre  $DBR(75\%)/T_{avg}$  y  $NPR(60\%)$ , según perfil de suelo

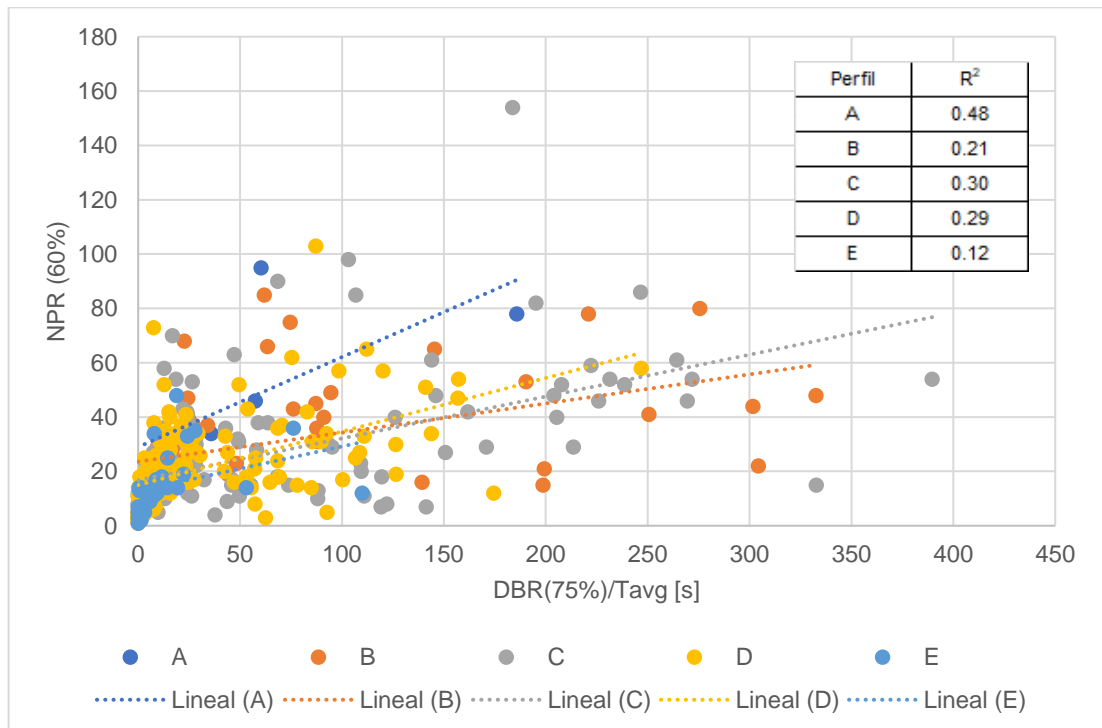


Figura 130. Correlación entre DBR(75%)/T0 y NPR(60%)

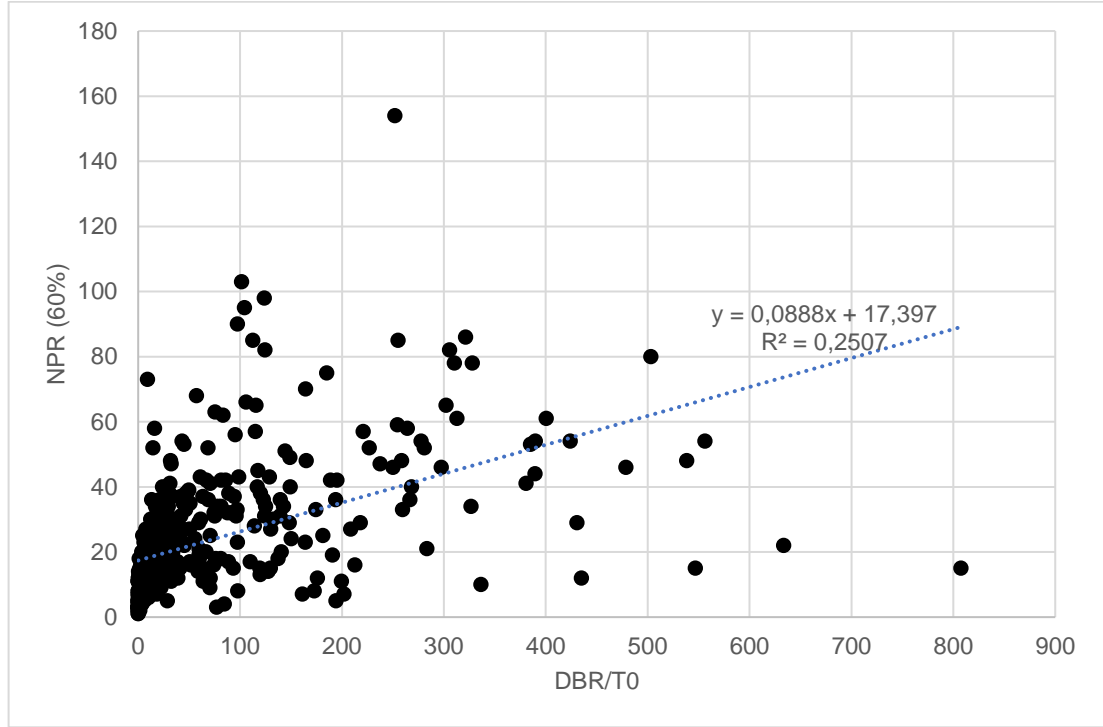


Figura 131. Correlación entre DBR(75%)/T0 y NPR(60%), según perfil de suelo

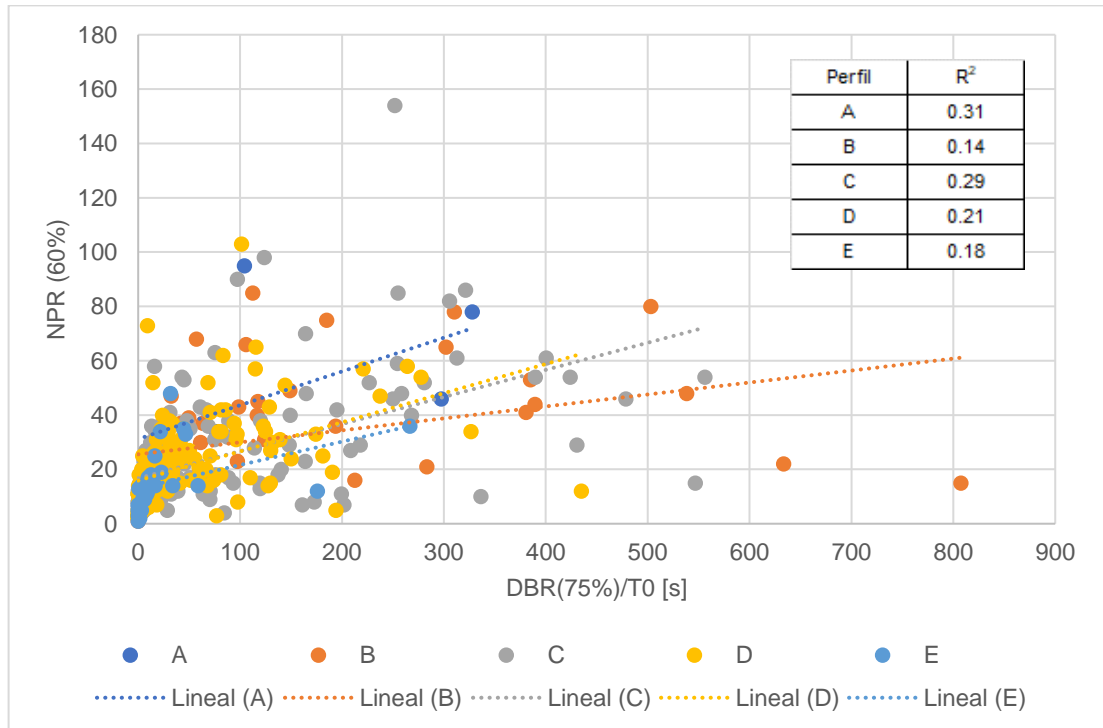


Figura 132. Correlación entre DBR(75%)/Tn(1.2g) y NPR(60%)

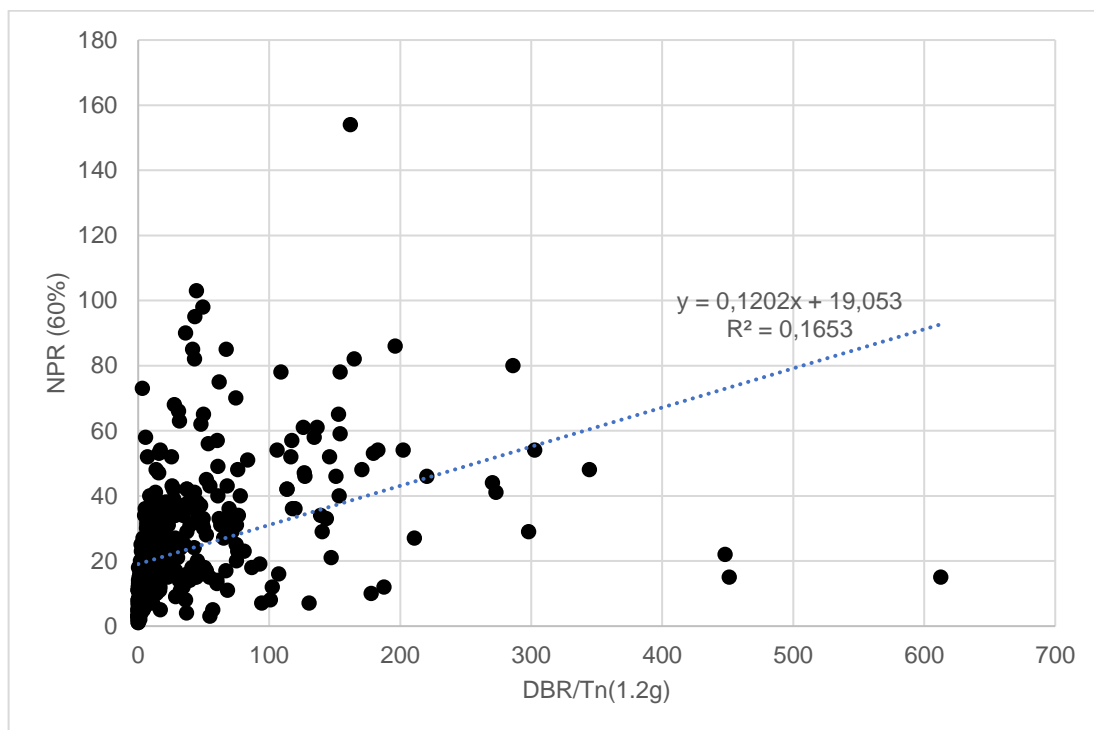


Figura 133. Correlación entre DBR(75%)/Tn(1.2g) y NPR(60%), según perfil de suelo

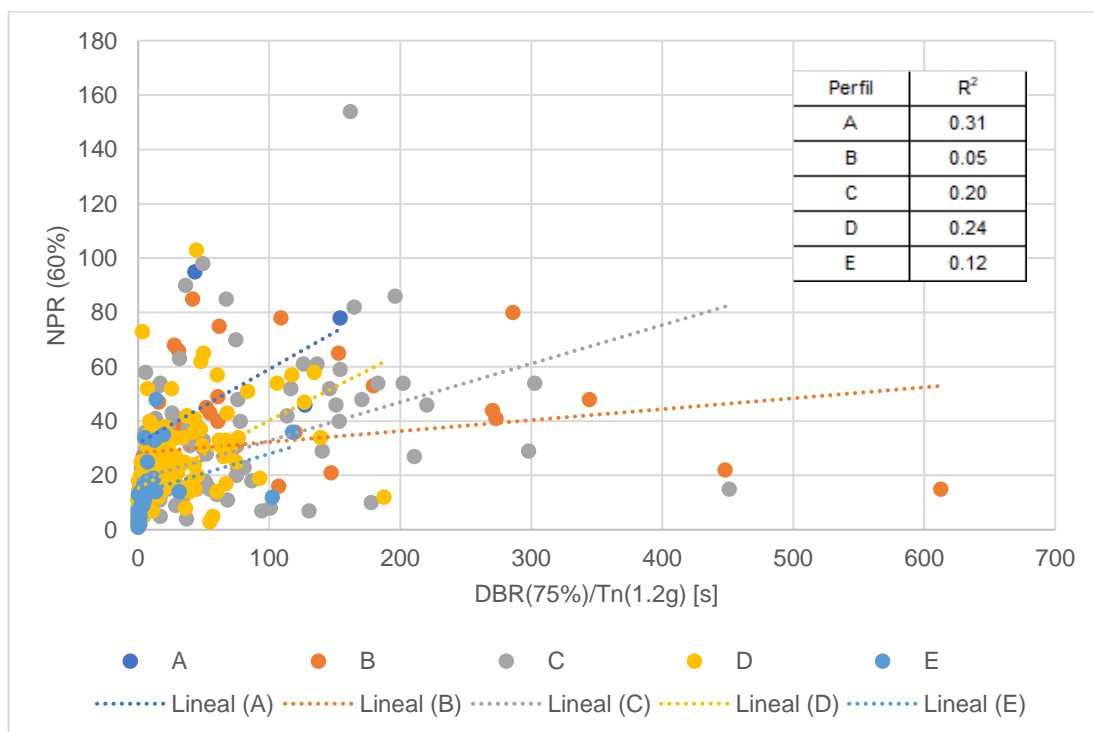


Figura 134. Correlación entre DBR(75%)/Tn(1.75g) y NPR(60%)

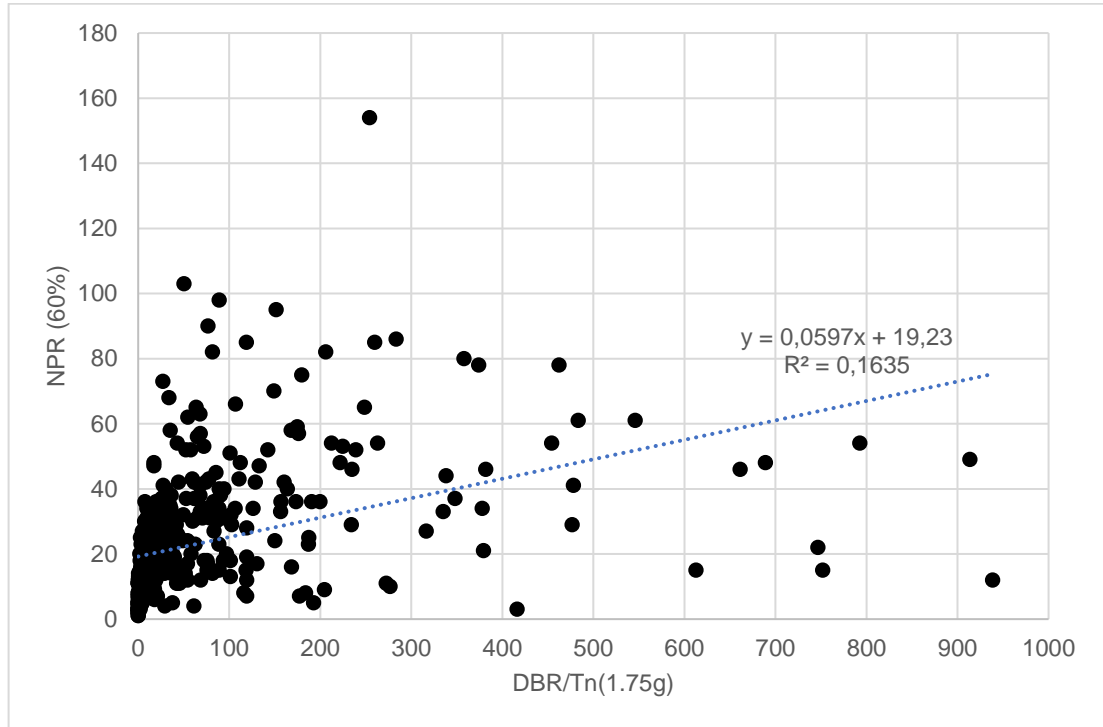


Figura 135. Correlación entre DBR(75%)/Tn(1.75g) y NPR(60%), según perfil de suelo

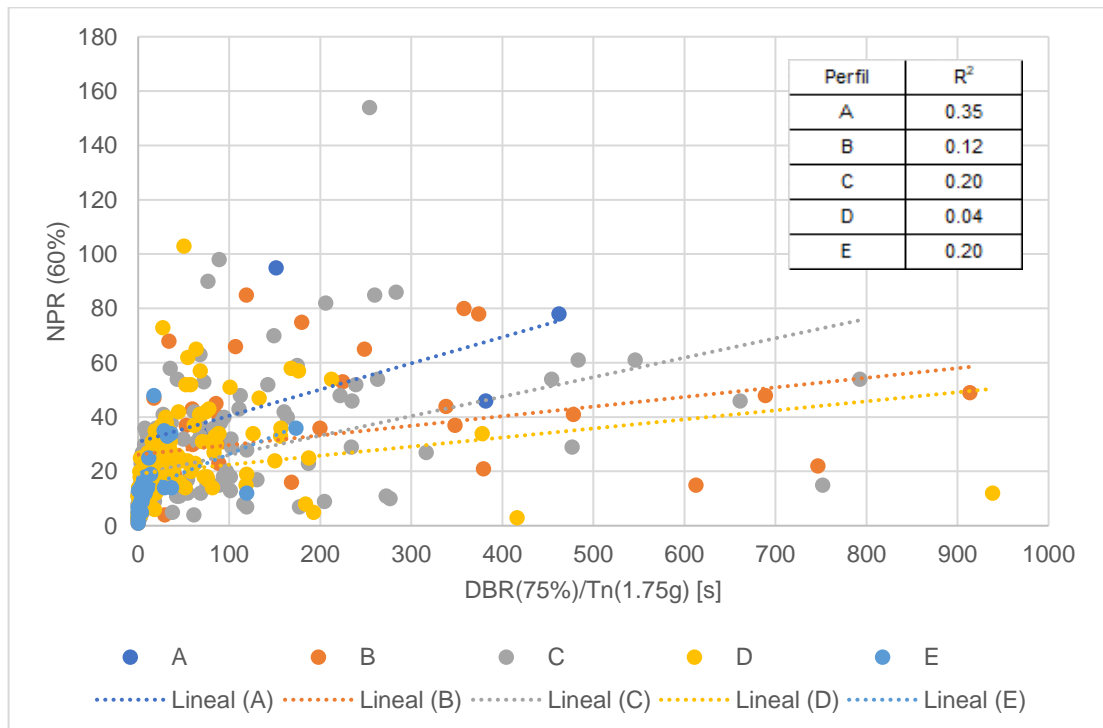


Figura 136. Correlación entre DBR(75%)/Tn(2g) y NPR(60%)

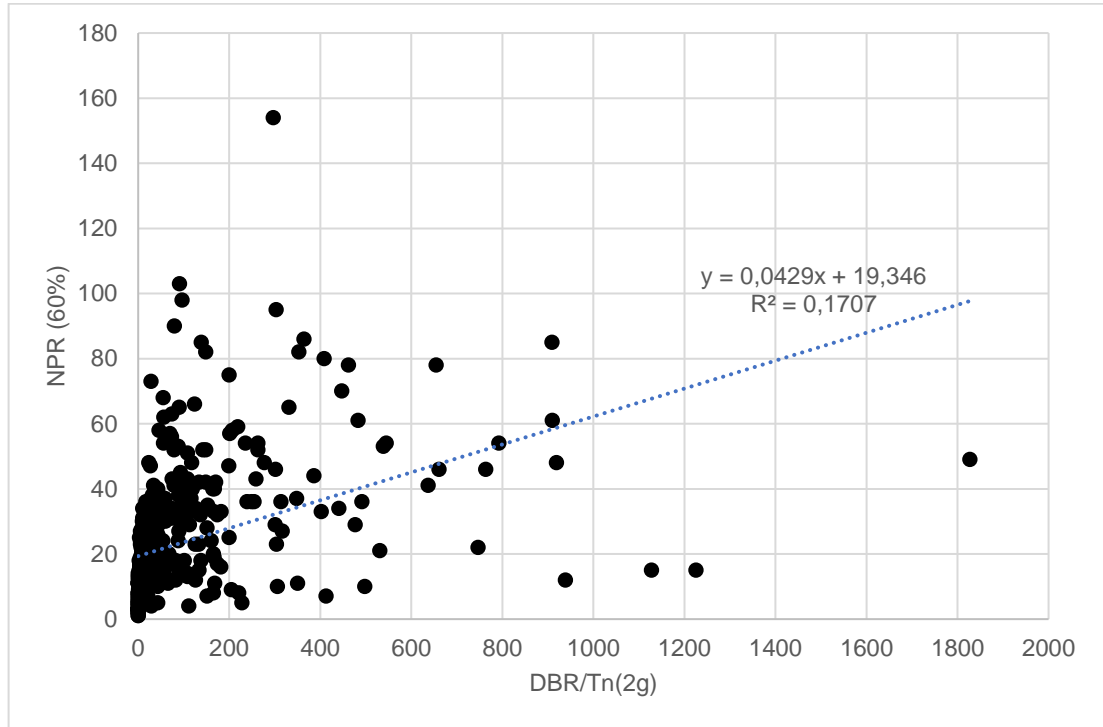


Figura 137. Correlación entre DBR(75%)/Tn(2g) y NPR(60%), según perfil de suelo

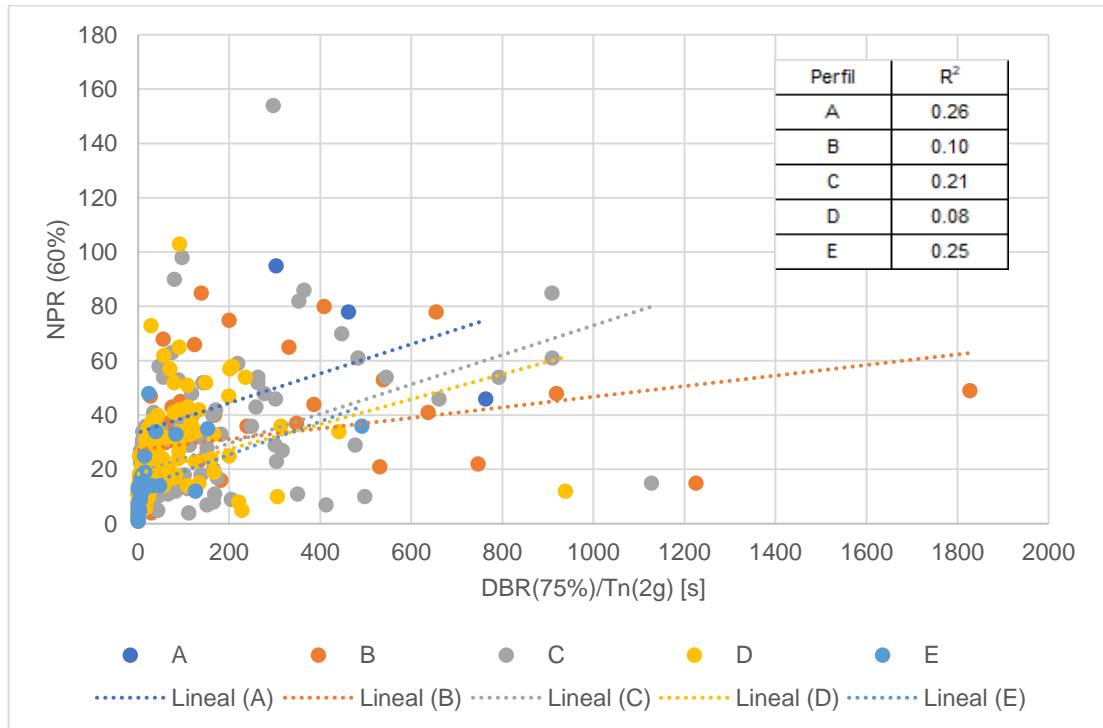


Figura 138. Correlación entre DUA(0.1g)/Tavg y NPA(0.1g)

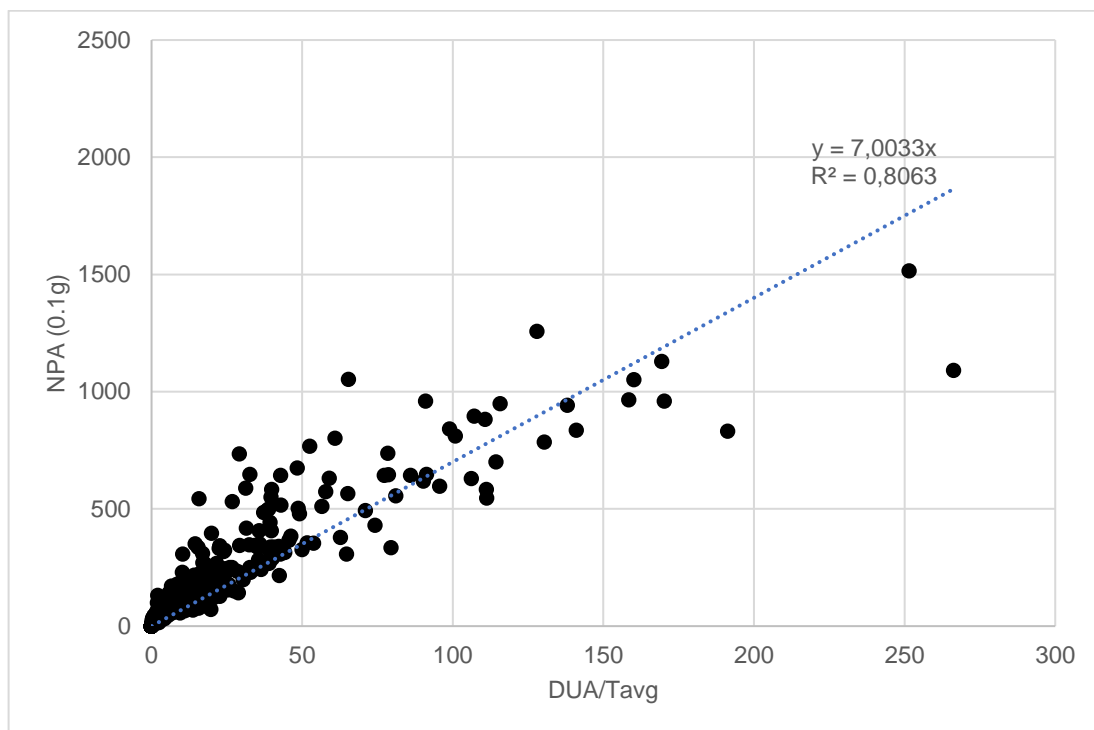


Figura 139. Correlación entre DUA(0.1g)/Tavg y NPA(0.1g), según perfil de suelo

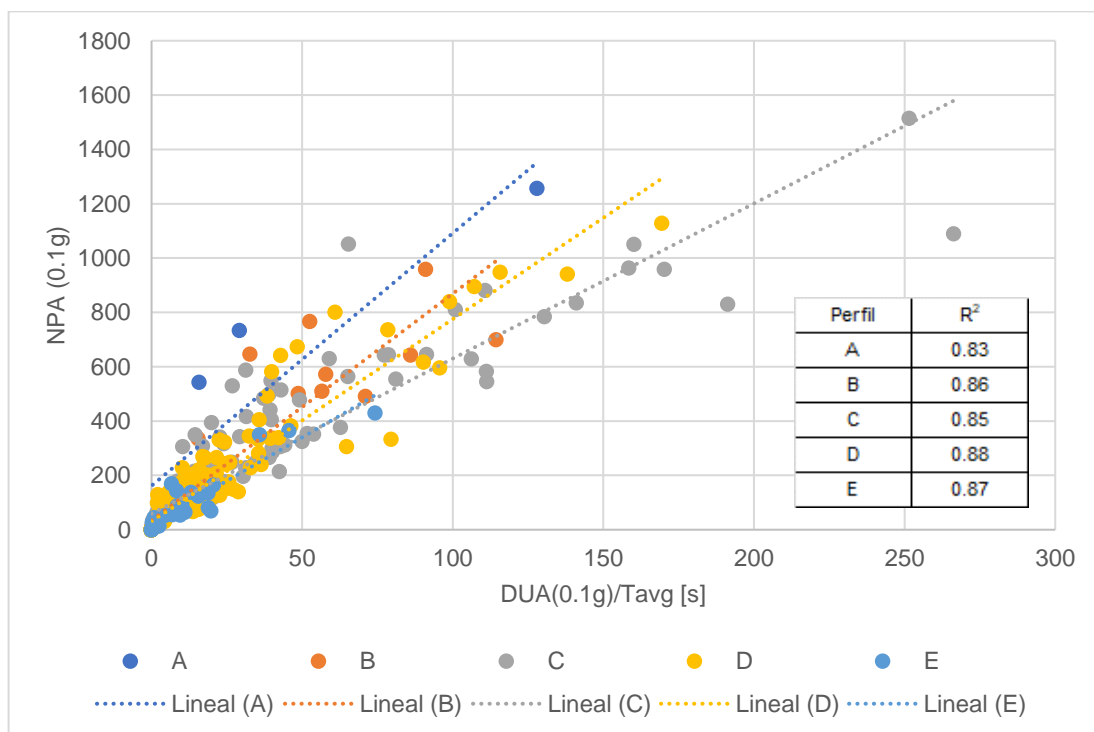


Figura 140. Correlación entre DUA(0.1g)/T0 y NPA(0.1g)

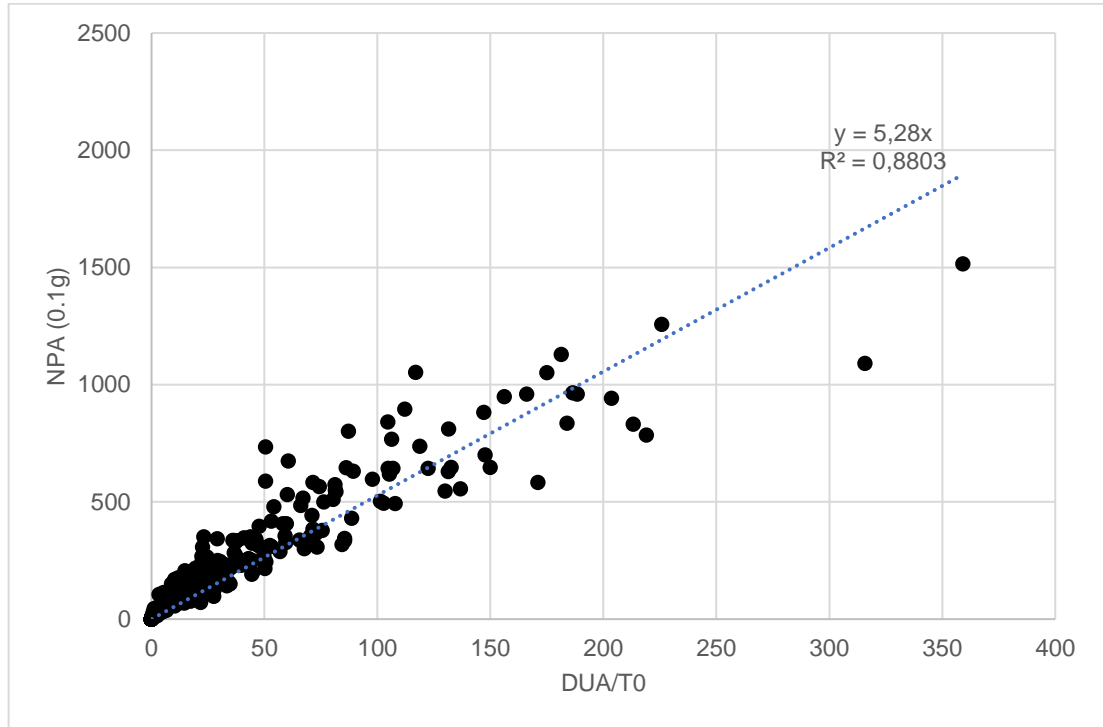


Figura 141. Correlación entre DUA(0.1g)/T0 y NPA(0.1g), según perfil de suelo

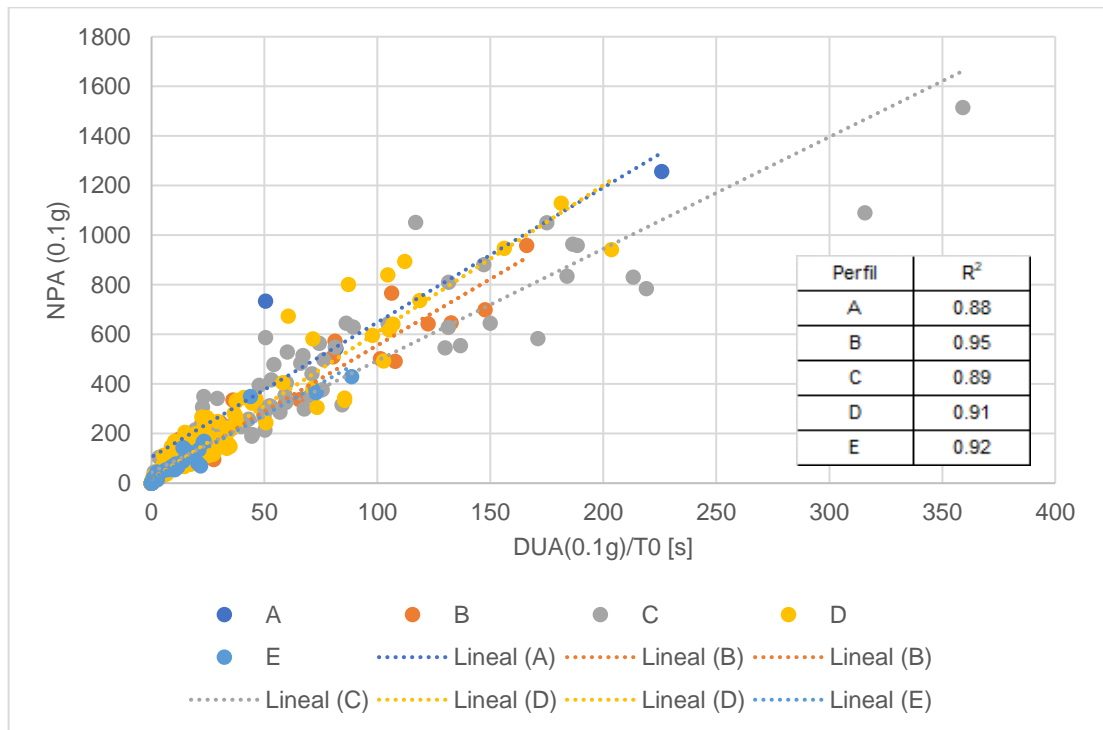


Figura 142. Correlación entre DUA(0.1g)/Tn(1.2g) y NPA(0.1g)

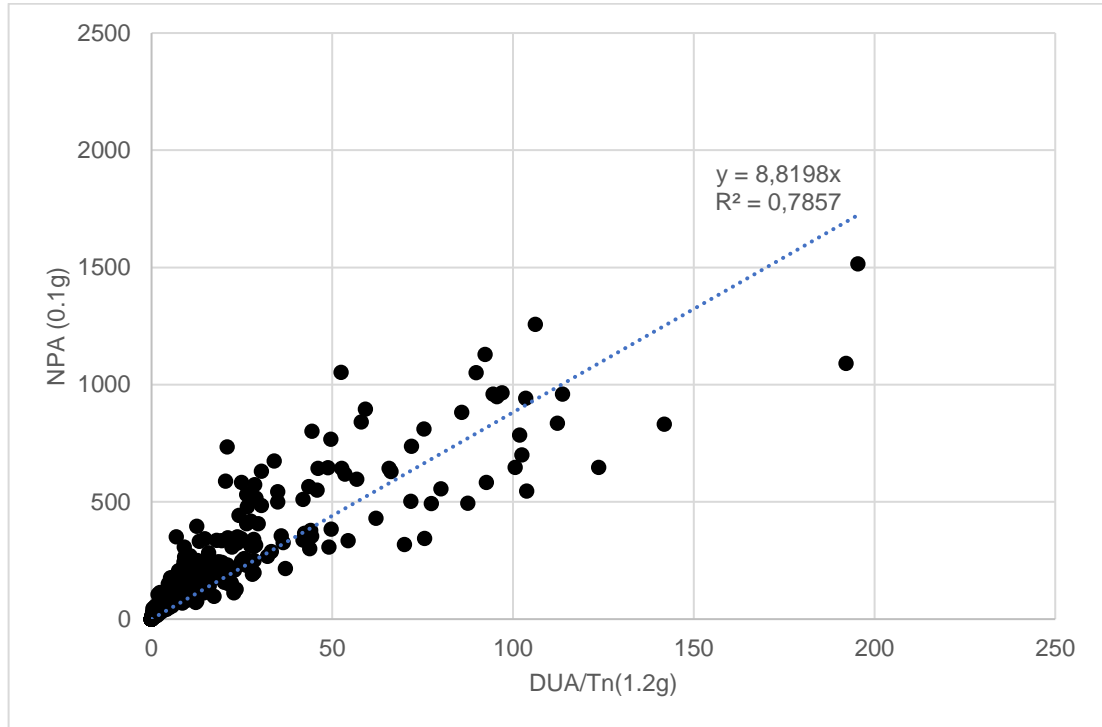


Figura 143. Correlación entre DUA(0.1g)/Tn(1.2g) y NPA(0.1g), según perfil de suelo

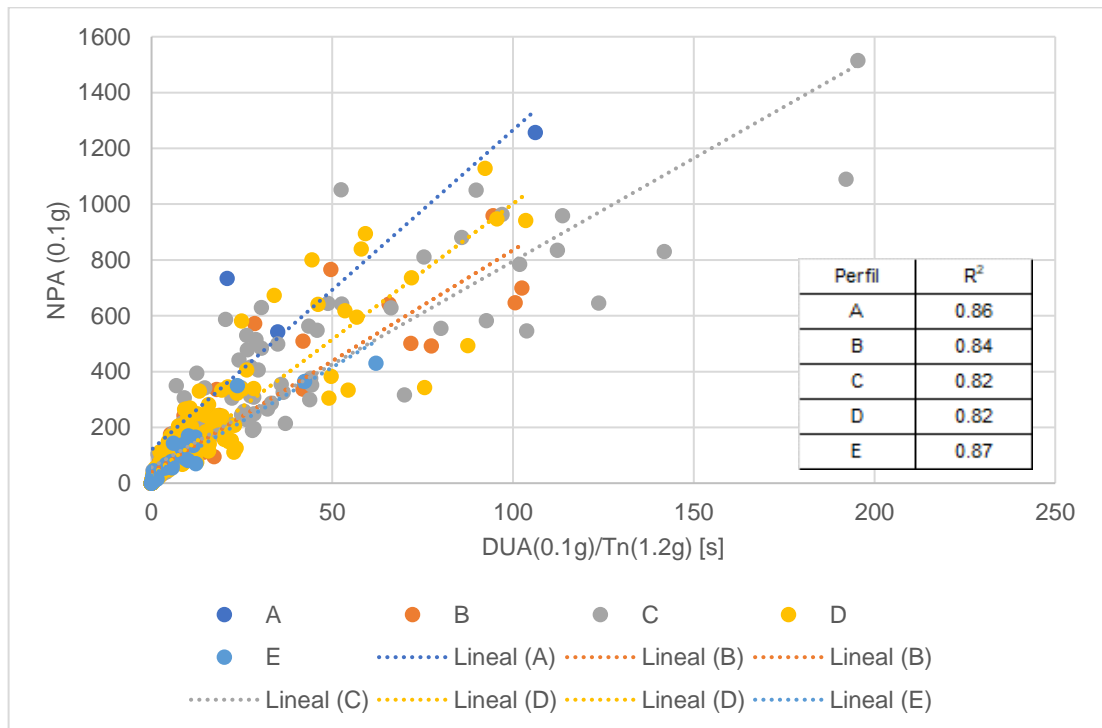


Figura 144. Correlación entre DUA(0.1g)/Tn(1.75g) y NPA(0.1g)

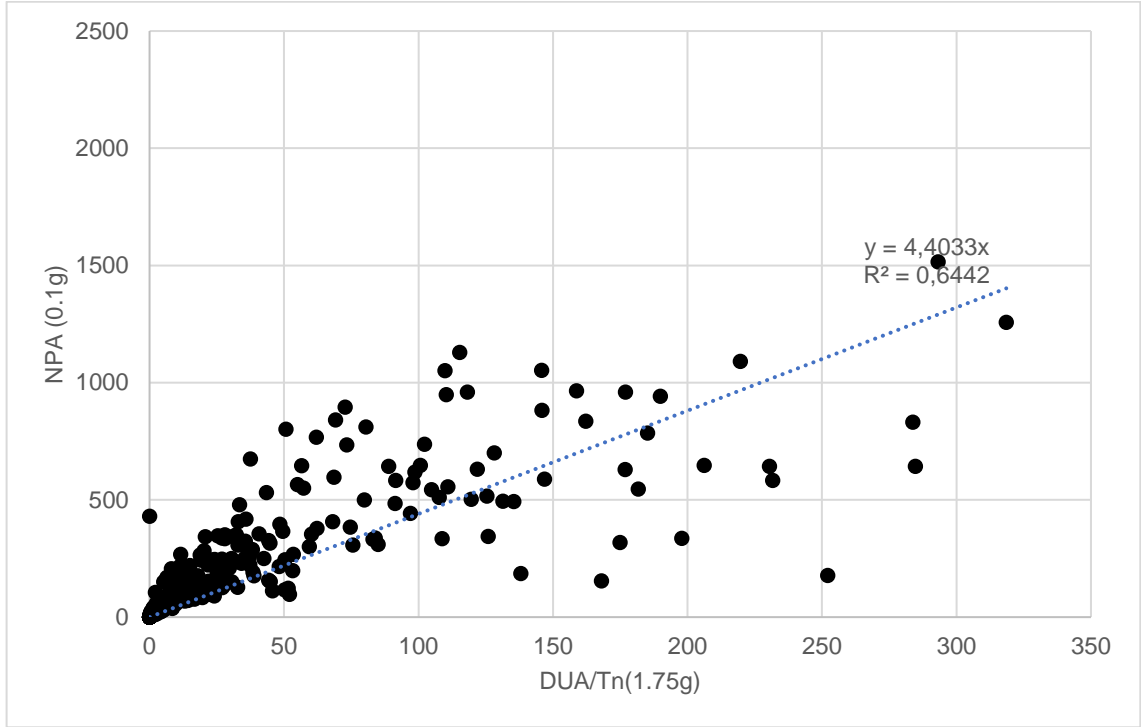


Figura 145. Correlación entre DUA(0.1g)/Tn(1.75g) y NPA(0.1g), según perfil de suelo

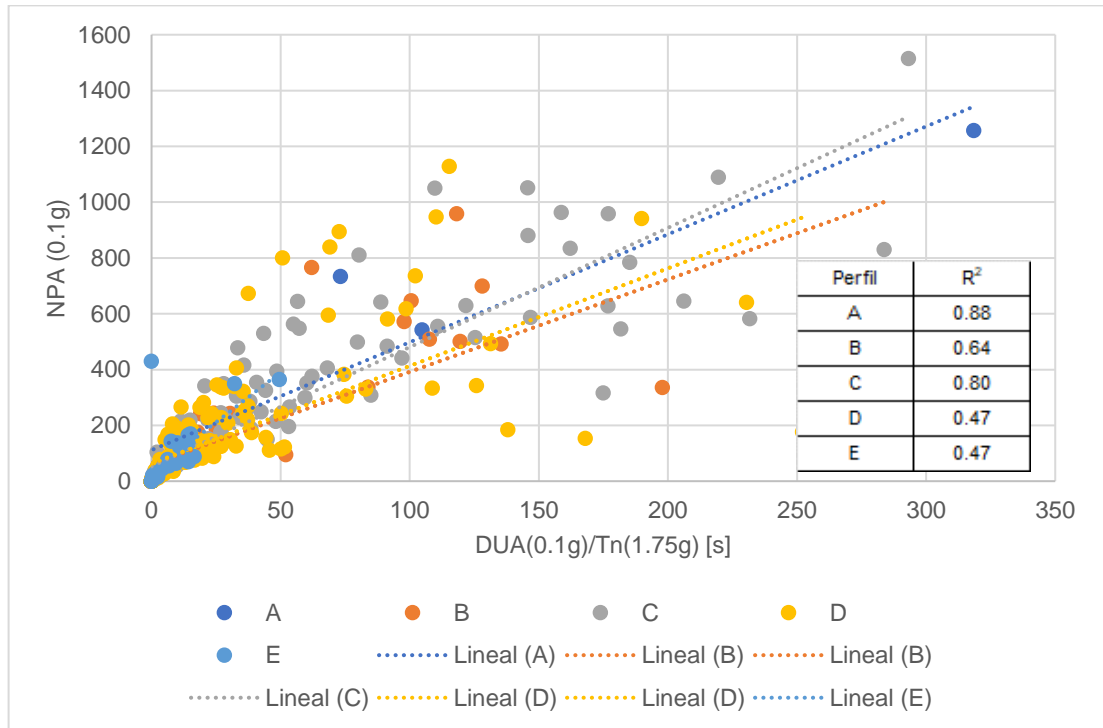


Figura 146. Correlación entre DUA(0.1g)/Tn(2g) y NPA(0.1g)

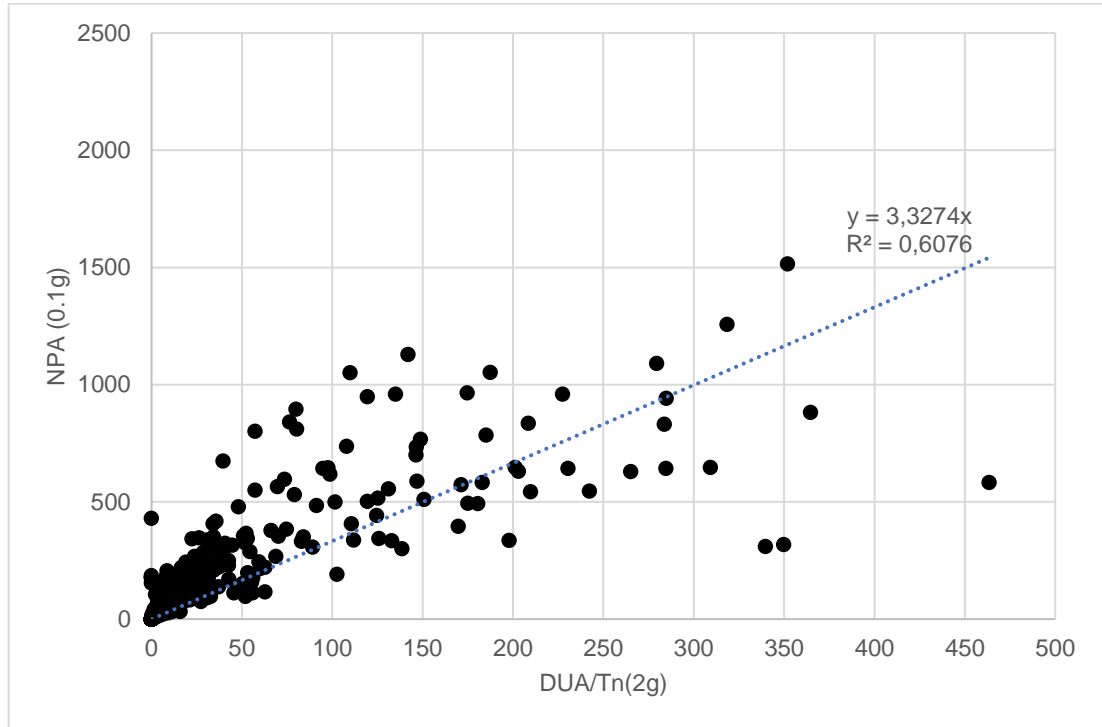


Figura 147. Correlación entre DUA(0.1g)/Tn(2g) y NPA(0.1g), según perfil de suelo

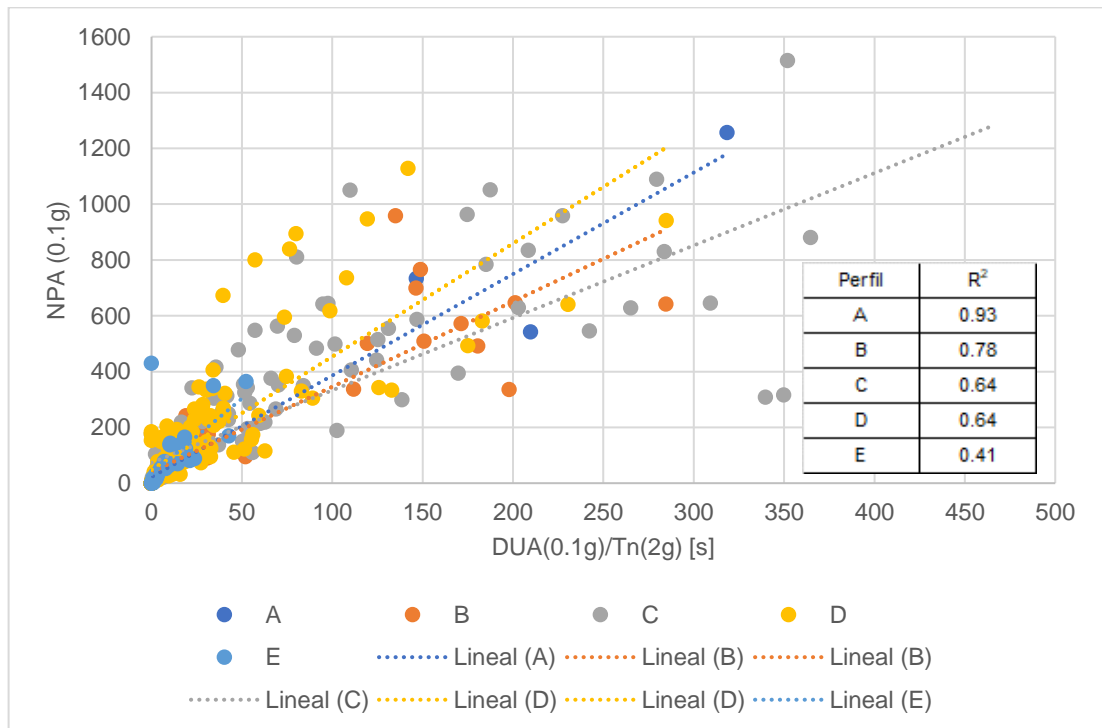


Figura 148. Correlación entre  $DUS(75\%I)/T_{avg}$  y  $NPA(0.1g)$

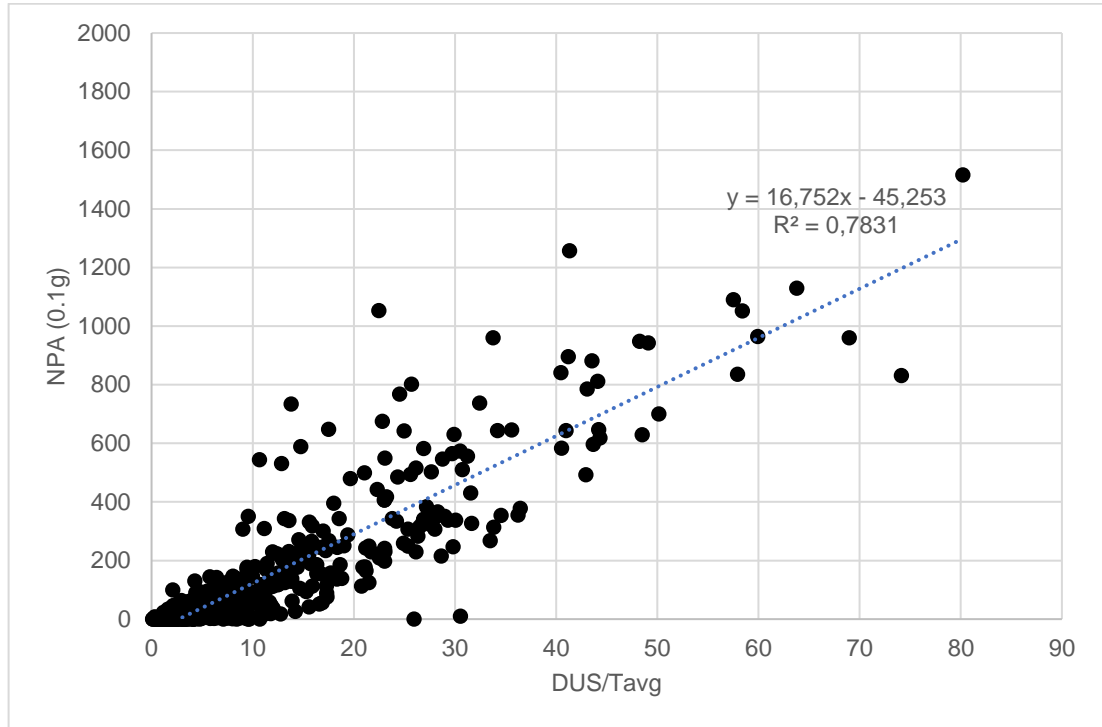


Figura 149. Correlación entre  $DUS(75\%I)/T_{avg}$  y  $NPA(0.1g)$ , según perfil de suelo

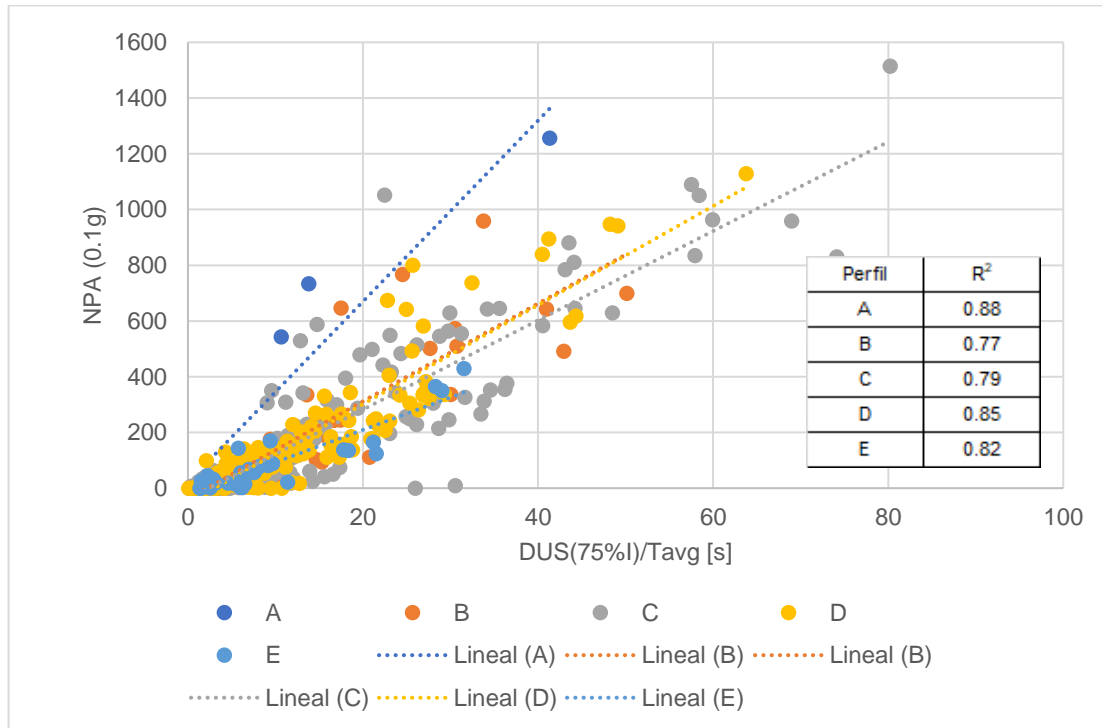


Figura 150. Correlación entre DUS(75%I)/T0 y NPA(0.1g)

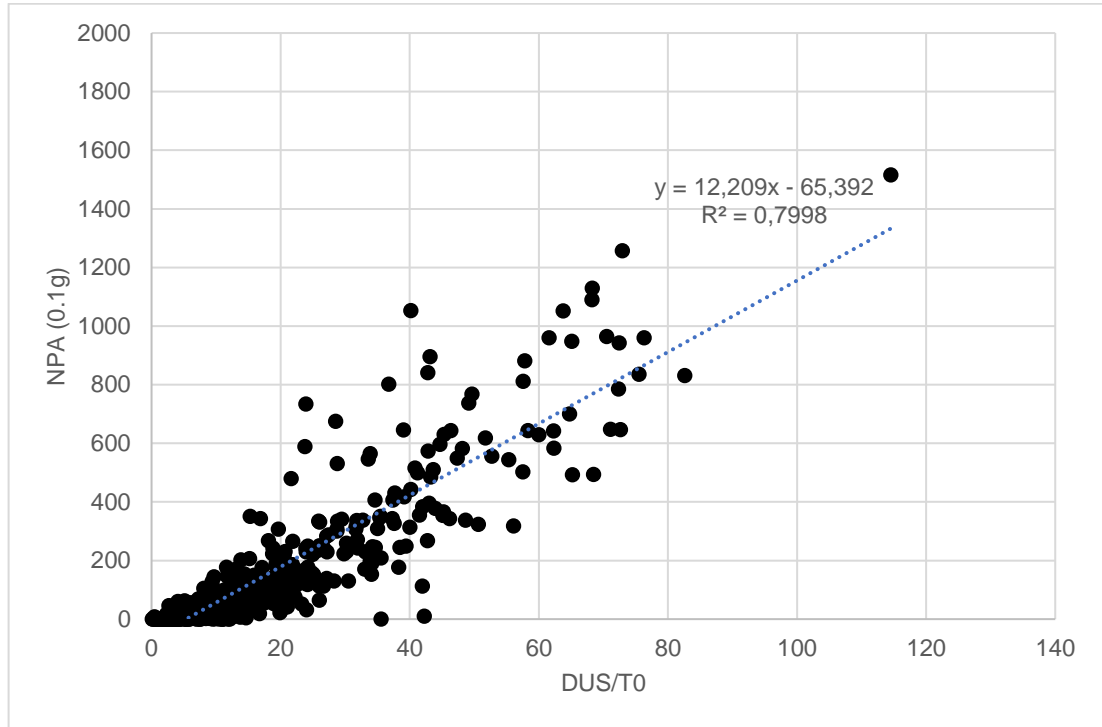


Figura 151. Correlación entre DUS(75%I)/T0 y NPA(0.1g), según perfil de suelo

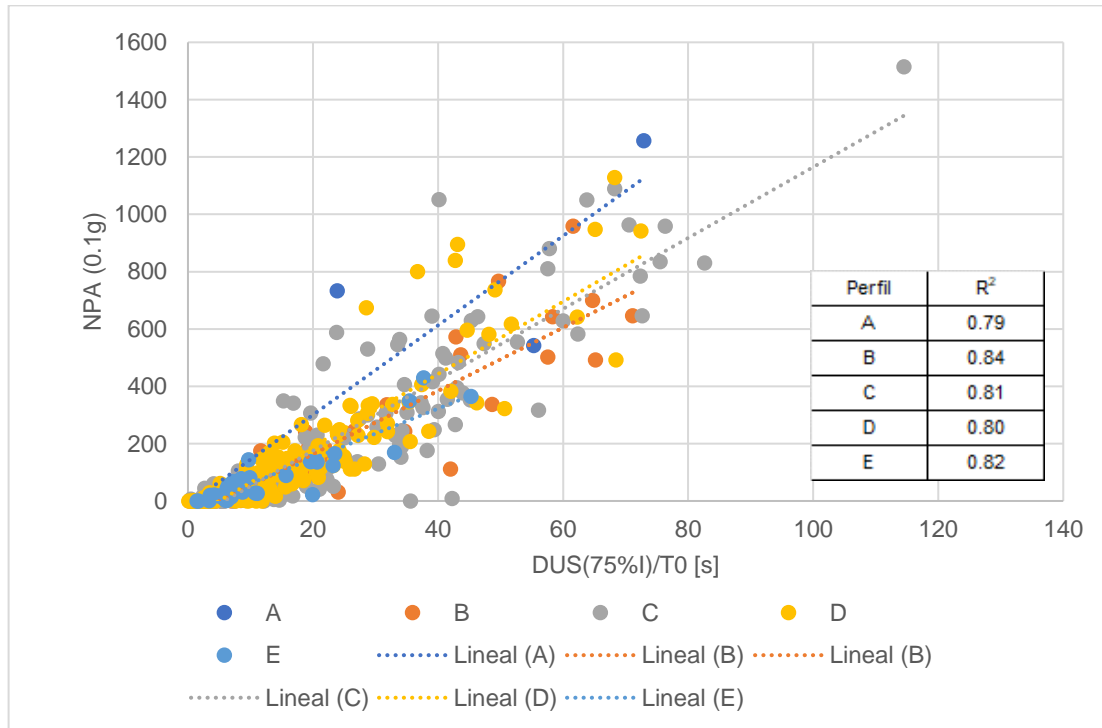


Figura 152. Correlación entre DUS(75%I)/Tn(1.2g) y NPA(0.1g)

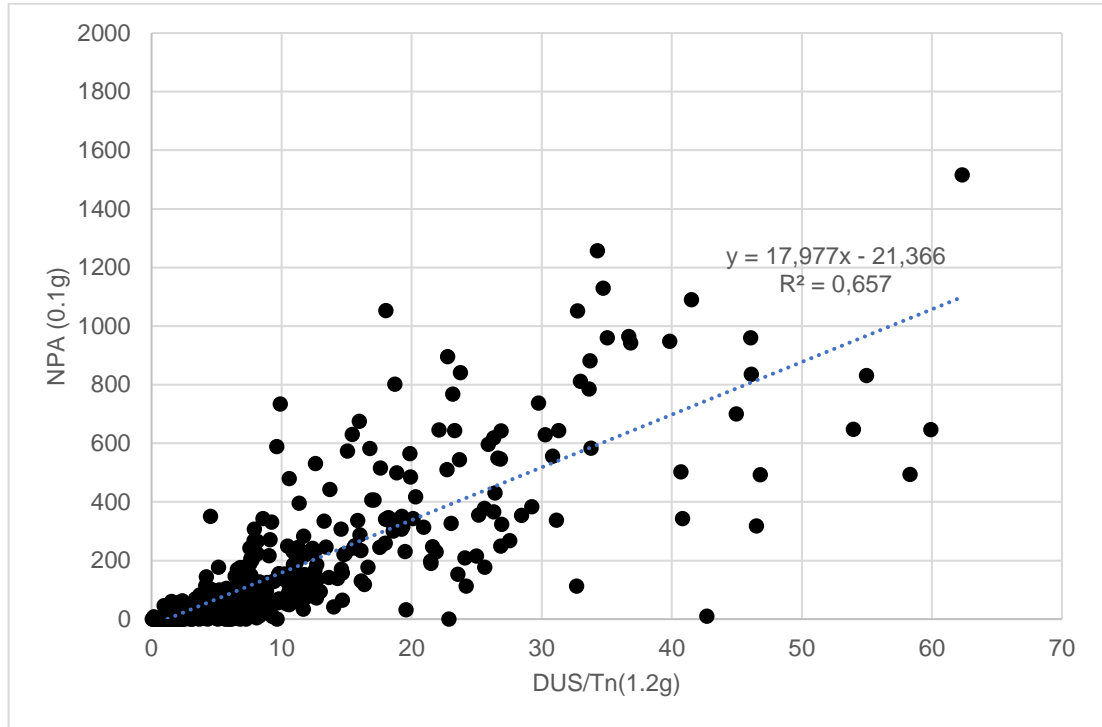


Figura 153. Correlación entre DUS(75%I)/Tn(1.2g) y NPA(0.1g), según perfil de suelo

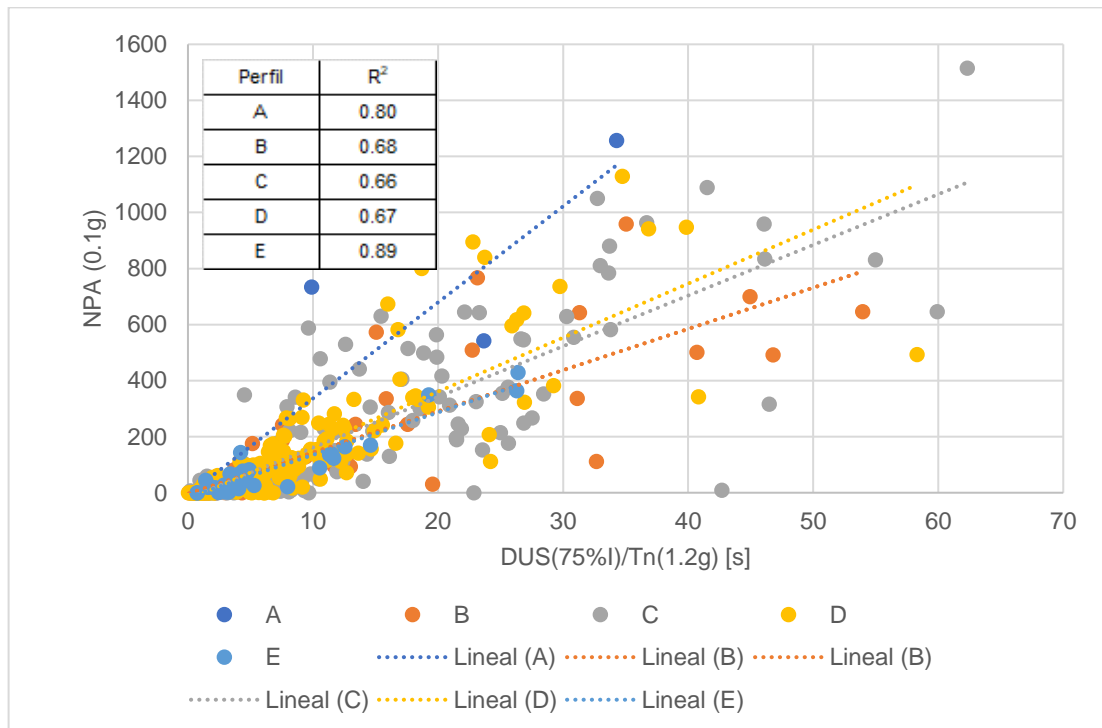


Figura 154. Correlación entre  $DUS(75\%I)/Tn(1.75g)$  y  $NPA(0.1g)$

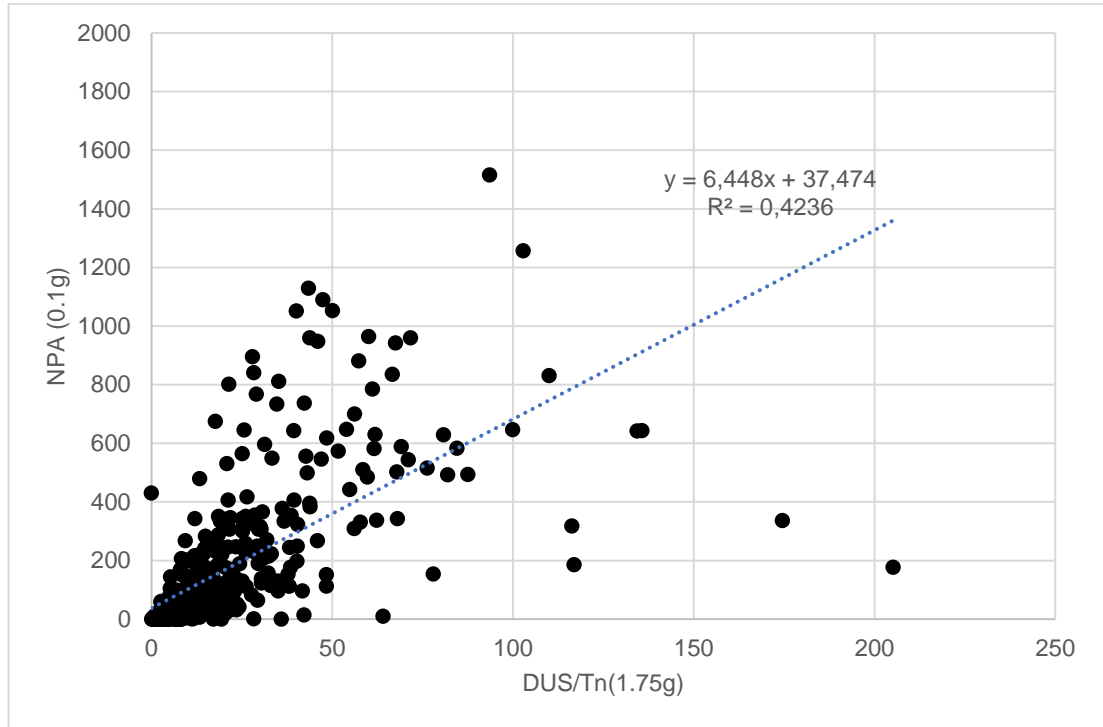


Figura 155. Correlación entre  $DUS(75\%I)/Tn(1.75g)$  y  $NPA(0.1g)$ , según perfil de suelo

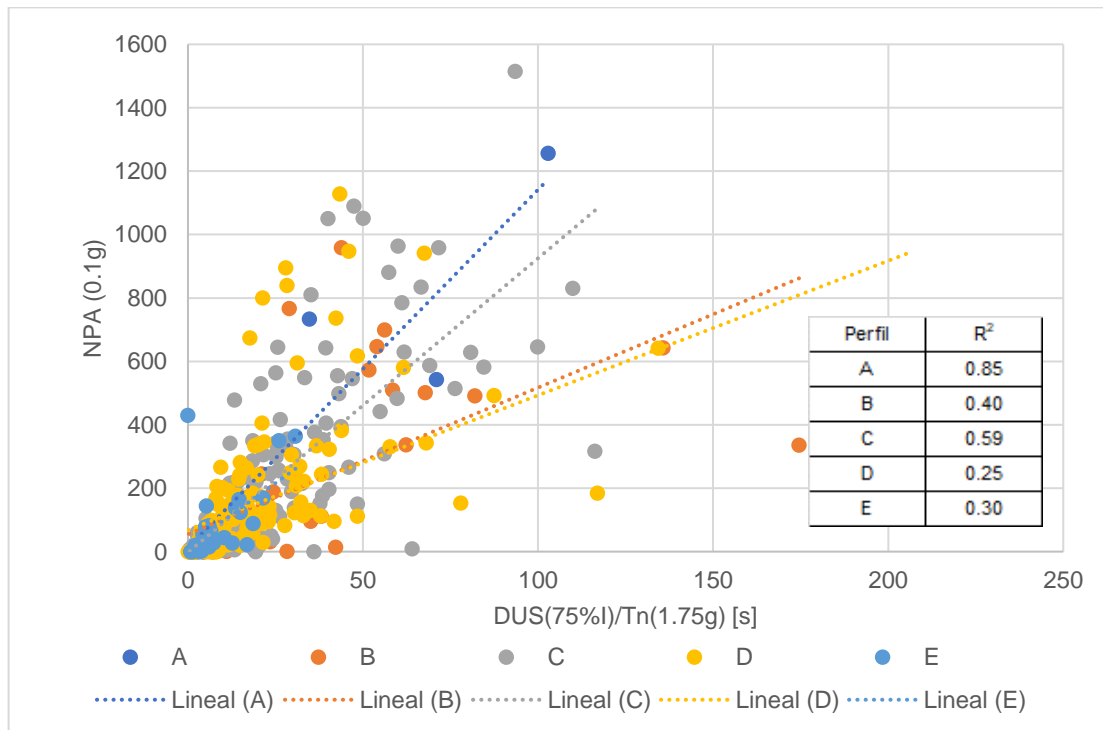


Figura 156. Correlación entre DUS(75%I)/Tn(2g) y NPA(0.1g)

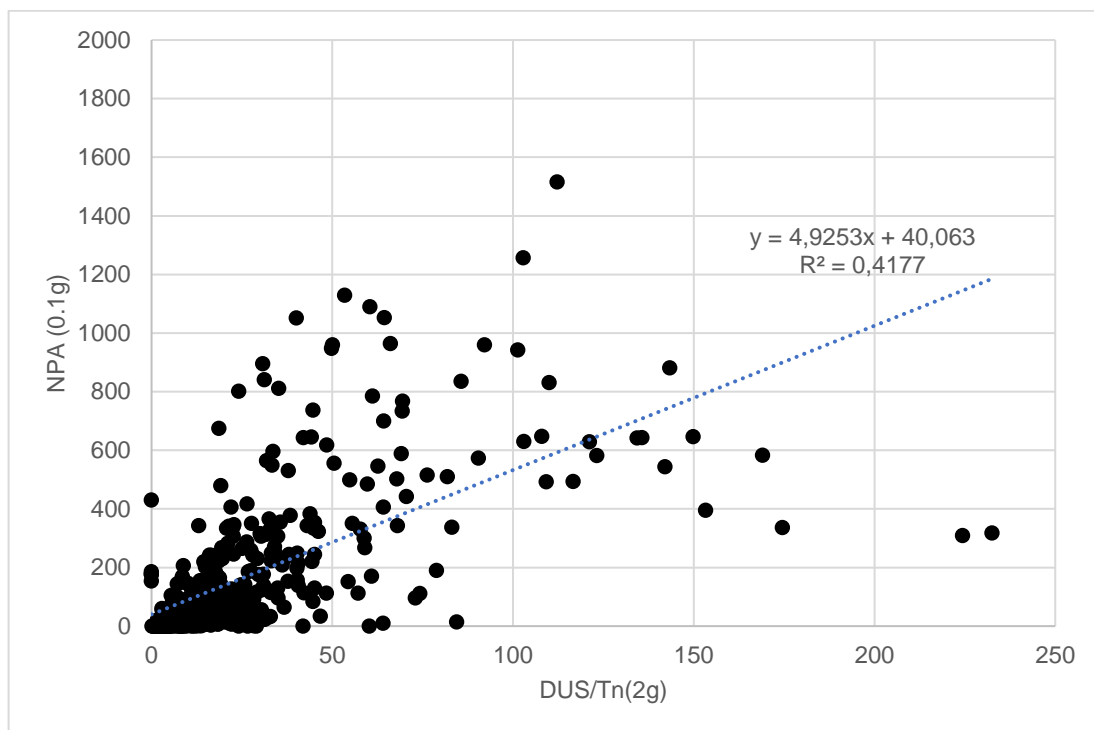


Figura 157. Correlación entre DUS(75%I)/Tn(2g) y NPA(0.1g), según perfil de suelo

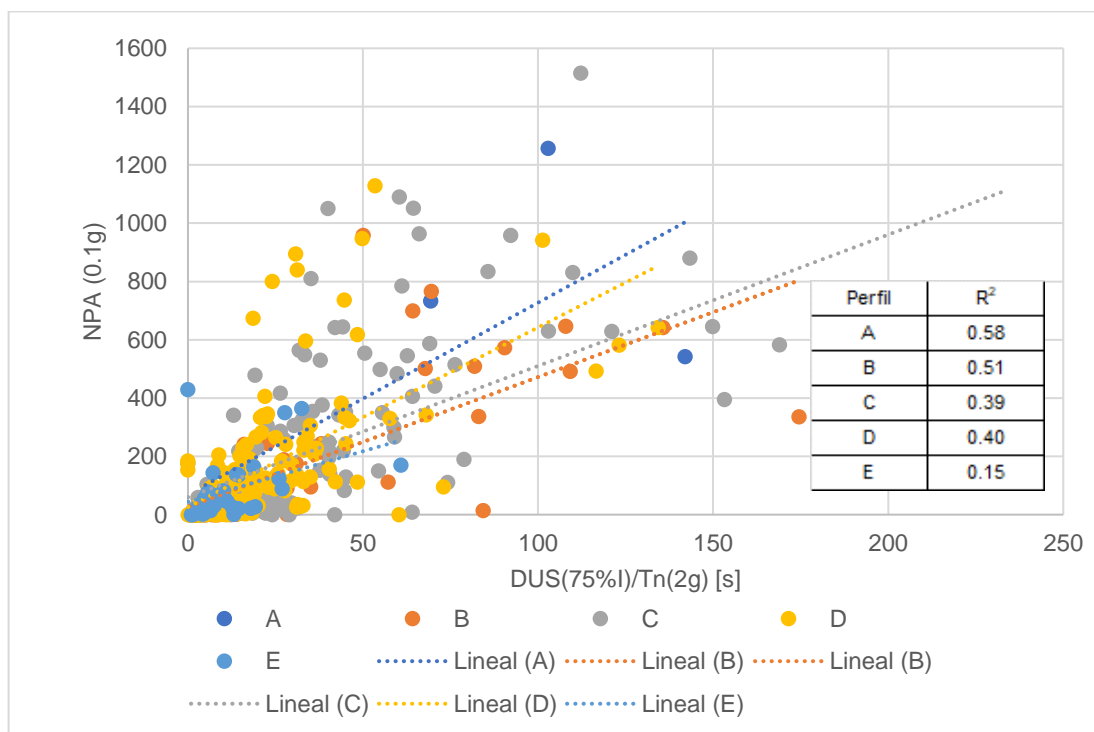


Figura 158. Correlación entre DSR(5-75%)/Tavg y NPA(0.05g)

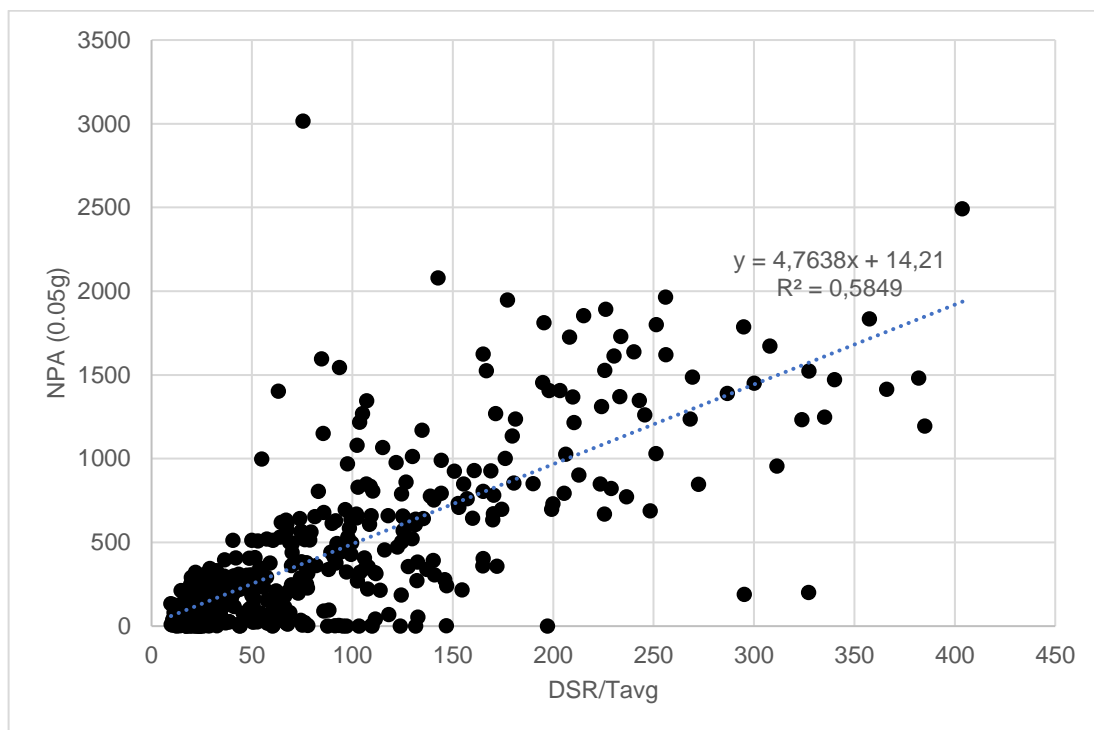


Figura 159. Correlación entre DSR(5-75%)/Tavg y NPA(0.05g), según perfil de suelo

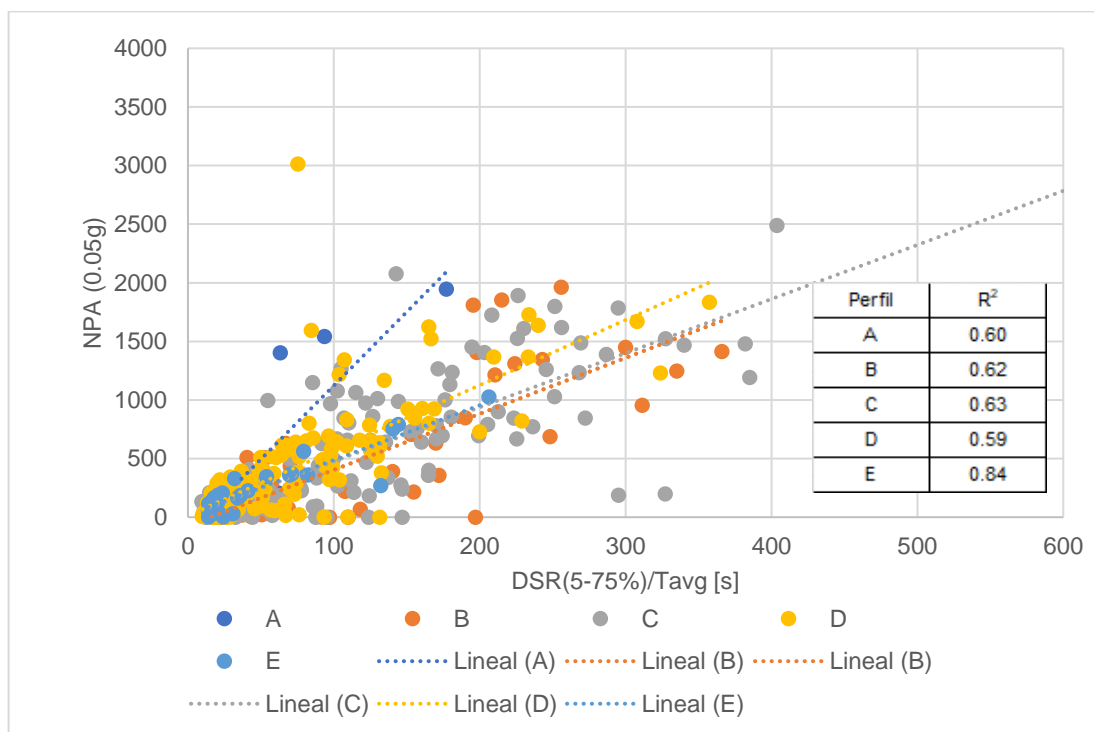


Figura 160. Correlación entre DSR(5-75%)/T0 y NPA(0.05g)

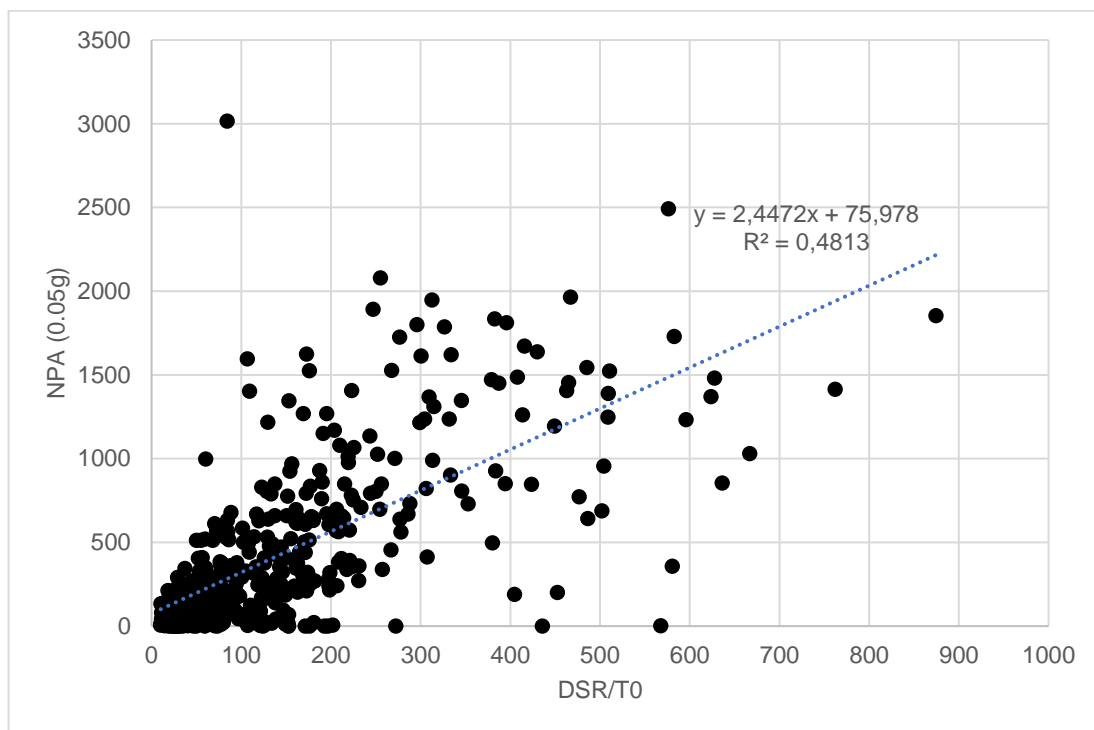


Figura 161. Correlación entre DSR(5-75%)/T0 y NPA(0.05g), según perfil de suelo

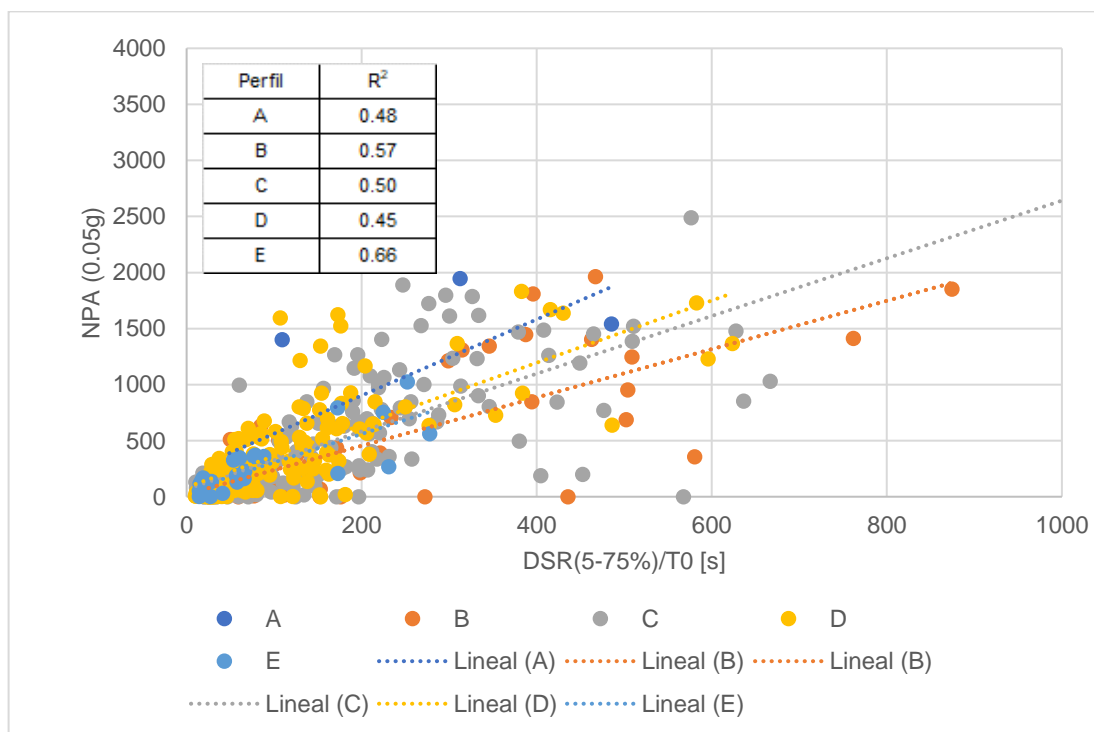


Figura 162. Correlación entre DSR(5-75%)/Tn(1.2g) y NPA(0.05g)

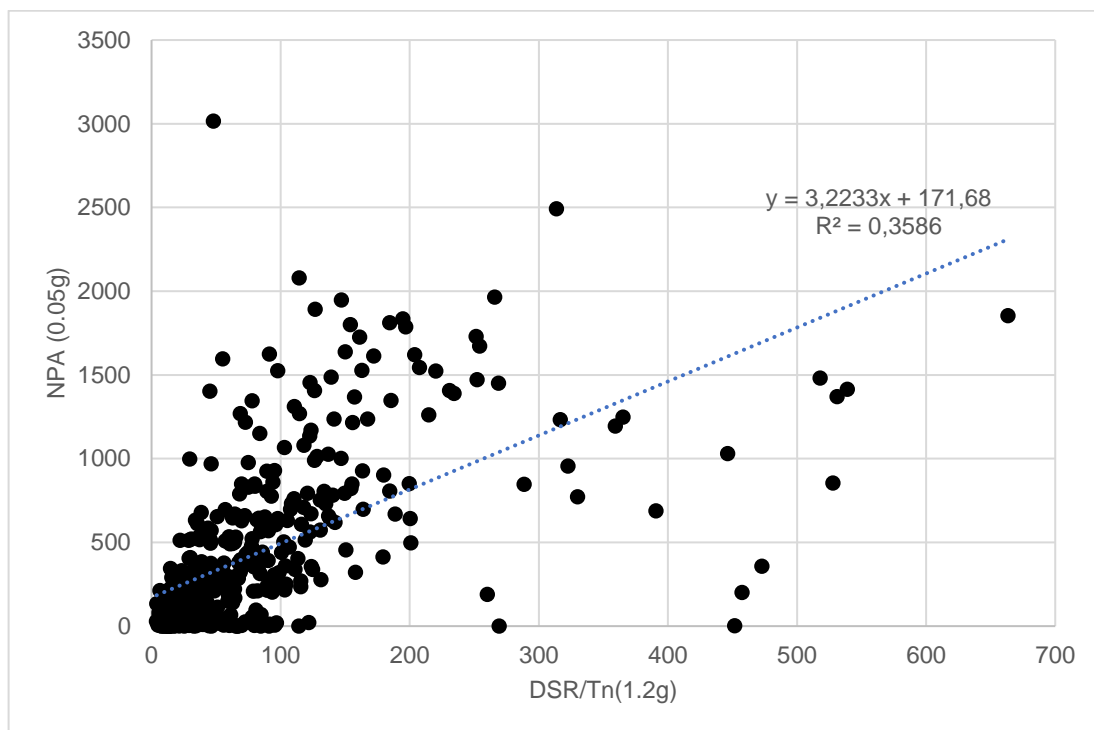


Figura 163. Correlación entre DSR(5-75%)/Tn(1.2g) y NPA(0.05g), según perfil de suelo

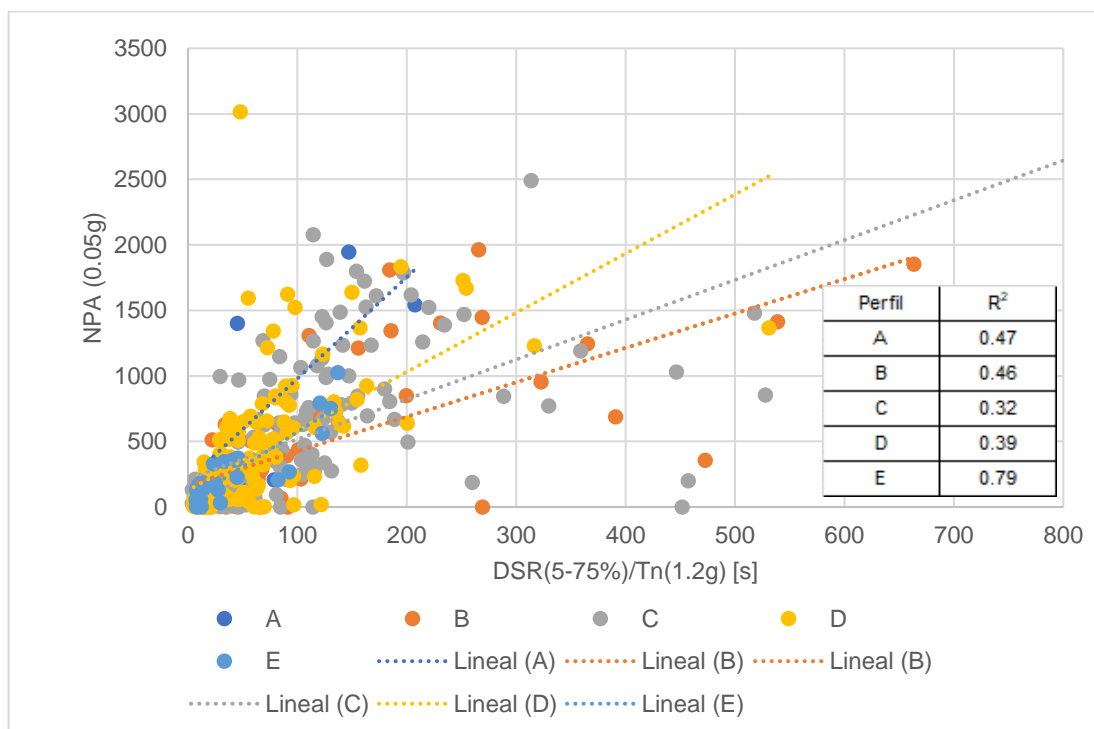


Figura 164. Correlación entre DSR(5-75%)/Tn(1.75g) y NPA(0.05g)

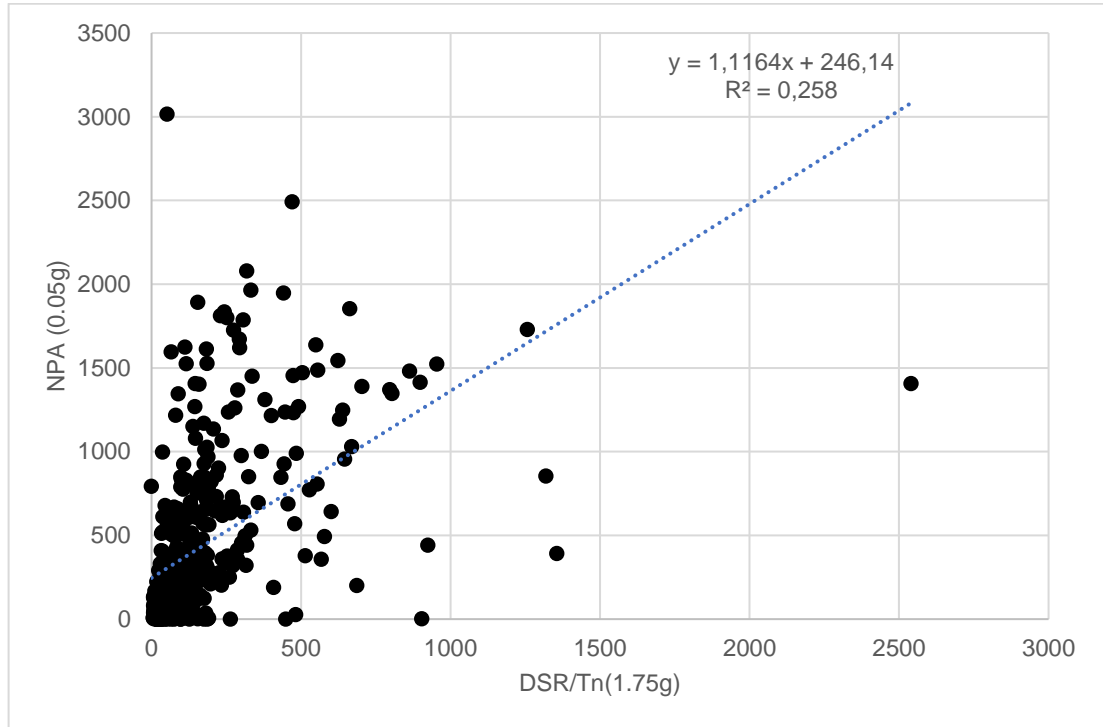


Figura 165. Correlación entre DSR(5-75%)/Tn(1.75g) y NPA(0.05g), según perfil de suelo

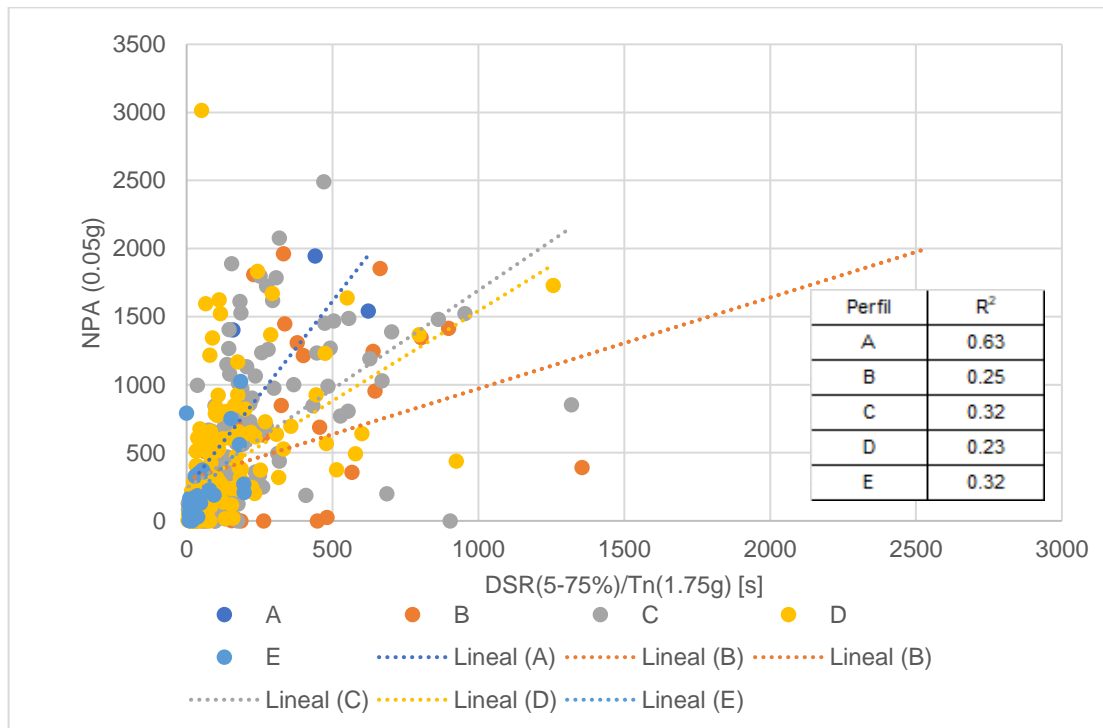


Figura 166. Correlación entre DSR(5-75%)/Tn(2g) y NPA(0.05g)

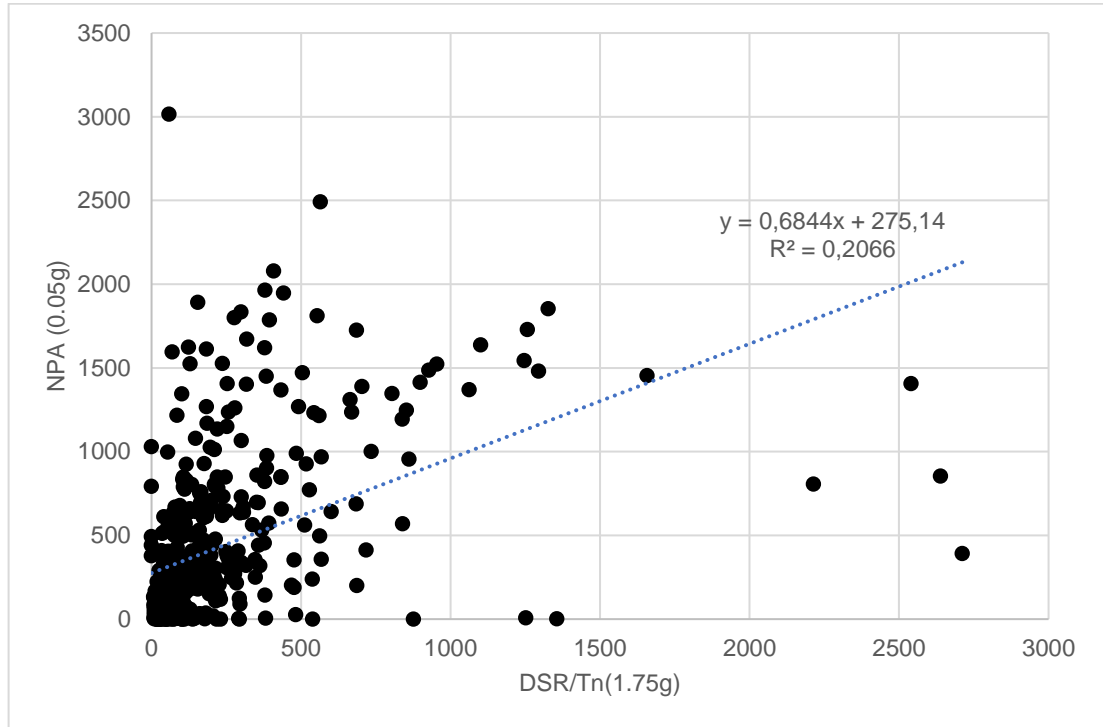


Figura 167. Correlación entre DSR(5-75%)/Tn(2g) y NPA(0.05g), según perfil de suelo

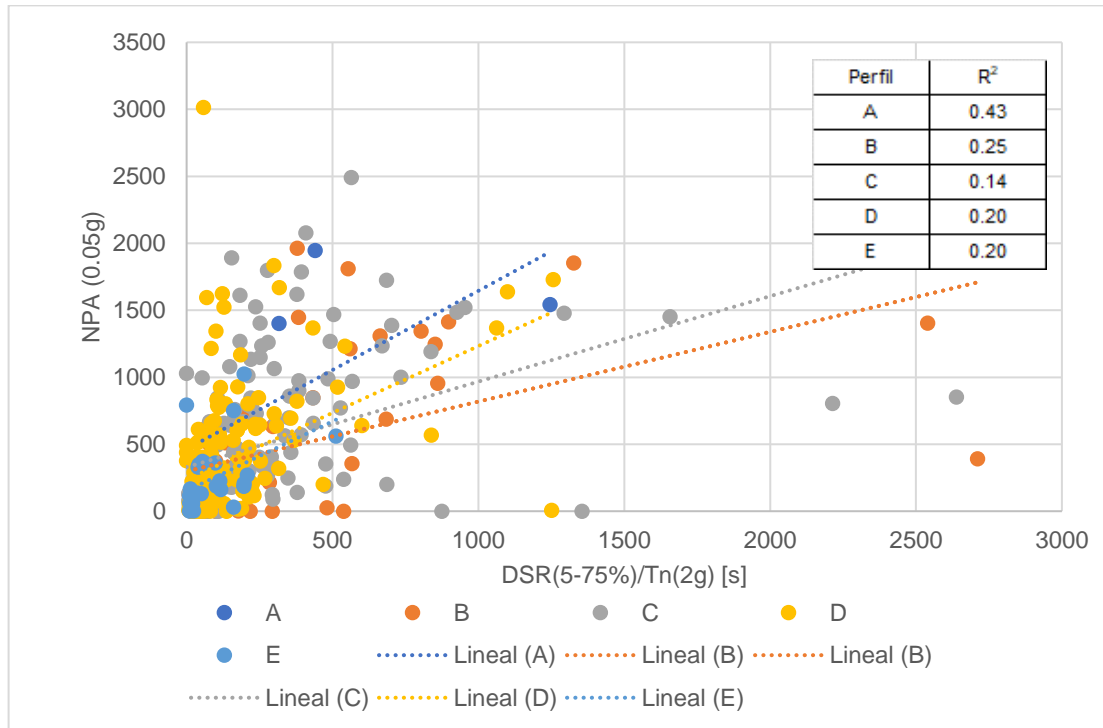


Tabla 19. Coeficiente de correlación entre número de ciclos y relación duración/periodo

	$T_{avg}$	$T_0$	$T_n(1.2g)$	$T_n(1.75g)$	$T_n(2g)$
<b><math>D_{BA}(0.1g)-N_{PA}(0.1g)</math></b>	0.724	0.736	0.593	0.438	0.428
<b><math>D_{BR}(75\%)-N_{PR}(60\%)</math></b>	0.295	0.251	0.165	0.164	0.171
<b><math>D_{UA}(0.1g)-N_{PA}(0.1g)</math></b>	0.834	0.894	0.811	0.686	0.660
<b><math>D_{US}(75\%I)-N_{PA}(0.1g)</math></b>	0.783	0.800	0.657	0.424	0.418
<b><math>D_{SR}(5-75\%)-N_{PA}(0.05g)</math></b>	0.585	0.481	0.359	0.258	0.207

Tabla 20. Coeficiente de correlación entre número de ciclos y relación duración/periodo, según tipo de suelo

		Coeficiente de correlación					
		A	B	C	D	E	Global
$D_{BA}-N_{PA}$	$T_{avg}$	0,93	0,61	0,82	0,63	0,93	0,70
	$T_0$	0,45	0,63	0,75	0,50	0,87	0,72
	$T_n(1.2g)$	0,49	0,52	0,63	0,41	0,92	0,53
	$T_n(1.75g)$	0,52	0,27	0,47	0,20	0,44	0,29
	$T_n(2g)$	0,25	0,34	0,27	0,28	0,27	0,26
$D_{BR}-N_{PR}$	$T_{avg}$	0,48	0,21	0,30	0,29	0,12	0,30
	$T_0$	0,31	0,14	0,29	0,21	0,18	0,25
	$T_n(1.2g)$	0,31	0,05	0,20	0,24	0,12	0,17
	$T_n(1.75g)$	0,35	0,12	0,20	0,04	0,20	0,16
	$T_n(2g)$	0,26	0,10	0,21	0,08	0,25	0,17
$D_{UA}-N_{PA}$	$T_{avg}$	0,83	0,86	0,85	0,88	0,87	0,81
	$T_0$	0,88	0,95	0,89	0,91	0,92	0,88
	$T_n(1.2g)$	0,86	0,84	0,82	0,82	0,87	0,79
	$T_n(1.75g)$	0,88	0,64	0,80	0,47	0,47	0,64
	$T_n(2g)$	0,93	0,78	0,64	0,64	0,41	0,61
$D_{US}-N_{PA}$	$T_{avg}$	0,88	0,77	0,79	0,85	0,82	0,78
	$T_0$	0,79	0,84	0,81	0,80	0,82	0,80
	$T_n(1.2g)$	0,80	0,68	0,66	0,67	0,89	0,66
	$T_n(1.75g)$	0,85	0,40	0,59	0,25	0,30	0,42
	$T_n(2g)$	0,58	0,51	0,39	0,40	0,15	0,42

		Coeficiente de correlación					
		A	B	C	D	E	Global
D <sub>SR</sub> -N <sub>PA</sub>	T <sub>avg</sub>	0,60	0,62	0,63	0,59	0,84	0,58
	T <sub>0</sub>	0,48	0,57	0,50	0,45	0,66	0,48
	T <sub>n</sub> (1.2g)	0,47	0,46	0,32	0,39	0,79	0,36
	T <sub>n</sub> (1.75g)	0,63	0,25	0,32	0,23	0,32	0,26
	T <sub>n</sub> (2g)	0,43	0,25	0,14	0,20	0,20	0,21

Las definiciones de periodo que tienen un mayor efecto en el mejoramiento de la correlación entre la duración y el número de ciclos son el periodo espectral promedio y predominante. Se obtuvieron fórmulas empíricas con alto grado de correlación que permiten expresar, de forma directa, el número de ciclos contados a partir de un umbral absoluto de 0.1 g y las duraciones entre intervalos y uniforme, para un umbral absoluto de 0.1 g.

La inclusión del tipo de suelo, mejora las correlaciones en todos los casos para los perfiles tipo A, C y E. En el caso de los perfiles tipo B y D las correlaciones solo mejoran en ciertos casos. Cabe destacar que al relacionar la duración uniforme y el número de ciclos con un umbral absoluto de 0.1 g y el periodo espectral promedio se obtienen los más altos coeficientes de correlación. A continuación, se presenta para este caso las ecuaciones obtenidas por tipo de perfil de suelo.

Tabla 21. Ecuaciones de correlación entre D<sub>UA</sub>, N<sub>PA</sub> y T<sub>0</sub>, según perfil de suelo

Perfil	Ecuación	R <sup>2</sup>	Desviación estándar
A	$N_{PA}(0.1g)=6.07D_{UA}(0.1g)/T_0$	0.88	222.8
B	$N_{PA}(0.1g)=5.56D_{UA}(0.1g)/T_0$	0.95	57.9
C	$N_{PA}(0.1g)=4.83D_{UA}(0.1g)/T_0$	0.89	104.3
D	$N_{PA}(0.1g)=6.16D_{UA}(0.1g)/T_0$	0.91	62.8
E	$N_{PA}(0.1g)=5.55D_{UA}(0.1g)/T_0$	0.92	34.2

Los resultados muestran altos coeficientes de correlación y una desviación estándar aceptable, dado el orden de magnitud del número de ciclos contados a partir de esta

definición. El número de ciclos solo representa directamente la duración del movimiento fuerte en un sismo, si se tiene en cuenta el contenido frecuencial y el tipo de suelo en el que se realiza el análisis. Esta apreciación es válida en el caso de umbrales absolutos de aceleración, para umbrales relativos el número de ciclos no guarda en ningún caso una fuerte correlación con la duración del movimiento.

## 6. INFLUENCIA DE LA MAGNITUD, LA DISTANCIA EPICENTRAL Y LA VELOCIDAD DE ONDA DE CORTE EN LA DURACIÓN DE TERREMOTOS CON $M \geq 8.0$

La aplicación de métodos simplificados para la evaluación del potencial de licuación requiere que se estime el número efectivo de ciclos del terremoto de manera indirecta, mediante parámetros disponibles habitualmente en un estudio de suelos convencional. En el presente capítulo se exploran las correlaciones entre las definiciones de duración y número de ciclos estudiadas, y la magnitud, la distancia epicentral y la velocidad de onda de corte en el sitio.

### 6.1. Influencia de la magnitud

La duración del movimiento fuerte durante un terremoto está relacionada con la magnitud de este, y la magnitud depende a su vez de la energía total liberada por el terremoto, la cual está relacionada con las dimensiones de la superficie de rotura, por lo que es lógico que durante eventos de gran magnitud con grandes superficies de ruptura la energía tarde más tiempo en liberarse (Kramer & Greenfield, 2017). A continuación, se presentan las correlaciones entre la magnitud y las definiciones de duración y número de ciclos con mayor correlación.

Figura 168. Correlación entre la magnitud y la DBA(0.1g)

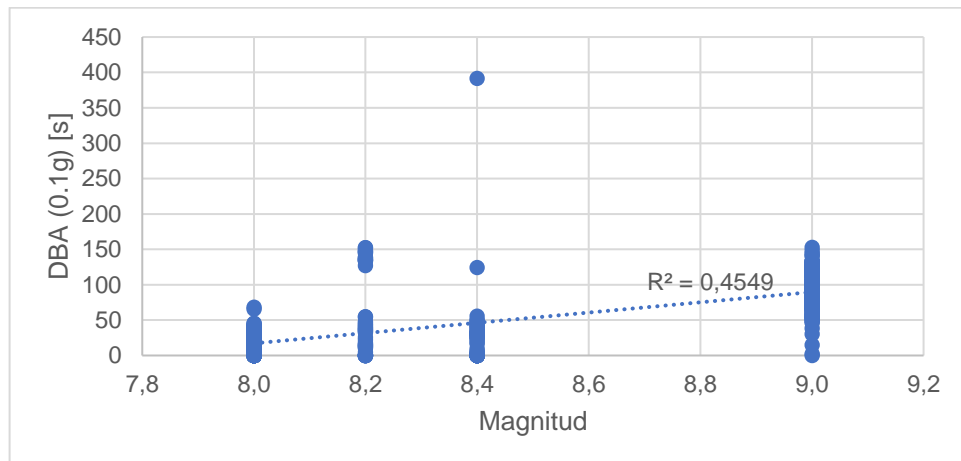


Figura 169. Correlación entre la magnitud y la DBR(75%)

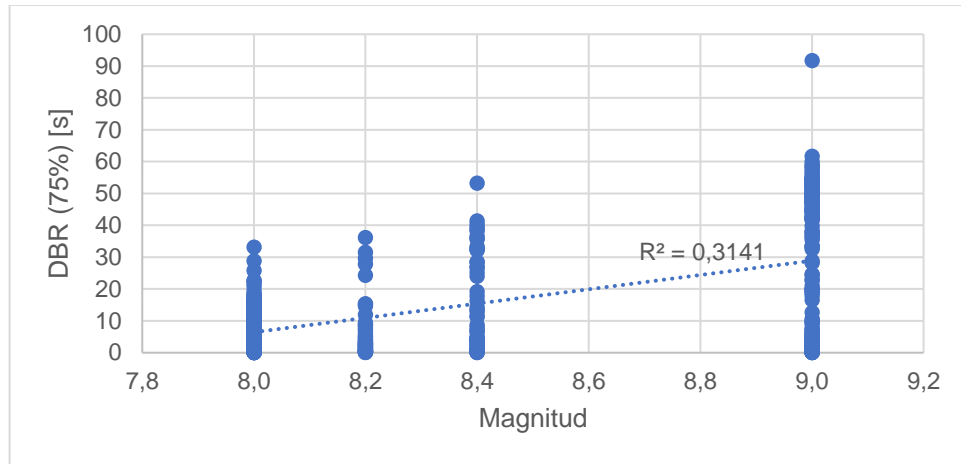


Figura 170. Correlación entre la magnitud y la DUA(0.1g)

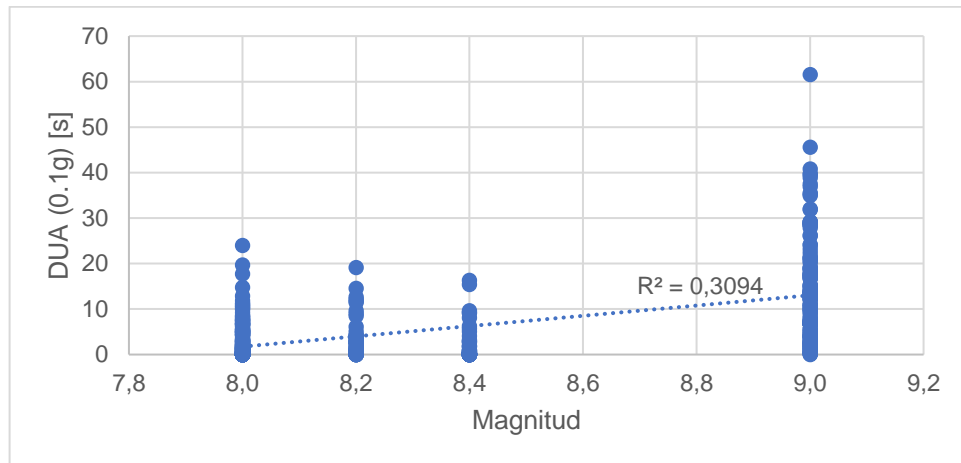


Figura 171. Correlación entre la magnitud y la DUS(75%)

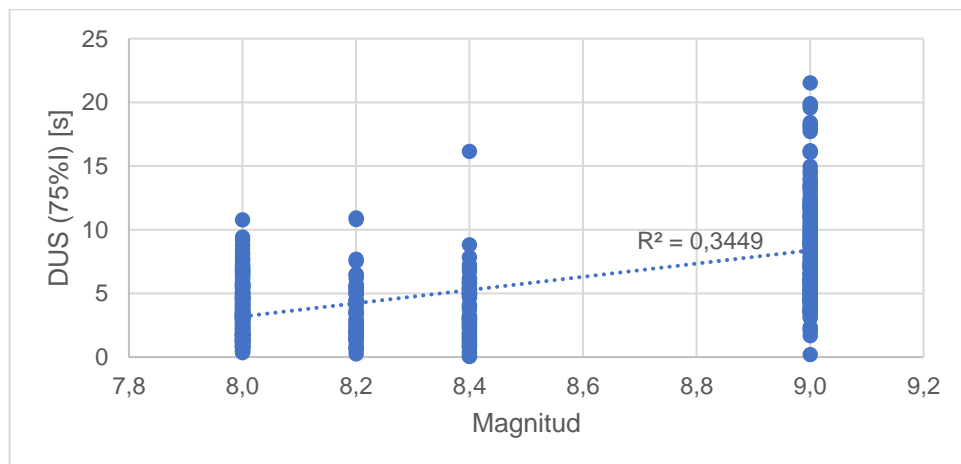


Figura 172. Correlación entre la magnitud y la DSR(5-75%)

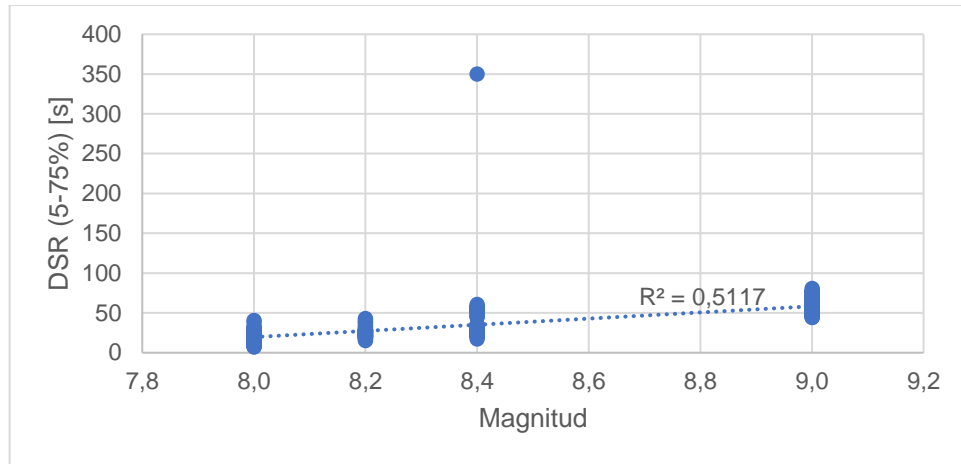


Figura 173. Correlación entre la magnitud y el NPA(0.05g)

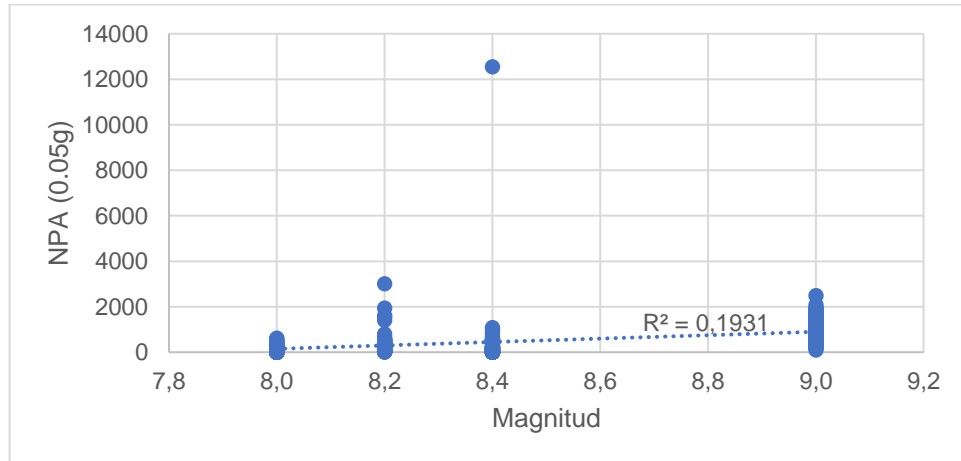


Figura 174. Correlación entre la magnitud y el NPA(0.1g)

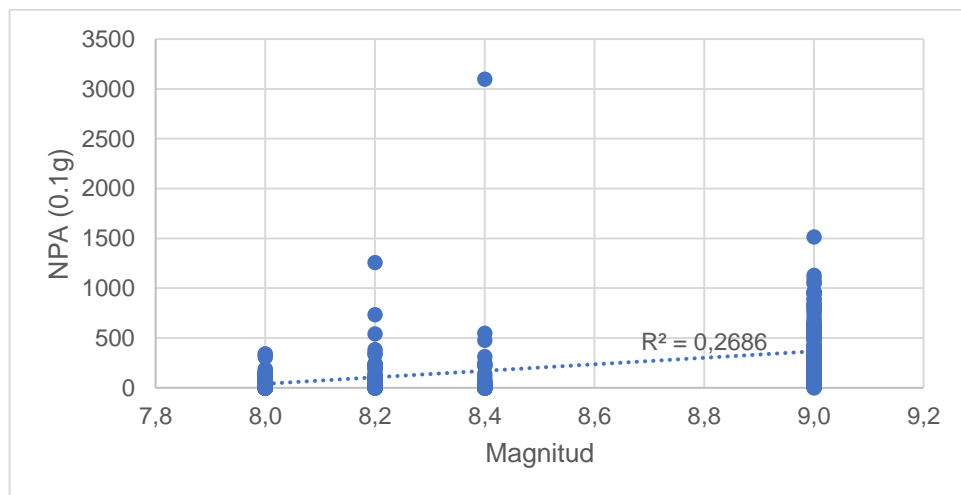


Figura 175. Correlación entre la magnitud y el NPR(20%)

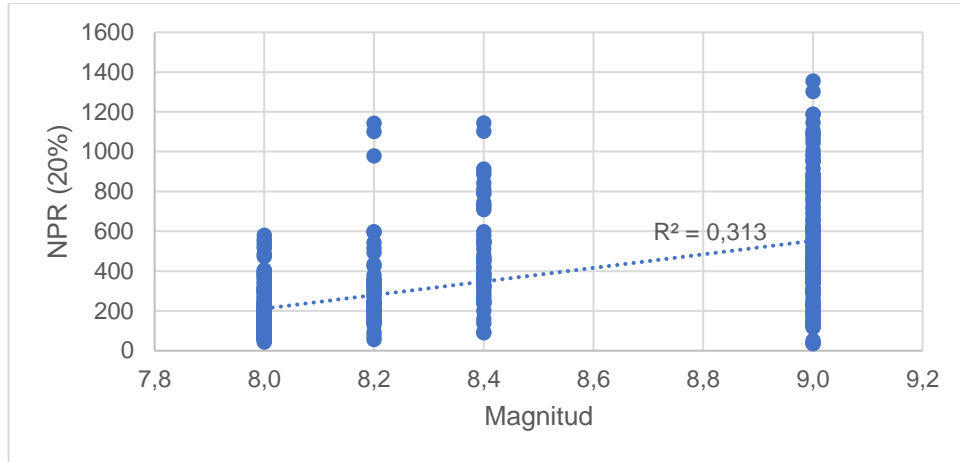
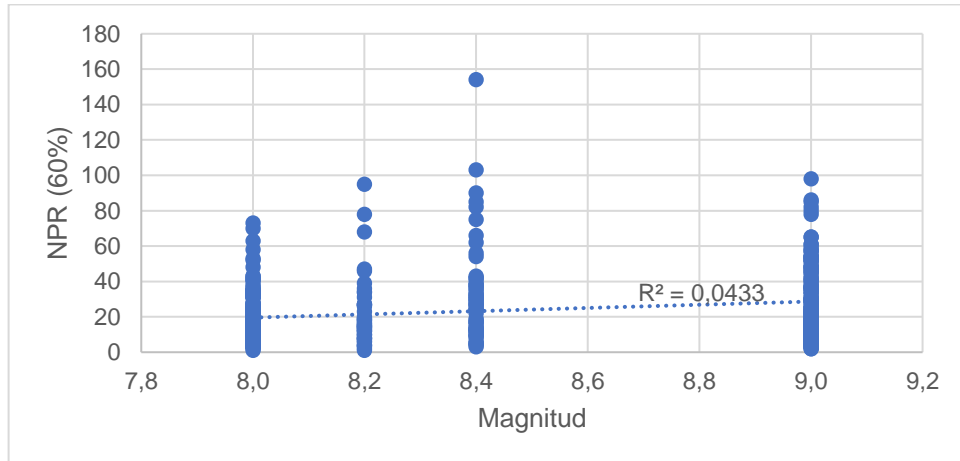


Figura 176. Correlación entre la magnitud y el NPR(60%)



La correlación entre la magnitud y las definiciones de duración y número de ciclos es moderada en todos los casos, excepto para valores de número de ciclos contados a partir de un umbral relativo. Se presume que la dispersión en las correlaciones depende de las características del depósito de suelo, como lo han demostrado estudios anteriores.

## 6.2. Influencia de la distancia epicentral

La duración de un movimiento sísmico está asociada directamente a la magnitud del sismo, la distancia epicentral y el efecto de sitio. Es conveniente evaluar la correlación entre el residuo entre la magnitud y la duración y la distancia epicentral, a fin de buscar una ecuación empírica de atenuación. A continuación, se presentan las correlaciones entre los residuos entre la magnitud y las definiciones de duración y número de ciclos, y la distancia epicentral.

Figura 177. Correlación entre el residuo M-DBA(0.1g) y la distancia epicentral

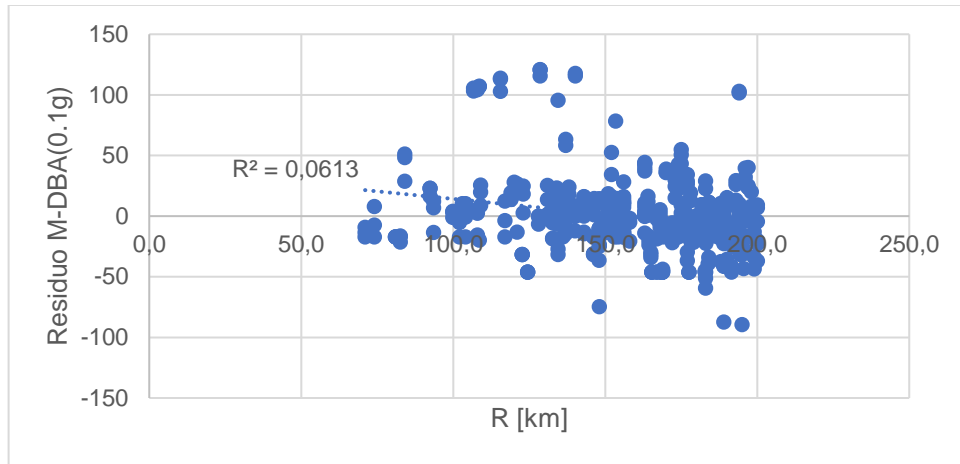


Figura 178. Correlación entre el residuo M-DBR(75%) y la distancia epicentral

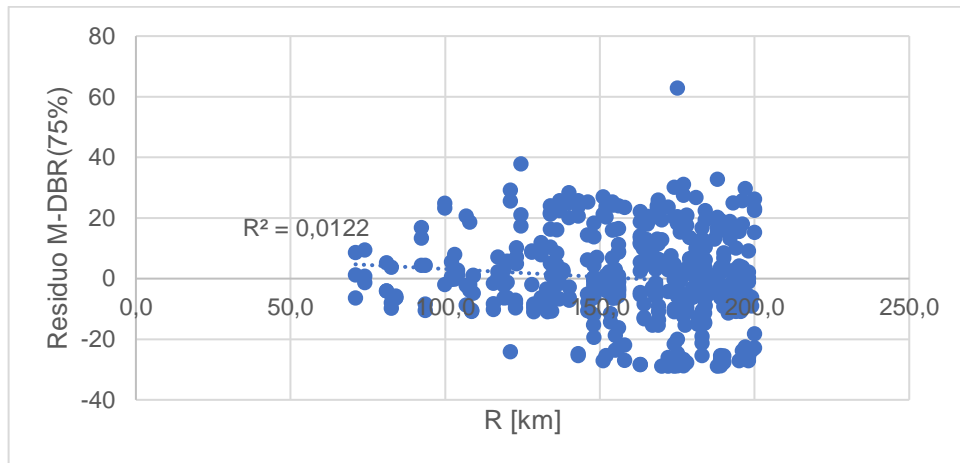


Figura 179. Correlación entre el residuo M-DUA(0.1g) y la distancia epicentral

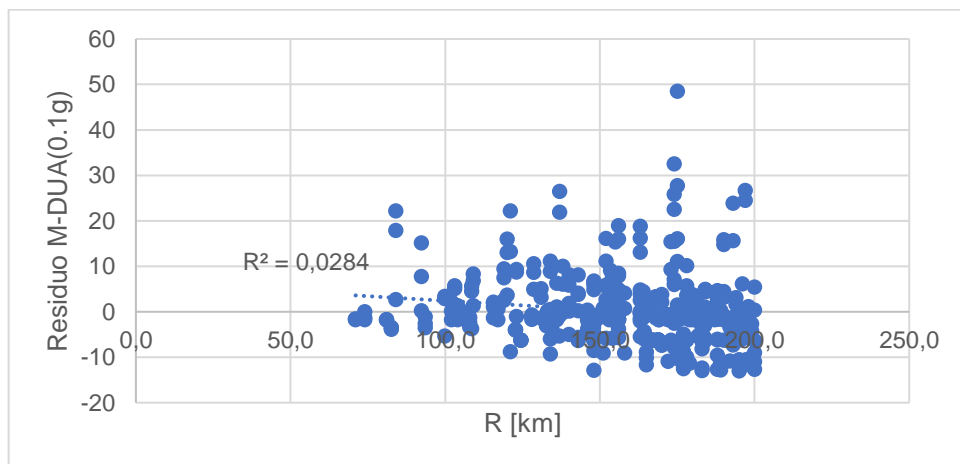


Figura 180. Correlación entre el residuo M-DUS(75%I) y la distancia epicentral

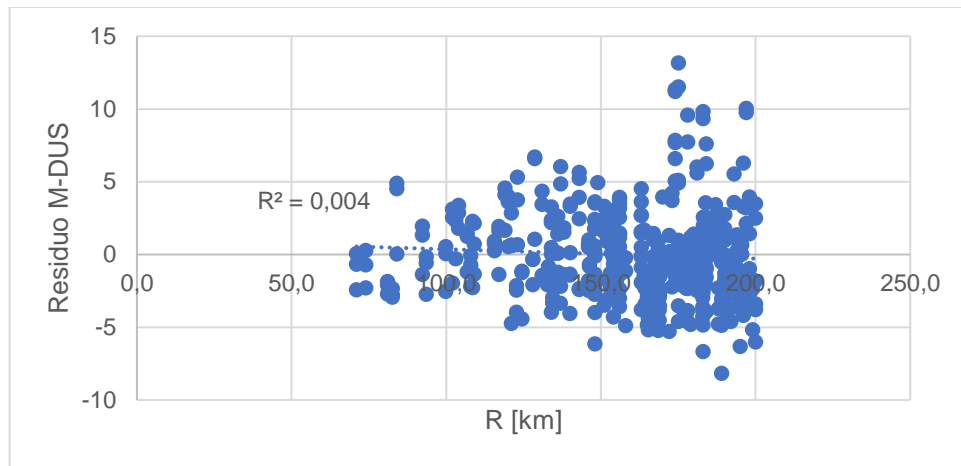


Figura 181. Correlación entre el residuo M-DSR(5-75%) y la distancia epicentral

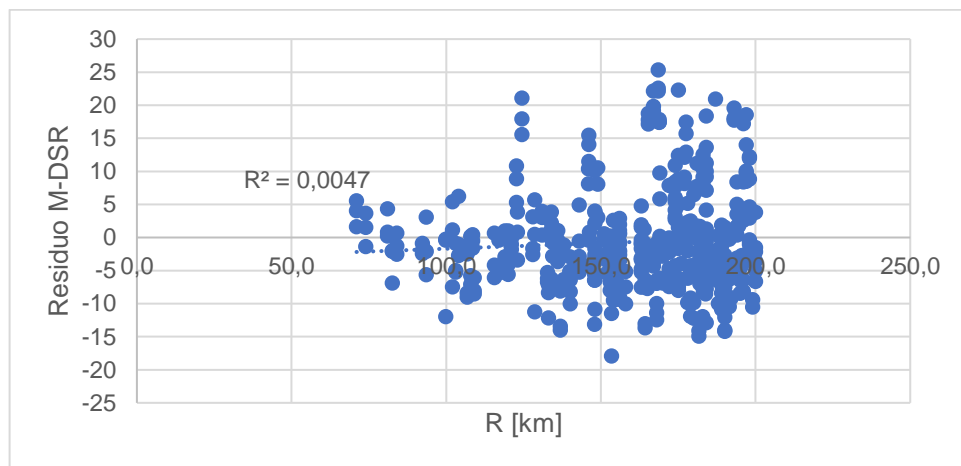


Figura 182. Correlación entre el residuo M-NPA(0.05g) y la distancia epicentral

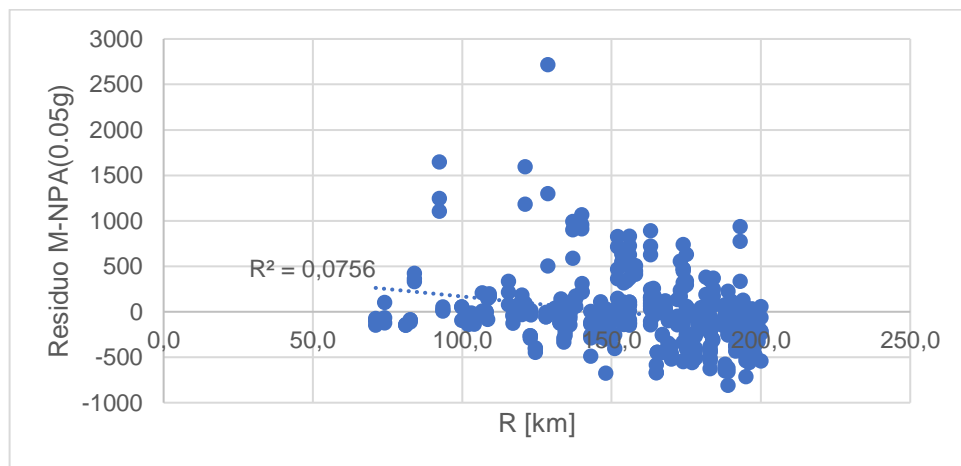


Figura 183. Correlación entre el residuo M-NPA(0.1g) y la distancia epicentral

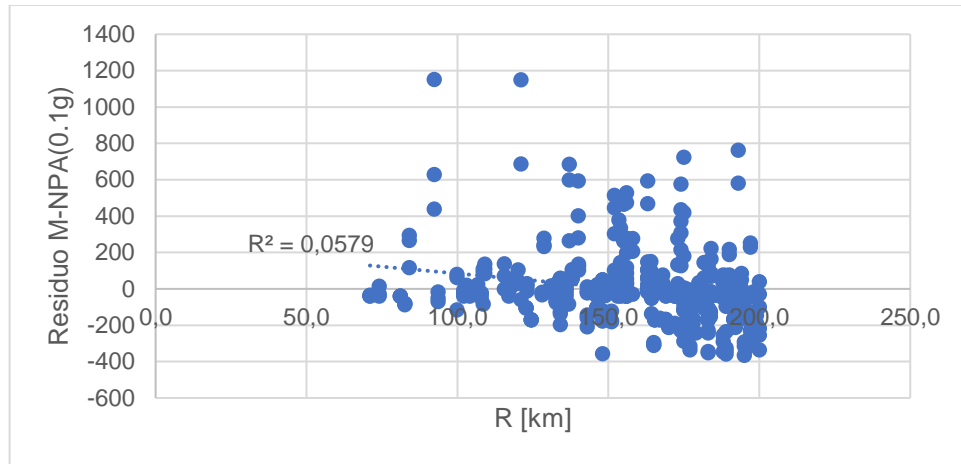


Figura 184. Correlación entre el residuo M-NPR(20%) y la distancia epicentral

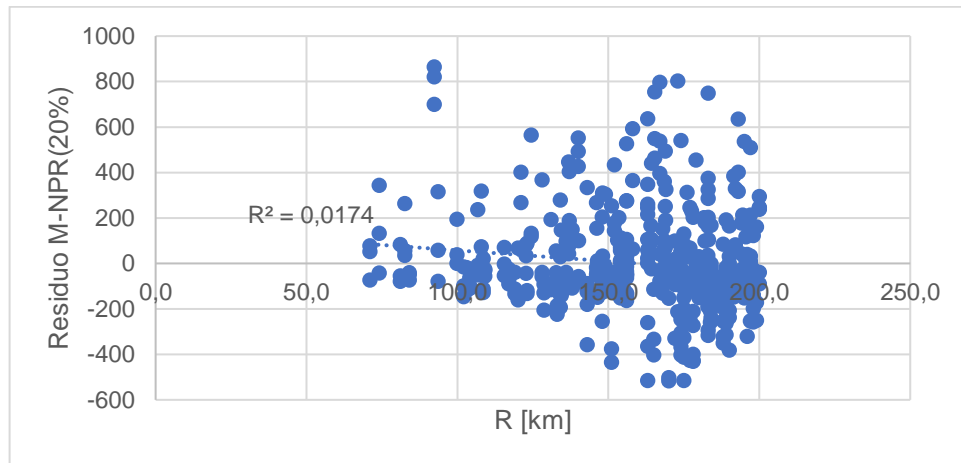
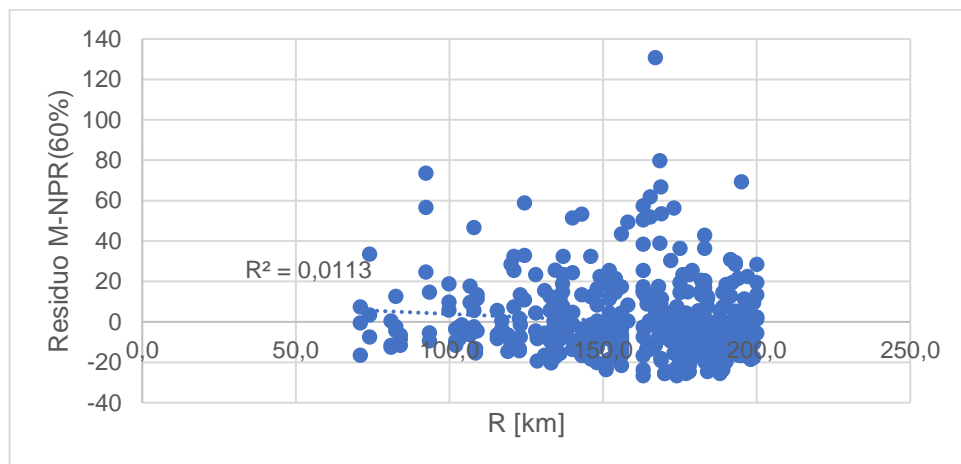


Figura 185. Correlación entre el residuo M-NPR(60%) y la distancia epicentral



### 6.3. Influencia de la velocidad de onda de corte

A continuación, se presentan las correlaciones entre los residuos entre la magnitud y las definiciones de duración y número de ciclos, y la velocidad promedio de onda de corte, con el fin de evaluar la influencia de los efectos de sitio en la duración del movimiento sísmico para sismos de gran magnitud.

Figura 186. Correlación entre el residuo M-DBA(0.1g) y la Vs30

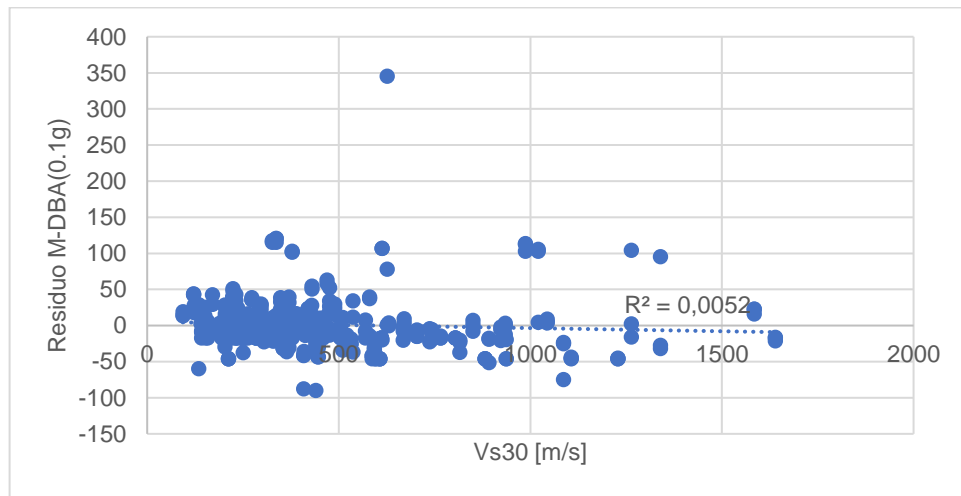


Figura 187. Correlación entre el residuo M-DBR(75%) y la Vs30

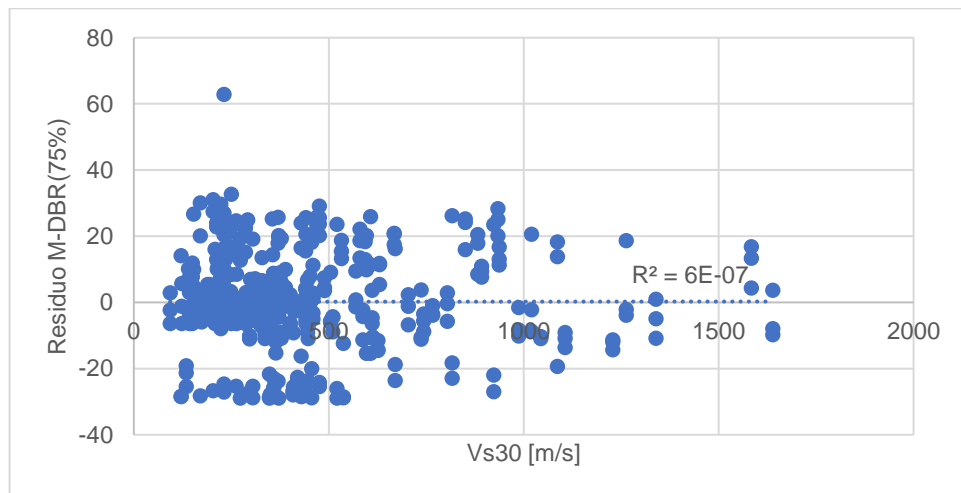


Figura 188. Correlación entre el residuo M-DUA(0.1g) y la Vs30

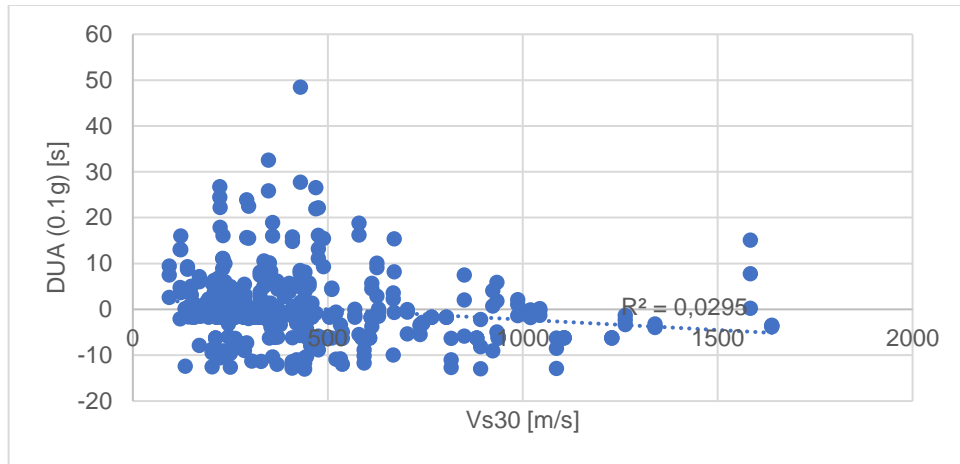


Figura 189. Correlación entre el residuo M-DUS(75%I) y la Vs30

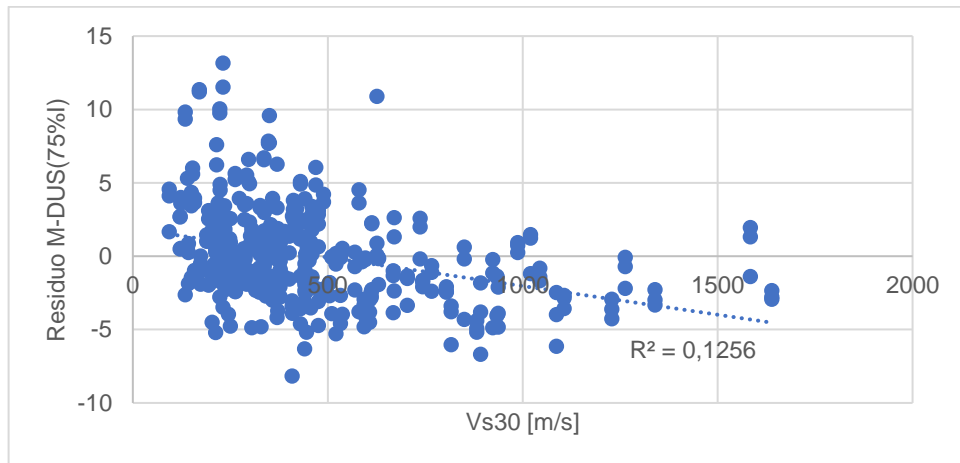


Figura 190. Correlación entre el residuo M-DSR(5-75%) y la Vs30

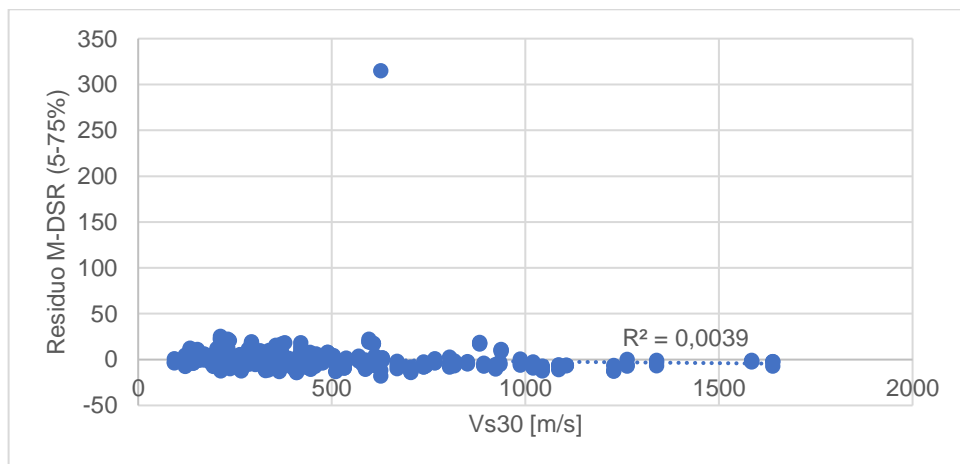


Figura 191. Correlación entre el residuo M-NPA(0.05g) y la Vs30

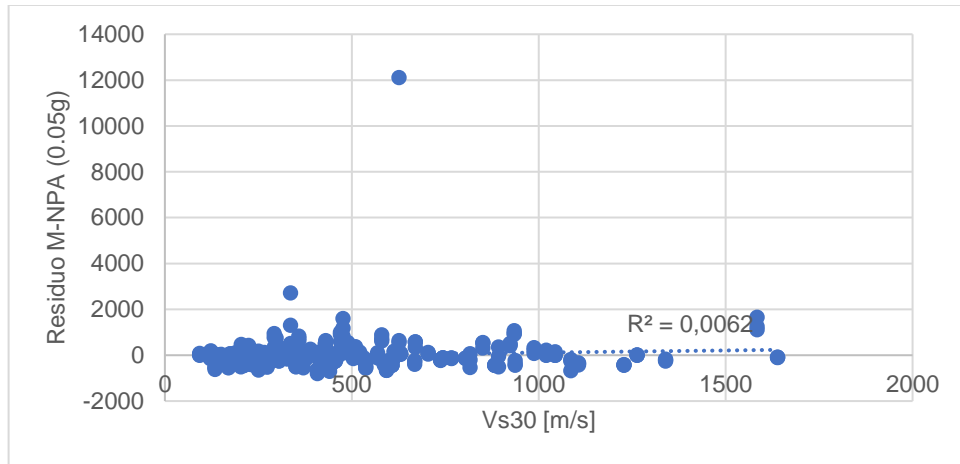


Figura 192. Correlación entre el residuo M-NPA(0.1g) y la Vs30

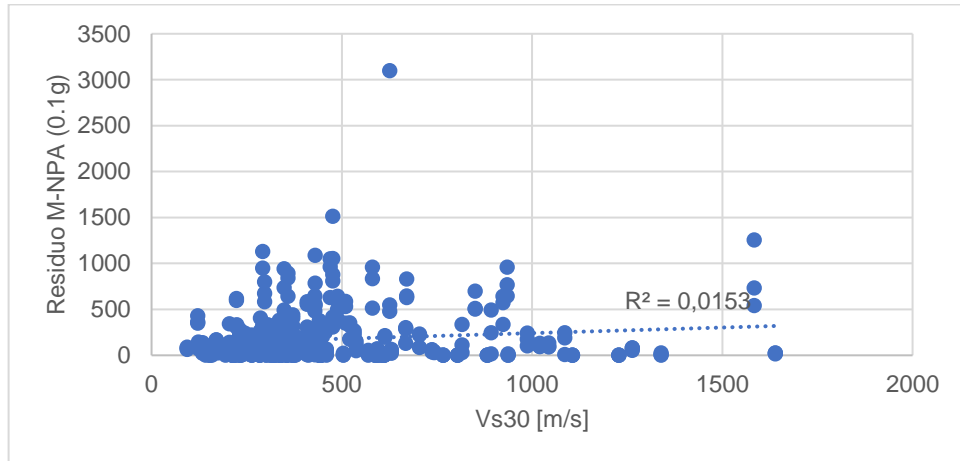


Figura 193. Correlación entre el residuo M-NPR(20%) y la Vs30

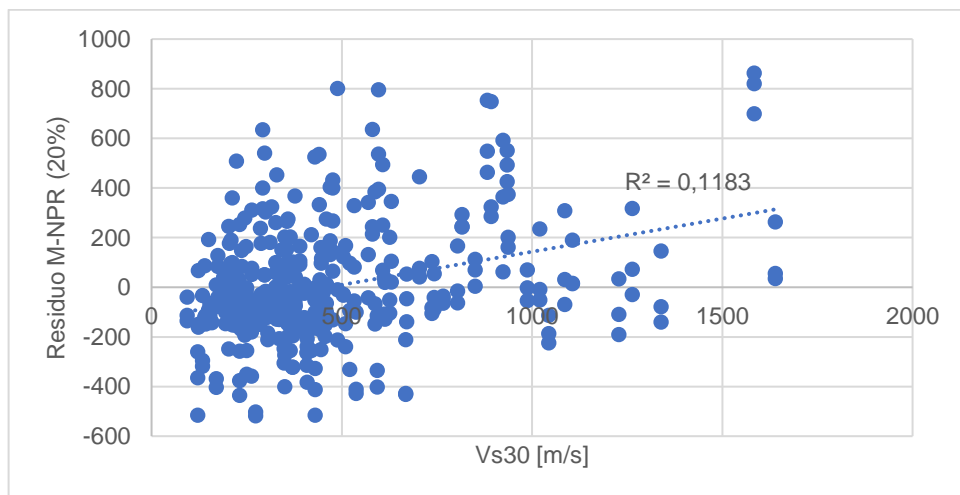
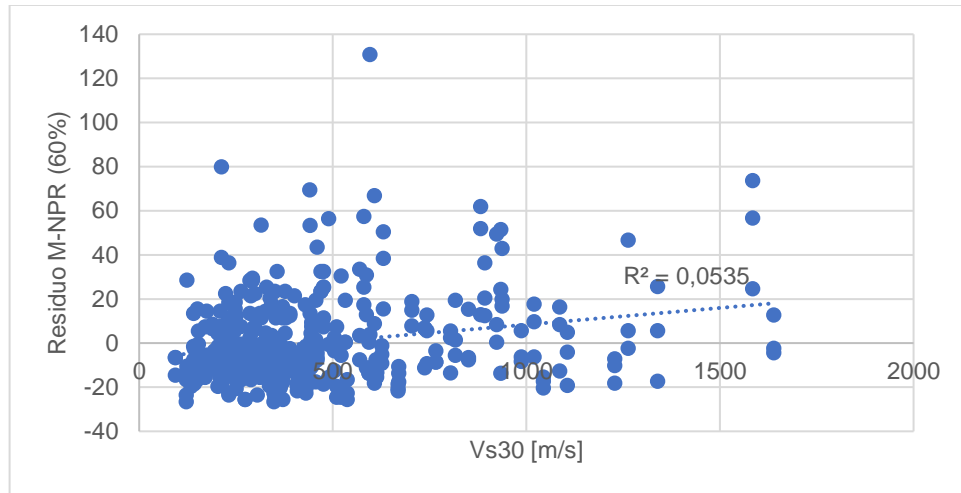


Figura 194. Correlación entre el residuo M-NPR(60%) y la Vs30



#### 6.4. Regresión múltiple entre duración, magnitud, distancia epicentral y velocidad de onda de corte

La estimación de la demanda sísmica, representada por la duración y/o el número de ciclos, a partir de datos básicos de un estudio de suelos, es necesaria para el desarrollo de un modelo simplificado en sismos de gran magnitud. La siguiente forma de la ecuación sugiere una dependencia entre la duración, la magnitud, la distancia epicentral y la velocidad de onda de corte.

$$\ln Y = a \cdot M + b \cdot \ln R + c \cdot \ln V_{s30} \quad (33)$$

Donde:

$Y$ : Definición de duración o número de ciclos correlacionada.

$M$ : Magnitud momento.

$R$ : Distancia epicentral, en km.

$V_{s30}$ : Velocidad de onda de corte promedio en los primeros 30 m, en m/s.

$a, b, c$ : Coeficientes de correlación.

A continuación, se presentan los parámetros de correlación para las regresiones múltiples entre definiciones de duración y número de ciclos y la magnitud, la distancia epicentral y la velocidad de onda de corte promedio.

*Tabla 22. Parámetros de correlación múltiple entre duración o número de ciclos, M, R y Vs30*

<i>Y</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>R</i> <sup>2</sup>	<i>Desviación estándar</i>
D <sub>BA</sub> (0.05 g)	1,50	-1,51	-0,17	0.35	0.864
D <sub>BA</sub> (0.10 g)	2,03	-2,12	-0,50	0.37	1.114
D <sub>BR</sub> (20%)	0,76	-0,53	0,08	0.43	0.367
D <sub>BR</sub> (75%)	0,99	-1,25	-0,05	0.06	1.810
D <sub>UA</sub> (0.05 g)	2,28	-2,45	-0,78	0.32	1.444
D <sub>UA</sub> (0.10 g)	2,51	-2,82	-1,01	0.36	1.490
D <sub>US</sub> (75%I)	1,08	-0,86	-0,57	0.35	0.676
D <sub>SR</sub> (5-75%)	0,97	-0,75	-0,16	0.49	0.351
D <sub>SR</sub> (5-95%)	0,75	-0,49	0,04	0.44	0.351
N <sub>PA</sub> (0.05g)	2,27	-2,46	-0,23	0.37	1.247
N <sub>PA</sub> (0.10g)	2,46	-2,74	-0,44	0.40	1.291
N <sub>PR</sub> (20%)	0,82	-0,66	0,33	0.32	0.608
N <sub>PR</sub> (60%)	0,26	-0,20	0,28	0.07	0.787

## 6.5. Discusión de resultados

Las definiciones de número de ciclos basadas en el método de conteo por picos, para el mismo tipo de umbral de aceleración, muestran una fuerte correlación en el caso de umbrales absolutos. Para umbrales relativos, los datos muestran una clara tendencia lineal, aunque con un coeficiente de correlación considerablemente menor. El grado de correlación entre definiciones de número de ciclos basadas en umbrales de aceleración de diferente tipo, es generalmente pobre; lo cual indica que no es posible relacionar de forma simple, directa y confiable definiciones de número de ciclos con umbrales absolutos y relativos entre sí.

De igual forma, las definiciones de duración presentan una fuerte correlación en el caso de umbrales absolutos, una baja correlación en el caso de umbrales relativos y una correlación casi nula, cuando se relacionan entre sí umbrales absolutos y relativos. Para los conceptos de duración entre intervalos y duración uniforme es posible unificar valores obtenidos para distintos umbrales absolutos a un solo umbral de aceleración. La correlación entre duración y número de ciclos es de moderada a baja. Los mejores resultados se obtienen para umbrales absolutos, en vez de umbrales relativos. La correlación entre definiciones de duración basadas en umbrales absolutos y número de ciclos basado en umbrales relativos es casi nula, en todos los casos.

La separación de los datos correlacionados según su contenido frecuencial mejora considerablemente la correlación entre duración y número de ciclos. La inspección visual de los registros sísmicos muestra la notable influencia de las formas de onda en la dispersión de las correlaciones, y su variabilidad según el contenido frecuencial muestra que se relaciona a su vez con el tipo de perfil de suelo en estudio. Al tener en cuenta, el tipo de perfil de suelo y el contenido frecuencial se mejoran considerablemente las correlaciones entre la duración y el número de ciclos, obteniendo en varios casos ecuaciones empíricas de precisión aceptable.

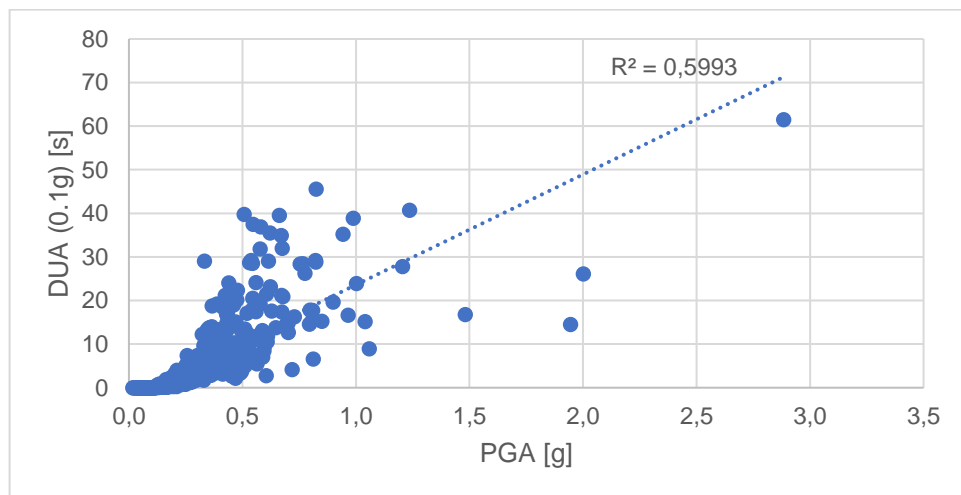
A pesar de que es notable la influencia de la magnitud en la duración y el número de ciclos, se evidencia una fuerte dispersión de los datos obtenidos respecto de esta variable. La regresión múltiple de la magnitud con la distancia epicentral y la velocidad de onda de corte podría mejorar la capacidad de predicción de una futura ecuación empírica que permita determinar con suficiente confiabilidad el número de ciclos a partir de datos de los que se dispone habitualmente en un estudio de suelos. Las evaluaciones preliminares realizadas en el presente trabajo muestran aún coeficientes de correlación moderados para un modelo de este tipo, por lo que se recomienda la inclusión de nuevas variables que mejoren su capacidad predictiva.

## 7. CONCLUSIONES

### 7.1. Conclusiones

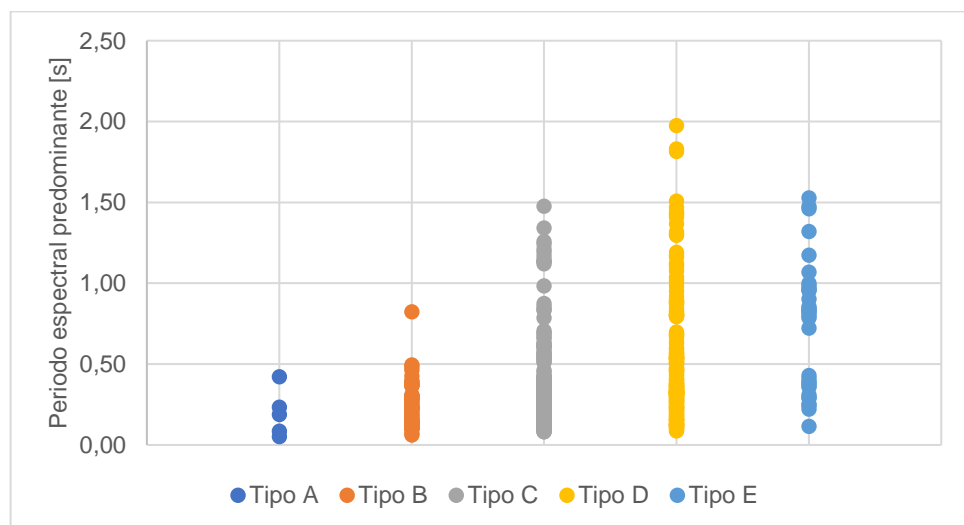
- Los métodos simplificados para evaluación de licuación más utilizados en la actualidad se basan en definiciones de duración y número de ciclos basados en umbrales de aceleración relativos. En el presente trabajo pudo determinarse que para sismos de gran magnitud el número de ciclos contados a partir de este tipo de umbrales no representa de forma directa la duración del movimiento sísmico.
- La correlación entre la duración y el número de ciclos depende en gran medida del método utilizado, y del tipo de umbral escogido en el procedimiento. Se comprobó que, para sismos de gran magnitud, existe una mejor correlación entre los resultados obtenidos utilizando definiciones de duración y número de ciclos, basadas en umbrales absolutos, en lugar de una mezcla de umbrales absolutos y relativos. Lo anterior se debe a que cuando se toma un umbral absoluto como referencia, el número de ciclos será dependiente de los niveles de aceleraciones registrados, ya que entre mayor sea la PGA la tendencia es a obtener un mayor número de ciclos (Figura 195). En cambio, cuando se utiliza un umbral relativo el número de ciclos contabilizados es independiente de las amplitudes del registro.

Figura 195. Correlación entre PGA y DUA (0.1g)



- El número de ciclos contabilizados a partir de un umbral relativo al 60% de la aceleración máxima superficial, es el parámetro utilizado para la estimación de la demanda sísmica en los métodos simplificados para el cálculo del potencial de licuación. Sin embargo, se demuestra que en sismos de gran magnitud su correlación con otras definiciones de número de ciclos y de duración es casi nula en todos los casos; y que la dispersión de dichas correlaciones no guarda una relación consistente con la magnitud, el contenido frecuencial y la clasificación de sitio; lo que implica que el factor de escala de magnitud utilizado actualmente no es aplicable a sismos de  $M \geq 8.0$ , para los cuales deberá utilizarse una nueva definición de número de ciclos, o establecer un nuevo parámetro que explique el comportamiento del número de ciclos en este tipo de eventos.
- El efecto del contenido frecuencial en la dispersión de las correlaciones realizadas se evidencia al separar por intervalos de diferentes periodos los datos analizados. Para esto se utilizaron cinco definiciones de periodo espectral, siendo el periodo espectral promedio y periodo espectral predominante, las definiciones que mejoran en mayor medida las correlaciones propuestas. Se observa una tendencia inversamente proporcional entre el periodo espectral predominante y la clasificación de sitio (*Figura 196*). Sin embargo, se registran periodos bajos en todos los tipos de suelos

*Figura 196. Correlación entre clasificación de sitio y periodo espectral predominante*



- La mejor correlación entre duración y número de ciclos se da entre la duración uniforme y el número de ciclos contados a partir de un umbral absoluto de 0.1 g, con un  $R^2$  de 0.769 y una desviación estándar de 127 ciclos. Al incluir el efecto del contenido frecuencial, mediante el periodo espectral predominante se mejora notablemente la correlación, con un  $R^2$  de 0.88 y una desviación estándar de 87 ciclos. El modelo preliminar propuesto muestra una correlación moderada entre este parámetro y la magnitud, la distancia epicentral y la clasificación de sitio. Se recomienda utilizar el NPA para la evaluación del potencial de licuación. Para esto debe desarrollarse un modelo matemático que incluya un número mayor de eventos de grandes magnitudes.
- Se recomienda la utilización del número de ciclos contados para un umbral de aceleración absoluta para el conteo de ciclos a partir de datos de campo, en la evaluación del potencial de licuación; ya que es una medida representativa de la duración del sismo y su nivel de correlación con la magnitud, la distancia epicentral y la clasificación de sitio permite obtener una ecuación empírica de predicción, a partir de datos básicos en un estudio de suelos. Deberá definirse un umbral de aceleración a partir del cual los ciclos de carga influyan en la ocurrencia de licuación.

## **7.2. Sugerencias para futuras investigaciones**

- La base de datos utilizada en el presente trabajo está constituida por cuatro sismos de magnitud igual o mayor a 8.0, y debe complementarse con registros de eventos de características similares, con el fin de mejorar la confiabilidad de la formulación propuesta.
- Se sugiere establecer un parámetro para caracterizar las formas de onda de los registros y el tipo de suelo, para evaluar su influencia en la dispersión de las correlaciones entre la duración y el número de ciclos.
- Los análisis presentados anteriormente se realizaron a partir de datos de campo y deben complementarse con ensayos de laboratorio a muestras de suelo sometidas a cargas cíclicas, que permitan relacionar la definición de número de ciclos escogida con la relación de resistencia cíclica del suelo. Es de suma importancia, considerar el efecto de la duración en la disipación de presión de poros y su consecuente impacto positivo en la

resistencia del suelo ante la carga cíclica. Se presume, según investigaciones pasadas (Unjoh, et al., 2012), que esta influencia tiene lugar hasta cierto nivel de esfuerzos cíclicos.

## REFERENCIAS

- Ambraseys, N. & Sarma, S., 1967. Response of earth dams to strong earthquakes. *Géotechnique* 17(2), pp. 181-283.
- Andrus, R. & Stokoe, K., 2000. Liquefaction resistance of soils from shear-wave velocity. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126(11), pp. 1015-1025.
- ANP Japan, 2017. *Damage Situation and Police Countermeasures associated with 2011Tohoku district - off the Pacific Ocean Earthquake*, Tokio, Japón: s.n.
- ASTM, 2011. *ASTM E 1049 - 85(2011)e1 Standard Practices for Cycle Counting in Fatigue Analysis*. s.l.:s.n.
- Bird, J. & Bommer, J., 2004. Earthquake losses due to ground failure. *Engineering Geology* 75(2), pp. 147-179.
- Bolt, B., 1973. Duration of strong ground motions. *Proc. Fifth World Conference on Earthquake Engineering, Vol. 1*, pp. 1304-1313.
- Bommer, J., Hancock, J. & Alarcón, J., 2006. Correlations between duration and number of effective cycles of earthquake ground motion. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* Vol. 26, pp. 1-13.
- Bommer, J. & Martinez-Pereira, A., 1999. The effective duration of earthquake strong motion. *Journal of Earthquake Engineering*, pp. 127-172.
- Botero, J. C., 2011. *Dinámica de estructuras: Sistemas de un grado de libertad*. Medellín: Fondo editorial Universidad EAFIT.
- Boulanger, R. & Idriss, I., 2014. *CPT and SPT based liquefaction triggering procedures*. s.l.:University of California at Davis.
- Carrasco, F., Behrens, E. & Oyarzo, C., 2010. Efectos de la duración de los terremotos en la respuesta inelástica de las estructuras. *Congreso chileno de sismología e ingeniería antisísmica*.

- Chiu, H.-C., 1997. Stable Baseline Correction of Digital Strong-Motion Data. *Bulletin of the Seismological Society of America Vol. 87 No. 4*, pp. 932-944.
- Di Alessandro, C. y otros, 2012. Predominant-Period Site Classification for Response Spectra Prediction Equations in Italy. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 102(2), pp. 680-695.
- Donovan, N., 1972. Earthquake hazards for buildings. *Building Science Series 46* , pp. 82-111.
- Du, W. & Wang, G., 2017. Empirical correlations between the effective number of cycles and other intensity measures of ground motions. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 102, pp. 65-74.
- Elghadamsi, F., Mohraz, B., Lee, C. & Moayyad, P., 1988. Time-dependent power spectral density of earthquake ground motion. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 7, pp. 15-21.
- GEER, 2010. *Geo-engineering Reconnaissance of the 2010 Maule, Chile Earthquake*. s.l.:NSF-Sponsored GEER Association Team, J. Bray & D. Frost.
- Ghasemi, H., Zare, M., Fukushima, Y. & Sinaeian, F., 2009. Applying empirical methods in site classification, using response spectral (H/V): a case study on Iranian strong motion network (ISMN). *Soil Dyn Earthq Eng*, Volumen 29, pp. 121-132.
- Gobierno de Chile, 2014. *Informe consolidado Sismo de Mayor Intensidad y Alerta de Tsunami, Iquique*, Santiago de Chile: s.n.
- Hancock, J. & Bommer, J., 2005. The effective number of cycles of earthquake ground motion. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Volumen 34, pp. 637-664.
- Hisada, T., 1976. Relation between duration of earthquake ground motion and magnitude. *Kajima ICT*.
- Housner, G., 1965. Intensity of ground shaking near the causative fault. *Proc. Third World Conference on Earthquake Engineering*, Vol. 1, pp. 81-94.

- Housner, G., 1975. Measures of severity of ground shaking. *Proc. US National Conference on Earthquake Engineering* , pp. 25-33.
- Husid, L., 1969. Características de terremotos: Análisis general. *Revista del IDIEM* 8, pp. 21-42.
- Idriss, I. & Boulanger, R., 2008. *Soil liquefaction during earthquakes*. Oakland, California, USA: Earthquake Engineering Research Institute.
- Kawashima, K. & Aizawa, K., 1989. Bracketed and normalized durations of earthquake ground acceleration. *Earthq. Engrg. Struct. Dyn.* 18, pp. 1041-1051.
- Kawasumi, H., 1968. *General report on the Niigata earthquake of 1964*. Tokyo: Electrical Engineering College Press.
- Kobayashi, Y., 1971. Effects of earthquakes on ground (II). *Journal of Physics Earth* 19, pp. 231-241.
- Kramer, S. & Greenfield, M., 2017. Effects of long-duration motions on soil liquefaction hazards. *16th World Conference on Earthquake Engineering*.
- Malhotra, P., 2002. Cyclic-demand spectrum. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 31, pp. 1441-1457.
- McCann, M. & Shah, H., 1979. Determining strong-motion duration of earthquakes. *Bull. Seis. Soc. Am.* 69, pp. 1253-1265.
- McGuire, R. & Barnhard, T., 1979. The usefulness of ground motion duration in prediction of severity of seismic shaking. *Proc. Second US National Conference on Earthquake Engineering*, pp. 713-722.
- Mian, J., Kontoe, M. & Free, M., 2013. Assessing and managing the risk of earthquake-induced liquefaction to civil infrastructure. En: *Handbook of Seismic Risk Analysis and Management of Civil Infrastructure Systems*. s.l.:Woodhead Publishing, pp. 113-138.
- MLIT, 2003. *Informe final - Terremoto Tokachi-oki*. Japón: s.n.

- Mohraz, B. & Peng, M., 1989. The use of low-pass filter in determining the duration of strong ground motion. *J. Pressure Vessels and Piping Division ASCE*, pp. 197-200.
- NEHRP, 2003. *NEHRP recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures*. s.l.:s.n.
- NIED, 2017. *Strong-motion seismograph network*. [En línea] Available at: <http://www.kyoshin.bosai.go.jp/>
- Page, R., Boore, D., Joyner, W. & Coulter, H., 1972. Ground motion values for use in seismic design of the trans-Alaska pipeline system. *US Geological Survey Circular*.
- Papazachos, B., Papaianou, C. A., Margaris, V. & Theodulidis, N., 1992. Seismic hazard assessment in Greece based on strong motion duration. *Proc. Tenth World Conference on Earthquake Engineering Vol. 2*, pp. 425-430.
- Perez, V., 1980. Spectra of amplitude sustained for a given number of cycles: An interpretation of response duration for strong-motion earthquake records. *Bull. Seis. Soc. Am.* 70(5), pp. 1943-1954.
- Prieto, J., 2002. *Development of a ground-motion parameter for assessment of earthquake losses (Tesis doctoral)*, s.l.: University of London.
- Rathje, E., Faraj, F., Russell, S. & Bray, J., 2014. Empirical relationships for frequency content parameters of earthquake ground motions. *Earthquake Spectra* 20(1), pp. 119-144.
- Rosenblueth, E. & Bustamante, J., 1962. Distribution of structural response to earthquakes. *Journal of Engineering Mechanical Division ASCE* 88, pp. 75-106.
- Saragoni, G., 1977. The alfa-beta-gamma method for the characterization of earthquake accelerograms. *Proc. Sixth World Conference on Earthquake Engineering Vol. 1*, pp. 357-362.
- Sarma, S., 1971. Energy flux of strong earthquakes. *Tectonophysics* 11, pp. 159-173.
- Sarma, S. & Casey, B., 1990. Duration of strong motion earthquakes. *Proc. Ninth European Conference on Earthquake Engineering Vol. 10-A*, pp. 174-183.

- Sassa, S. & Yamazaki, H., 2016. Simplified Liquefaction Prediction and Assessment Method Considering Waveforms and Durations of Earthquakes. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*.
- Seed, H. & Idriss, I., 1971. Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potencial. *J. Geotech. Eng. Div. 97(9)*, pp. 1249-1273.
- Seed, H. & Idriss, I., 1982. *Ground Motions and Soil Liquefaction during Earthquakes*. Oakland: Earthquake Engineering Research Institute Monograph.
- Shahabi, M. & Mostaghel, N., 1984. Strong ground motion duration and effective cyclic acceleration. *Proc. Eighth World Conference on Earthquake Engineering Vol. 2*, pp. 843-850.
- Somerville, P., Smith, N., Graves, R. & Abrahamson, N., 1997. Modification of empirical strong ground motion attenuation relations to include the amplitude and duration effects of rupture directivity. *Seismological Research Letters 68(1)*, pp. 199-222.
- Theofanopoulos, N. & Drakopoulos, J., 1986. A study of strong motion duration of earthquakes in Greece. *Proc. Eighth European Conference on Earthquake Engineering Vol. 1*, pp. 3.2/65-3.2/67.
- Theofanopulos, N. & Watabe, M., 1989. A new definition of strong motion duration and comparison with other durations. *Struct. Engrg. Earthq. Engrg.*, pp. 111s-122s.
- Trifunac, M. & Brady, A., 1975. A study on the duration of strong earthquake ground motion. *Bulletin Seismical Society American 65*, pp. 581-626.
- Trifunac, M. & Brady, A., 1975. A study on the duration of strong earthquake ground motion. *Bulletin of the Seismological Society of America, 65(3)*, pp. 581-626.
- Trifunac, M. & Westermo, B., 1977. A note on the correlation of frequency-dependent duration of strong earthquake ground motion with the Modified Mercalli intensity and the geologic conditions at the recording site. *Bull. Seis. Soc. Am. 67(3)*, pp. 914-927.

UNDP, 2015. *Apoyo al proceso de recuperación post desastre del terremoto y tsunami en la región de Coquimbo, Chile*, s.l.: s.n.

Universidad de Chile, 2017. *Centro sismológico nacional*. [En línea]  
Available at: <http://evtdb.csn.uchile.cl/>

Universidad de Chile, s.f. *Centro Sismológico Nacional*. [En línea]  
Available at: <http://www.csn.uchile.cl/>

Unjoh, S. y otros, 2012. Effect of earthquake ground motions on soil liquefaction. *Soils and Foundations* 52(5), pp. 830-841.

Vanmarcke, E. & Lai, S., 1980. Strong-motion duration and RMS amplitude of earthquake records. *Bull. Seis. Soc. Am.* 81, pp. 1293-1307.

Xie, L. & Zhang, X., 1988. Engineering duration of strong-motion and its effect on seismic damage. *Proc. Ninth World Conference on Earthquake Engineering Vol. 12*, pp. 307-312.

Zahrah, T. & Hall, W., 1984. Earthquake energy absorption in SDOF structures. *J. Struct. Engrg. Div. ASCE* 110(ST8), pp. 1757-1772.

Zaré, M., Bard, B.-Y. & Ghafory-Ashtiany, M., 1999. Site characterizations for the Iranian strong motion network. *Soil Dyn Earthq Eng*, Volumen 18, pp. 101-123.

Zhou, Y. & Xie, L., 1984. A new definition of duration of strong ground motion. *Proc. Chinese National Conference on Earthquake Engineering*.