

Buenas prácticas en vertederos mediante computación científica

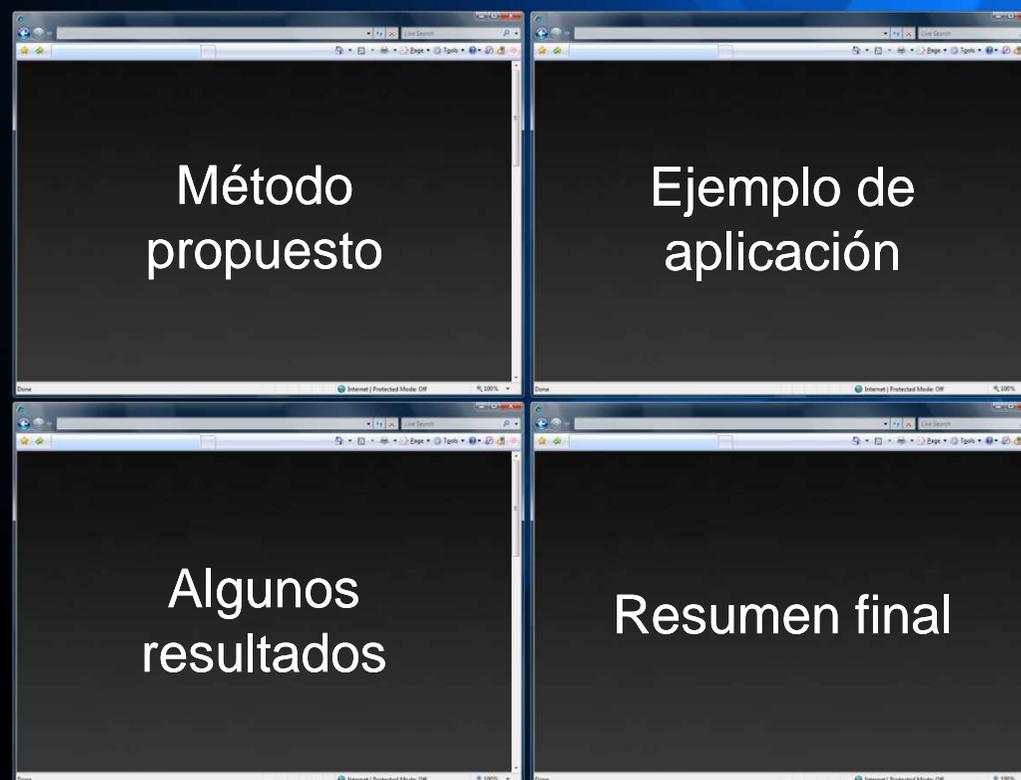
Miguel Cuartas, Ana López, Ana Lorena Esteban
& Amaya Lobo

Objetivos

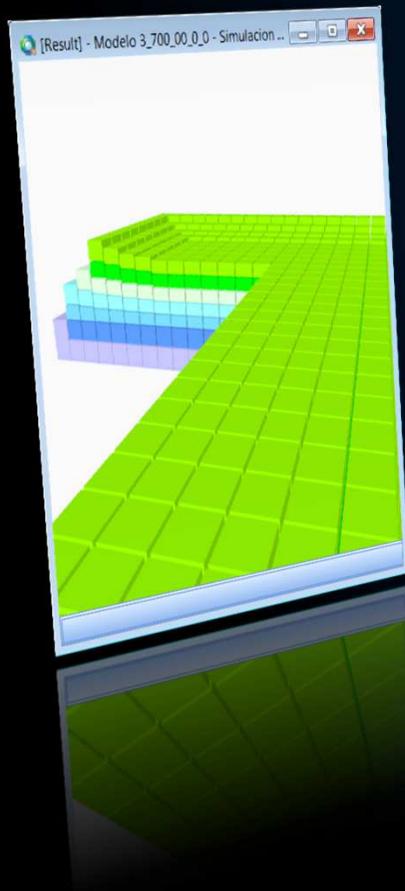


Vertederos de residuos sólidos
Criterios de diseño y operación
Computación científica
Nuevo método de análisis
Herramientas y técnicas
Ejemplo de aplicación

Esquema de la presentación



Método propuesto



Detalles del método

Herramienta: Moduelo v4

Plataforma de simulación

Detalles del método

Variables de diseño y operación

Espesor capa

Densidad

Cobertura

Aislamiento

Sellado final

Parámetros de control

Lixiviado

Metano y Energía

Asentamientos

Contaminación remanente

Estabilidad

Modelo básico

Morfología

LCS

Orden de llenado

Escenarios

Tipo de residuo

Clima

Herramientas de análisis

Regresión

Arboles

Gráficos

Variaciones del modelo

Simulación por computador

Moduelo v4

Altamira

Análisis y extracción de conocimiento

Conclusiones individuales

Gráficos comparativos

Sistemas de soporte de decisiones

Herramienta: Moduelo v4



Plataforma de simulación

- 15.000 celdas x 50 años = 14 horas
- 256 simulaciones x 14 horas = 149 días
- Posibles errores: $n \times 149$ days = Mucho Tiempo
- Supercomputador Altamira (IFCA)
 - 3.840 Procesadores
 - 74 Tflops

Ejemplo de aplicación



Variables de diseño
Parámetros de control
Escenarios
Modelo básico
Variantes del modelo

Variables de diseño y operación

Variable	Valor 1	Valor 2
Espesor de capa	3 metros	5 metros
Densidad de compactación	700 kg/m ³	900 kg/m ³
Cobertura intermedia	0 metros	0,3 metros
Aislamiento superficial	No	Si
Sellado pos-clausura	Baja permeabilidad	Impermeable

Parámetros de control

Cantidad de lixiviado

VTotal

VTotalExp

VTotalPos

VMaxDia

VMaxMes

VFinalBalsa

Calidad del lixiviado

CODTotal

NH4Total

CODTotalExp

NH4TotalExp

CODTotalPos

NH4TotalPos

CODMaxMes

NH4MaxMes

CODMaxConMes

NH4MaxConMes

CODFinalBalsa

NH4FinalBalsa

Contaminación remanente

SolidCarExp

SolidCarPos

TotalCarExp

TotalCarPos

FinalCellNH4

Gas y energía

CH4Generated

TotalEnergy

CH4Residual

Asentamientos

MinSett

AvgSett

DiffSett

MaxSett

AvgSettExp

Estabilidad geotécnica

MaxMoisture

FinalMoisture

Escenarios de generación de residuos

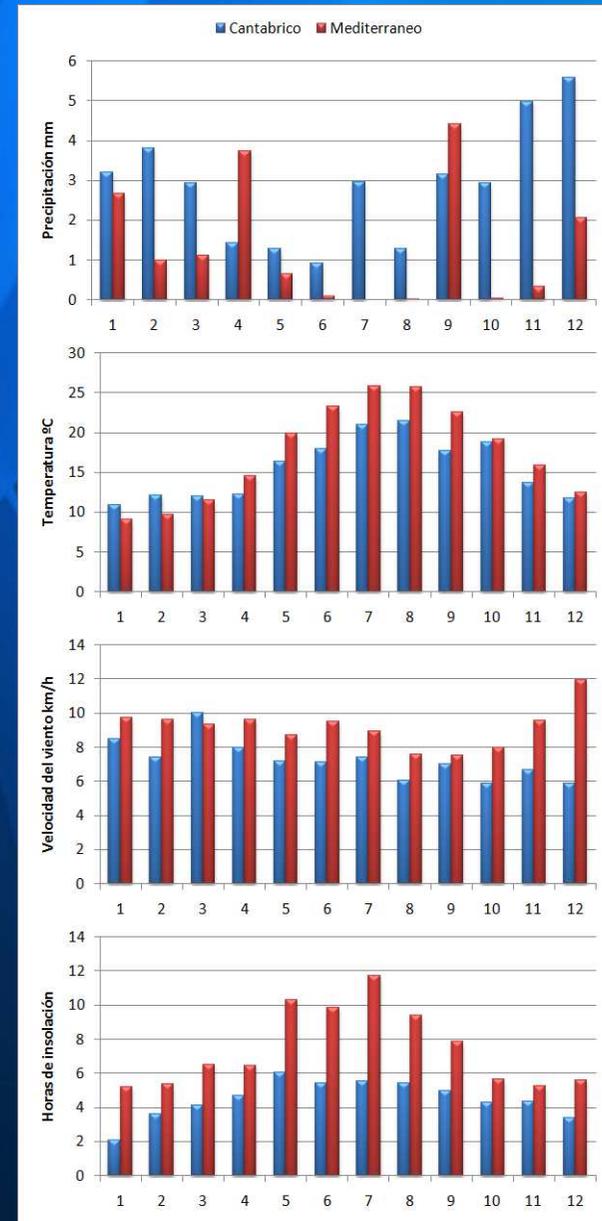
- Residuo tipo “Europeo”
 - Reciclaje y separación del residuo orgánico
- Residuo tipo “Americano”

	Residuo Europeo	Residuo americano
Inicio de explotación	01/01/2009	01/01/2009
Final de explotación	31/12/2029	31/12/2029
Residuos recibidos (T húmedo)	2.565.909	2.565.909
Residuos recibidos (T seco)	1.922.708	1.564.486
Humedad (% húmedo)	25	39
Poder calorífico (kcal/kg seco)	4.010	3.629
Rápidamente biodegradable (T seco)	208.865	369.383
Lentamente biodegradable (T seco)	55.534	26.980
Orgánico no biodegradable (T seco)	1.118.011	760.840
Cenizas (T seco)	540.299	407.283

Escenarios climáticos

- Clima Cantábrico
- Clima Mediterráneo

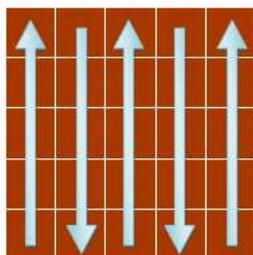
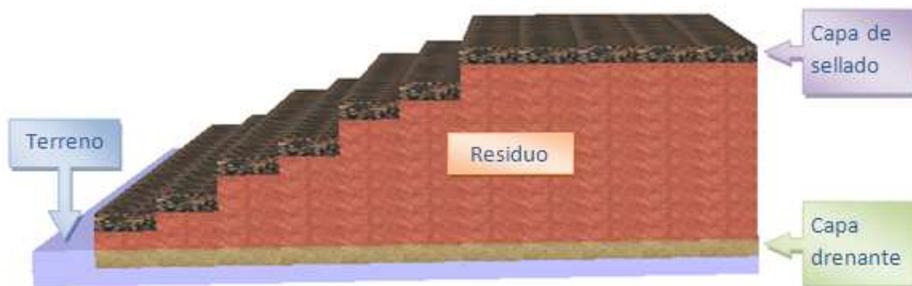
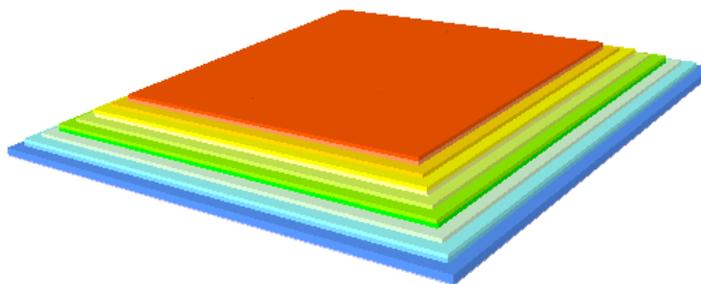
Datos medios diarios	Clima cantábrico	Clima mediterráneo
Precipitación (mm)	2,87	1,33
Humedad relativa (%)	74,02	73,11
Temperatura (°C)	15,53	17,52
Velocidad del viento (km/h)	7,25	9,17
Insolación (hours)	4,50	7,44



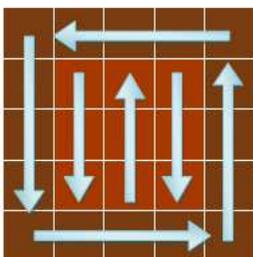
Modelo básico

- Periodo de operación: 1/1/2009 a 31/12/2029
- Periodo de pos-clausura: 30 años
- Base del vertedero 400 x 400 metros
- Residuos recibidos: 2.565.909 T

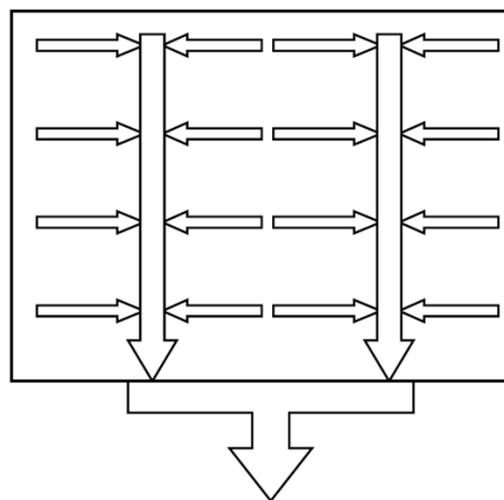
Modelo básico II



5	6	15	16	25
4	7	14	17	24
3	8	13	18	23
2	9	12	19	22
1	10	11	20	21



3	5	5	0	4	9	4	8	4	7
3	6	3	2	3	1	2	6	4	6
3	7	3	3	3	0	2	7	4	5
3	8	3	4	2	9	2	8	4	4
3	9	4	0	4	1	4	2	4	3



Variantes del modelo

Variación	Capa	Densidad	Cobertura	Aislamiento	Sellado pos-clausura
3_700_00_0_0	3 metros	700 kg/m ³	Ninguna	No	Poco permeable
3_700_00_0_1	3 metros	700 kg/m ³	Ninguna	No	Impermeable
3_700_00_1_0	3 metros	700 kg/m ³	Ninguna	Si	Poco permeable
3_700_00_1_1	3 metros	700 kg/m ³	Ninguna	Si	Impermeable
3_700_03_0_0	3 metros	700 kg/m ³	0,3 metros	No	Poco permeable
3_700_03_0_1	3 metros	700 kg/m ³	0,3 metros	No	Impermeable
3_700_03_1_0	3 metros	700 kg/m ³	0,3 metros	Si	Poco permeable
3_700_03_1_1	3 metros	700 kg/m ³	0,3 metros	Si	Impermeable
3_900_00_0_0	3 metros	900 kg/m ³	Ninguna	No	Poco permeable
3_900_00_0_1	3 metros	900 kg/m ³	Ninguna	No	Impermeable
3_900_00_1_0	3 metros	900 kg/m ³	Ninguna	Si	Poco permeable
3_900_00_1_1	3 metros	900 kg/m ³	Ninguna	Si	Impermeable
3_900_03_0_0	3 metros	900 kg/m ³	0,3 metros	No	Poco permeable
3_900_03_0_1	3 metros	900 kg/m ³	0,3 metros	No	Impermeable
3_900_03_1_0	3 metros	900 kg/m ³	0,3 metros	Si	Poco permeable
3_900_03_1_1	3 metros	900 kg/m ³	0,3 metros	Si	Impermeable
5_700_00_0_0	5 metros	700 kg/m ³	Ninguna	No	Poco permeable
5_700_00_0_1	5 metros	700 kg/m ³	Ninguna	No	Impermeable
5_700_00_1_0	5 metros	700 kg/m ³	Ninguna	Si	Poco permeable
5_700_00_1_1	5 metros	700 kg/m ³	Ninguna	Si	Impermeable
5_700_03_0_0	5 metros	700 kg/m ³	0,3 metros	No	Poco permeable
5_700_03_0_1	5 metros	700 kg/m ³	0,3 metros	No	Impermeable
5_700_03_1_0	5 metros	700 kg/m ³	0,3 metros	Si	Poco permeable
5_700_03_1_1	5 metros	700 kg/m ³	0,3 metros	Si	Impermeable
5_900_00_0_0	5 metros	900 kg/m ³	Ninguna	No	Poco permeable
5_900_00_0_1	5 metros	900 kg/m ³	Ninguna	No	Impermeable
5_900_00_1_0	5 metros	900 kg/m ³	Ninguna	Si	Poco permeable
5_900_00_1_1	5 metros	900 kg/m ³	Ninguna	Si	Impermeable
5_900_03_0_0	5 metros	900 kg/m ³	0,3 metros	No	Poco permeable
5_900_03_0_1	5 metros	900 kg/m ³	0,3 metros	No	Impermeable
5_900_03_1_0	5 metros	900 kg/m ³	0,3 metros	Si	Poco permeable
5_900_03_1_1	5 metros	900 kg/m ³	0,3 metros	Si	Impermeable

Variantes del modelo II

- 5 variables de estudio = 32 variaciones

Variación	Escenario climático	Tipo de residuo
3_700_00_0_0_CA	Cantábrico	Americano
3_700_00_0_0_CE	Cantábrico	Europeo
3_700_00_0_0_MA	Mediterráneo	Americano
3_700_00_0_0_ME	Mediterráneo	Europeo

- 4 escenarios = $32 \times 4 = 128$ variantes
- Completo / explotación $\times 2 = 256$ simulaciones

Variantes del modelo III

The screenshot shows a Windows Explorer window titled 'Explorer\Moduelo\Models'. The left pane displays a tree view of the directory structure, including folders like 'Security', 'Moduelo', 'Palettes', 'Cell Types', 'Run-off Types', 'Leachate Collection Types', 'Leachate Recirculation Types', 'Leachate Storage Models', 'Meteorological Models', 'Waste Generation Models', and 'Models'. The 'Models' folder is expanded, showing sub-folders 'Layers', 'Terrain', 'Cells', and 'Simulations', along with individual model files.

The right pane displays a table titled 'Models 32 Items' with the following columns: Name, Code, Cell Size X, Cell Size Y, and Cells Number. The table lists 32 model variants, each with a unique name, code, and a consistent cell size of 10x10 and 42 cells.

Name	Code	Cell Size X	Cell Size Y	Cells Number
Modelo 3_700_00_0_0	1	10	10	42
Modelo 3_700_00_0_1	2	10	10	42
Modelo 3_700_00_1_0	3	10	10	42
Modelo 3_700_00_1_1	4	10	10	42
Modelo 3_700_03_0_0	5	10	10	42
Modelo 3_700_03_0_1	6	10	10	42
Modelo 3_700_03_1_0	7	10	10	42
Modelo 3_700_03_1_1	8	10	10	42
Modelo 3_900_00_0_0	9	10	10	42
Modelo 3_900_00_0_1	10	10	10	42
Modelo 3_900_00_1_0	11	10	10	42
Modelo 3_900_00_1_1	12	10	10	42
Modelo 3_900_03_0_0	13	10	10	42
Modelo 3_900_03_0_1	14	10	10	42
Modelo 3_900_03_1_0	15	10	10	42
Modelo 3_900_03_1_1	16	10	10	42
Modelo 5_700_00_0_0	17	10	10	42
Modelo 5_700_00_0_1	18	10	10	42
Modelo 5_700_00_1_0	19	10	10	42
Modelo 5_700_00_1_1	20	10	10	42
Modelo 5_700_03_0_0	21	10	10	42
Modelo 5_700_03_0_1	22	10	10	42
Modelo 5_700_03_1_0	23	10	10	42
Modelo 5_700_03_1_1	24	10	10	42
Modelo 5_700_03_1_1	25	10	10	42
Modelo 5_700_03_1_1	26	10	10	42
Modelo 5_700_03_1_1	27	10	10	42
Modelo 5_700_03_1_1	28	10	10	42
Modelo 5_700_03_1_1	29	10	10	42
Modelo 5_700_03_1_1	30	10	10	42
Modelo 5_700_03_1_1	31	10	10	42
Modelo 5_700_03_1_1	32	10	10	42

Ready.

Algunos resultados (volumen de lixiviados)



Regresión lineal
Arboles de decisión
Representación gráfica

Regresión lineal

Volumen de lixiviados (normalizado)

Model variation	Layer	Density	Cover	Lining	Final cover	VTTotal
3_700_00_0_0_CE	3	700	0	No	Low perme.	3.567.874
3_700_00_0_1_CE	3	700	0	No	Impermeable	2.870.889
3_700_00_1_0_CE	3	700	0	Si	Low perme.	1.248.844
3_700_00_1_1_CE	3	700	0	Si	Impermeable	549.926
3_700_03_0_0_CE	3	700	0,3	No	Low perme.	2.679.634
3_700_03_0_1_CE	3	700	0,3	No	Impermeable	1.980.758
3_700_03_1_0_CE	3	700	0,3	Si	Low perme.	833.446
3_700_03_1_1_CE	3	700	0,3	Si	Impermeable	212.916
3_900_00_0_0_CE	3	900	0	No	Low perme.	3.747.362
3_900_00_0_1_CE	3	900	0	No	Impermeable	3.051.437
3_900_00_1_0_CE	3	900	0	Si	Low perme.	1.347.449
3_900_00_1_1_CE	3	900	0	Si	Impermeable	650.878
3_900_03_0_0_CE	3	900	0,3	No	Low perme.	2.985.357
3_900_03_0_1_CE	3	900	0,3	No	Impermeable	2.259.775
3_900_03_1_0_CE	3	900	0,3	Si	Low perme.	1.113.348
3_900_03_1_1_CE	3	900	0,3	Si	Impermeable	386.002
5_700_00_0_0_CE	5	700	0	No	Low perme.	3.977.949
5_700_00_0_1_CE	5	700	0	No	Impermeable	3.354.398
5_700_00_1_0_CE	5	700	0	Si	Low perme.	1.281.381
5_700_00_1_1_CE	5	700	0	Si	Impermeable	655.778
5_700_03_0_0_CE	5	700	0,3	No	Low perme.	2.749.904
5_700_03_0_1_CE	5	700	0,3	No	Impermeable	2.073.246
5_700_03_1_0_CE	5	700	0,3	Si	Low perme.	951.593
5_700_03_1_1_CE	5	700	0,3	Si	Impermeable	365.695
5_900_00_0_0_CE	5	900	0	No	Low perme.	4.015.911
5_900_00_0_1_CE	5	900	0	No	Impermeable	3.361.879
5_900_00_1_0_CE	5	900	0	Si	Low perme.	1.460.345
5_900_00_1_1_CE	5	900	0	Si	Impermeable	805.001
5_900_03_0_0_CE	5	900	0,3	No	Low perme.	3.083.146
5_900_03_0_1_CE	5	900	0,3	No	Impermeable	2.364.801
5_900_03_1_0_CE	5	900	0,3	Si	Low perme.	1.274.488
5_900_03_1_1_CE	5	900	0,3	Si	Impermeable	554.173



Model variation	Layer	Density	Cover	Lining	Final cover	VTTotal
3_700_00_0_0_CE	0	0	0	0	0	0,88
3_700_00_0_1_CE	0	0	0	0	1	0,70
3_700_00_1_0_CE	0	0	0	1	0	0,27
3_700_00_1_1_CE	0	0	0	1	1	0,09
3_700_03_0_0_CE	0	0	1	0	0	0,65
3_700_03_0_1_CE	0	0	1	0	1	0,46
3_700_03_1_0_CE	0	0	1	1	0	0,16
3_700_03_1_1_CE	0	0	1	1	1	0,00
3_900_00_0_0_CE	0	1	0	0	0	0,93
3_900_00_0_1_CE	0	1	0	0	1	0,75
3_900_00_1_0_CE	0	1	0	1	0	0,30
3_900_00_1_1_CE	0	1	0	1	1	0,12
3_900_03_0_0_CE	0	1	1	0	0	0,73
3_900_03_0_1_CE	0	1	1	0	1	0,54
3_900_03_1_0_CE	0	1	1	1	0	0,24
3_900_03_1_1_CE	0	1	1	1	1	0,05
5_700_00_0_0_CE	1	0	0	0	0	0,99
5_700_00_0_1_CE	1	0	0	0	1	0,83
5_700_00_1_0_CE	1	0	0	1	0	0,28
5_700_00_1_1_CE	1	0	0	1	1	0,12
5_700_03_0_0_CE	1	0	1	0	0	0,67
5_700_03_0_1_CE	1	0	1	0	1	0,49
5_700_03_1_0_CE	1	0	1	1	0	0,19
5_700_03_1_1_CE	1	0	1	1	1	0,04
5_900_00_0_0_CE	1	1	0	0	0	1,00
5_900_00_0_1_CE	1	1	0	0	1	0,83
5_900_00_1_0_CE	1	1	0	1	0	0,33
5_900_00_1_1_CE	1	1	0	1	1	0,16
5_900_03_0_0_CE	1	1	1	0	0	0,75
5_900_03_0_1_CE	1	1	1	0	1	0,57
5_900_03_1_0_CE	1	1	1	1	0	0,28
5_900_03_1_1_CE	1	1	1	1	1	0,09

Regresión lineal II

$V_{\text{Total}} =$

0,858

+ 0,047 Capa

+ 0,051 Densidad

– 0,166 Cobertura

– 0,566 Aislamiento

– 0,178 Sellado

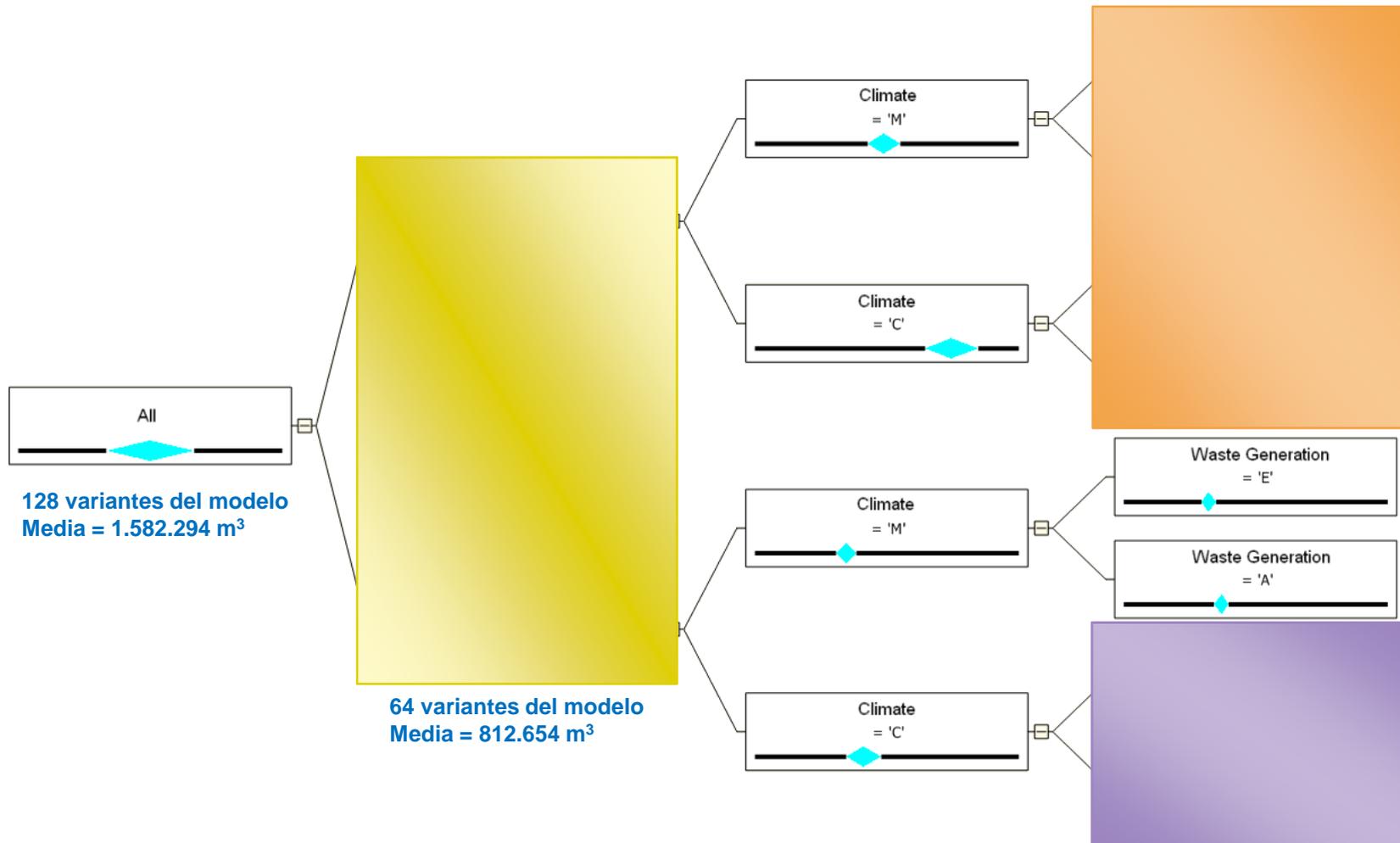
Dato	Valor
SST	3,150
SSE	0,077
SSR	3,073
r^2	0,976
s	0,054

Regresión lineal III

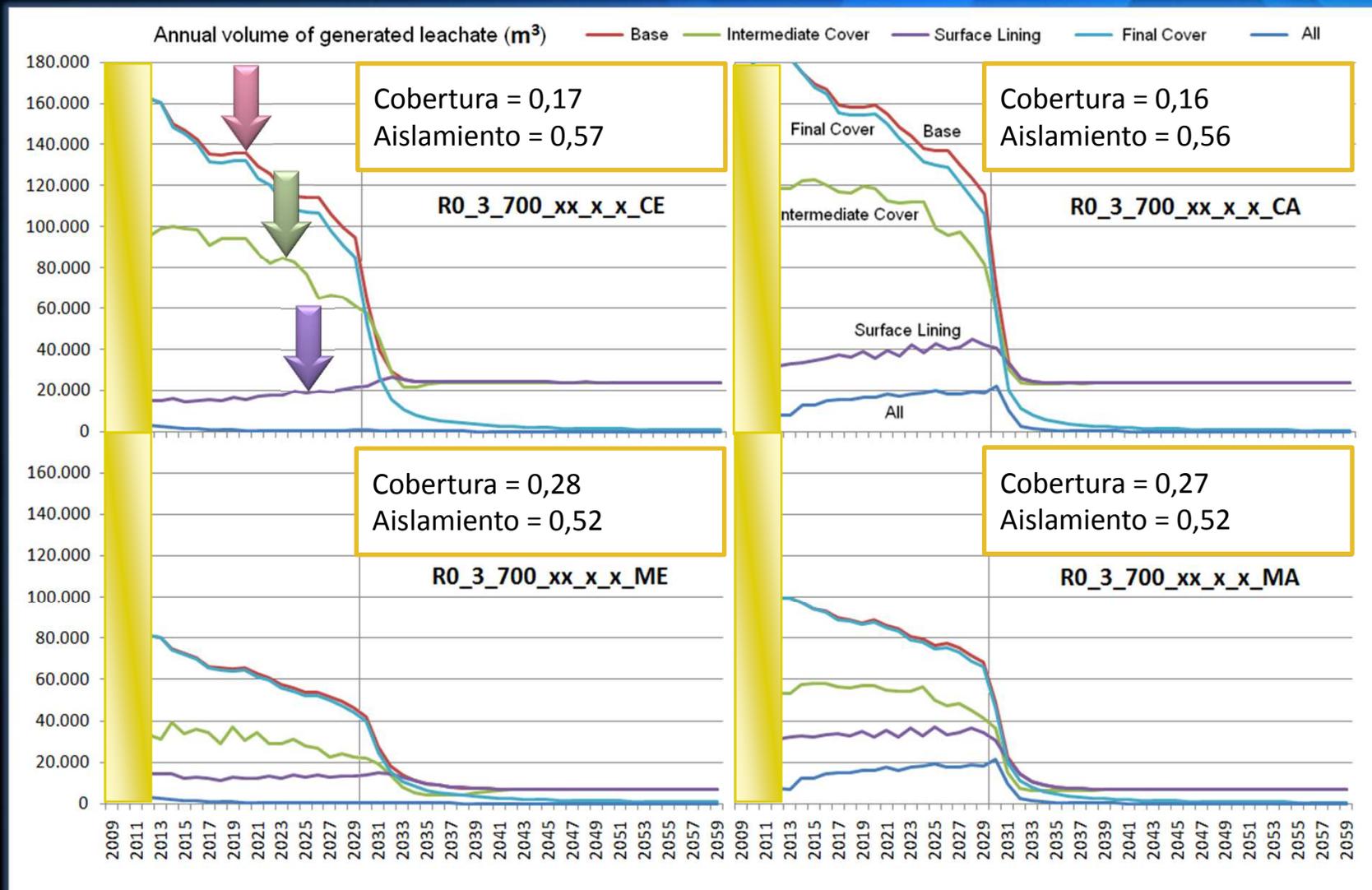
	Altura de capa				Densidad compactación				Cobertura intermedia				Aislamiento superficial				Sellado pos-clausura			
	CE	CA	ME	MA	CE	CA	ME	MA	CE	CA	ME	MA	CE	CA	ME	MA	CE	CA	ME	MA
VTot							-0,09		0,17	0,16	0,28	0,27	0,57	0,56	0,52	0,52	0,18	0,18	0,09	0,10
VTotExp							-0,10		0,18	0,19	0,27	0,28	0,69	0,69	0,59	0,59				
VTotPos									0,09	0,06	0,29	0,21	0,09	0,04	0,18	0,07	0,81	0,88	0,49	0,66
VMaxDia	-0,18	-0,15	0,05	0,19	-0,25	-0,19	-0,60	-0,19	0,11	0,09	0,12	0,29	0,43	0,49	0,21	0,26				
VMaxMes	-0,16	-0,14	-0,25	-0,29	-0,13		-0,24				0,12	0,14	0,56	0,57	0,43	0,57				
CODTotal			0,11	0,14	-0,19	-0,17	-0,28	-0,21		-0,14		-0,14	0,35	0,32	0,43	0,36	0,40	0,40	0,19	0,22
CODTotalExp		0,09	0,10	0,14	-0,19	-0,16	-0,27	-0,20		-0,10		-0,11	0,70	0,65	0,61	0,56				
CODTotalPos							-0,18	-0,14					-0,16	-0,17			0,52	0,53	0,34	0,44
CODMaxMes			0,09	0,13	-0,20	-0,14	-0,26	-0,15	-0,12	-0,26		-0,26	0,50	0,53	0,54	0,44	0,12	0,07		
NH4Total			0,12	0,15	-0,16	-0,14	-0,26	-0,17	-0,12	-0,23		-0,22	0,25	0,21	0,38	0,30	0,46	0,47	0,21	0,24
NH4TotalExp		0,11	0,10	0,15	-0,16	-0,12	-0,23	-0,15	-0,08	-0,21		-0,22	0,65	0,57	0,57	0,50				
NH4TotalPos							-0,18	-0,13		-0,12		-0,13	-0,15	-0,16			0,51	0,54	0,34	0,44
NH4MaxMes			0,10	0,16	-0,17	-0,10	-0,25	-0,13	-0,18	-0,34		-0,33	0,45	0,45	0,50	0,40	0,17	0,10		
CH4Generated					0,18		0,24		0,52	0,67	0,58	0,77					-0,16	-0,12	-0,08	-0,06
TotalEnergy					0,23		0,30		0,67	0,82	0,63	0,87	-0,13		-0,11					
MinSett	-0,39	-0,40	-0,40	-0,43	-0,43	-0,39	-0,43	-0,41	-0,14		-0,13									
MaxSett	-0,39	-0,40	-0,40	-0,43	-0,43	-0,39	-0,43	-0,40	-0,14		-0,13									
AvgSett	-0,39	-0,40	-0,40	-0,43	-0,43	-0,39	-0,43	-0,41	-0,14		-0,13									
AvgSettExp	-0,39	-0,42	-0,40	-0,43	-0,42	-0,41	-0,42	-0,41	-0,16		-0,15									
SolidCarExp	-0,11	-0,09	-0,12	-0,10	0,21	0,11	0,23	0,11	0,43	0,58	0,47	0,64	-0,32	-0,23	-0,26	-0,16				
TotalCarExp	-0,11	-0,09	-0,12	-0,10	0,20	0,11	0,23	0,11	0,43	0,58	0,47	0,64	-0,32	-0,23	-0,26	-0,16				
SolidCarPos	-0,08	-0,07	-0,10	-0,08	0,15	0,14	0,19	0,15	0,44	0,53	0,54	0,66	-0,11	-0,10	-0,11	-0,08	-0,24	-0,21	-0,12	-0,09
TotalCarPos	-0,08	-0,07	-0,10	-0,08	0,15	0,14	0,19	0,15	0,44	0,53	0,54	0,65	-0,11	-0,10	-0,11	-0,08	-0,24	-0,21	-0,12	-0,09
MaxMoisture					0,24	0,25	0,26	0,27	-0,48	-0,57	-0,53	-0,60								
FinalMoisture					0,21	0,21	0,22	0,22	-0,53	-0,61	-0,58	-0,64					0,16	0,12	0,12	0,08

Árboles de decisión

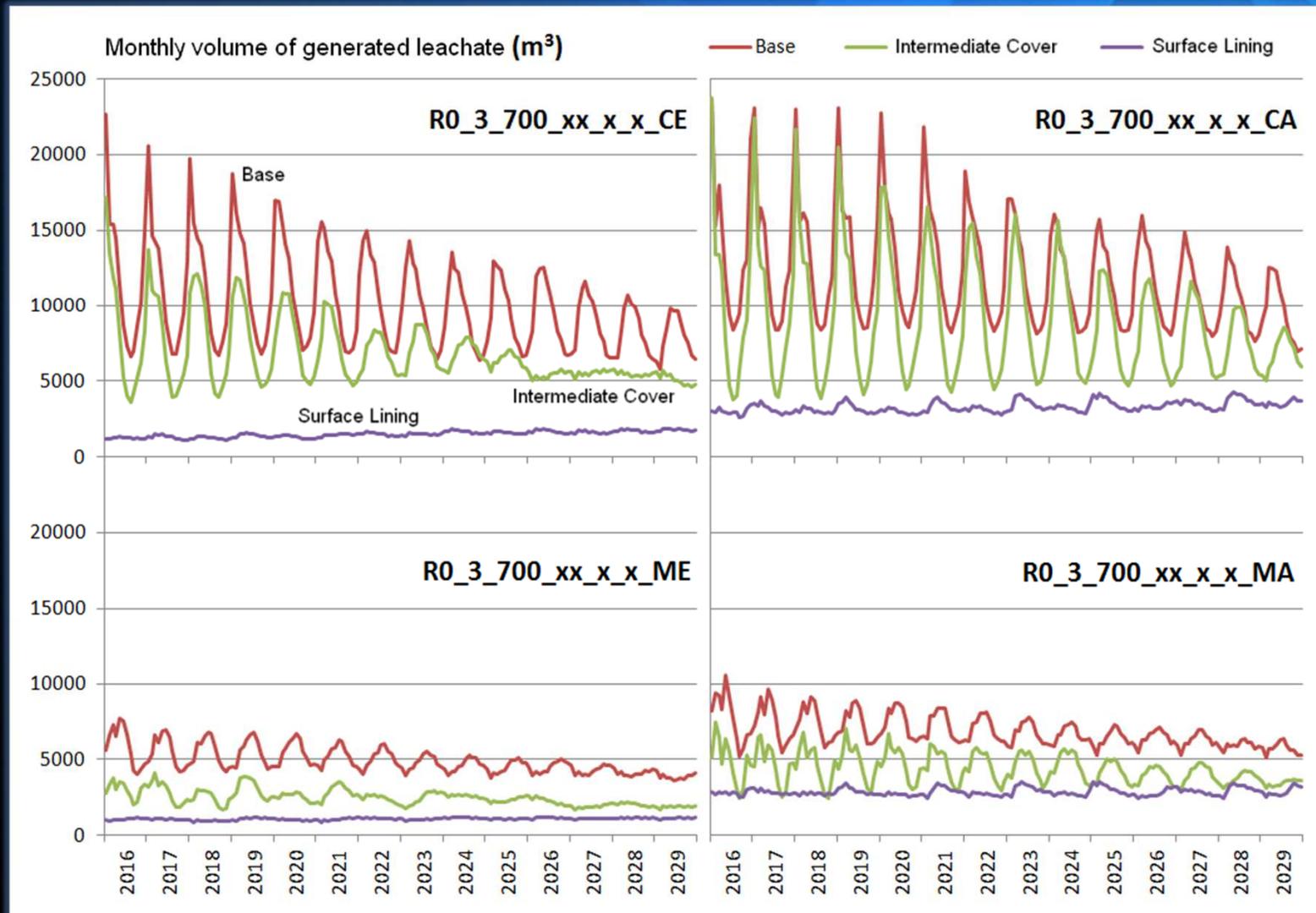
Volumen de lixiviados



Lixiviado generado



Variabilidad del lixiviado generado



Resumen final



Nueva metodología
Ejemplo de aplicación

Nueva metodología

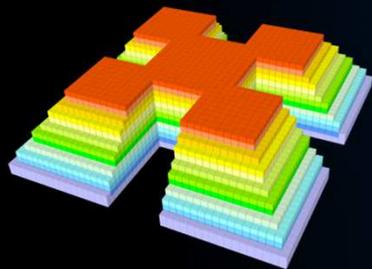
- Método para el análisis de prácticas en vertedero
 - Evalúa el impacto de cada variable
 - Relevancia comparativa entre variables
 - Base para un futuro sistema de soporte de decisión
- Herramientas y técnicas
 - Modulo v4 y el supercomputador Altamira
 - Análisis de datos y extracción de conocimiento
 - Modelos de regresión lineal
 - Árboles de decisión
 - Representaciones gráficas

Ejemplo de aplicación

- Impacto de las prácticas de diseño y operación en el volumen de lixiviados generados

	Altura de capa	Densidad de compactación	Cobertura intermedia	Aislamiento superficial	Sellado posclausura
Volumen total de lixiviados			+	+++	++

- El escenario (clima, residuo) es relevante
 - Tipo de residuo cambia el efecto de la cobertura intermedia en la variabilidad del volumen de lixiviado



miguel.cuartas@gmail.com
amaya.lobo@unican.es



VII Simposio Iberoamericano
en Ingeniería de Residuos
(Santander 2017)
[http:// redisa.unican.es](http://redisa.unican.es)