

Cathodic Protection Workshop

Ancona, 23 Settembre 2022

ANALISI VARIE SUI RISULTATI DELLA FORMULA DI VON BAECKMAN PER LA DISTRIBUZIONE DEI POTENZIALI



U. Marinelli

F.M. Engineering S.r.l. – Ingegneria impianti contro la corrosione - Italia

PREMESSA

L'ingegneria della Protezione Catodica, fatta da un'accozzaglia di praticoni degli anni 60 senza neanche una normativa, si sta trasformando verso regole sempre più accurate con una normazione dedicata e non derivata dal mondo elettrico.

Al progettista medio però vengono ancora dei dubbi quando si tratta di distribuire gli anodi nelle aree concentrate.

Questo lavoro è nato come conseguenza dei miei dubbi... spero sia utile anche ad altri.

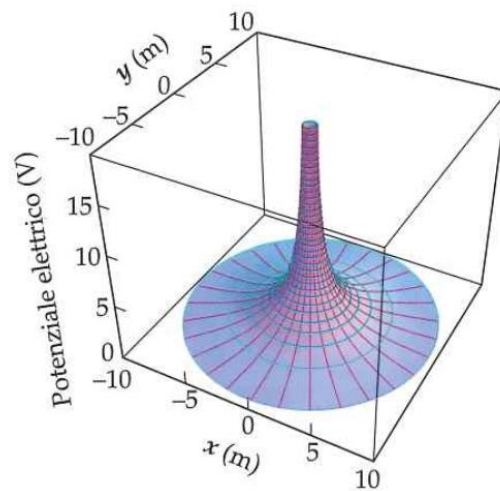
Il Campo elettrico e la distribuzione dei potenziali

Terra locale - Terra remota

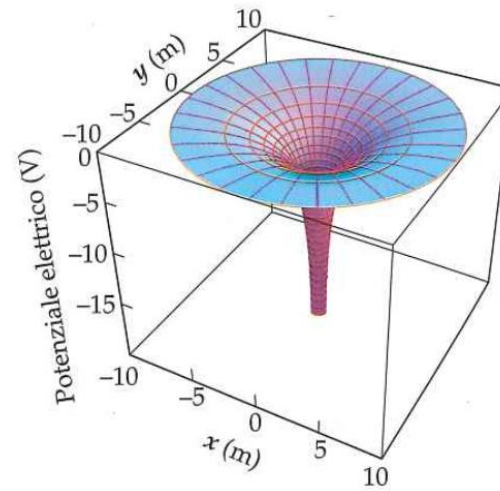
Cosa suggerisce Von Baeckman

Il Campo Elettrico

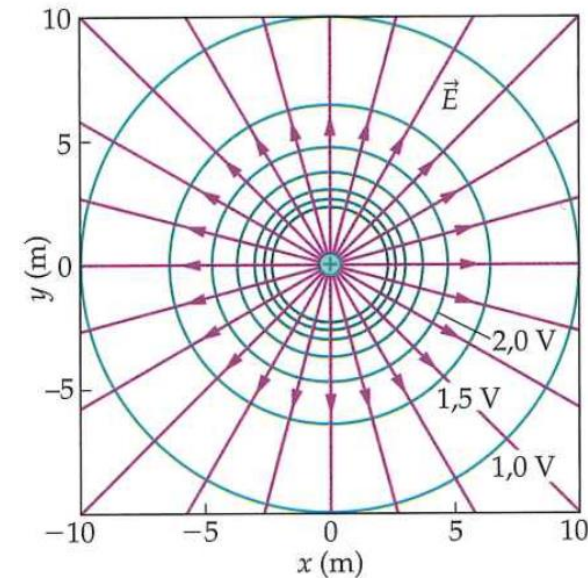
Il **campo elettrico** è un campo di forze generato nello spazio dalla presenza di una o più cariche elettriche



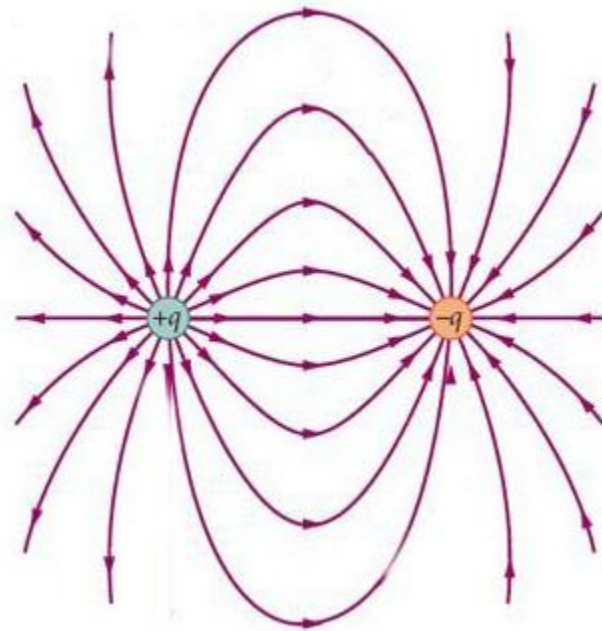
a) Potenziale elettrico in prossimità di una carica positiva



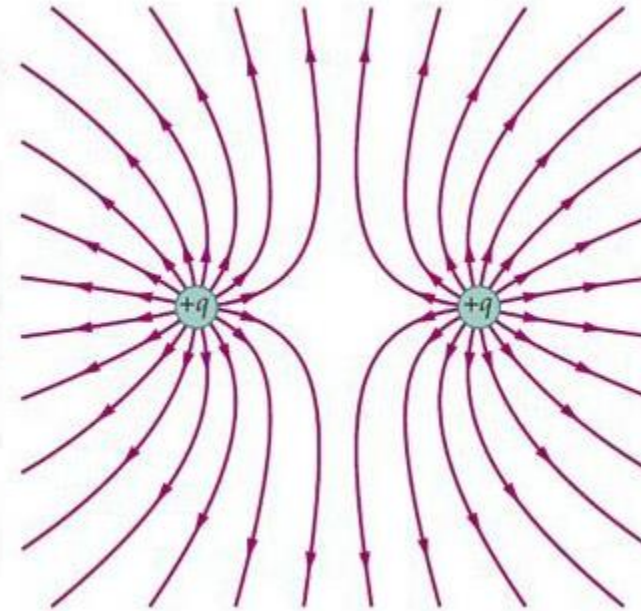
b) Potenziale elettrico in prossimità di una carica negativa



Il Campo Elettrico



Linee di corrente per un dipolo



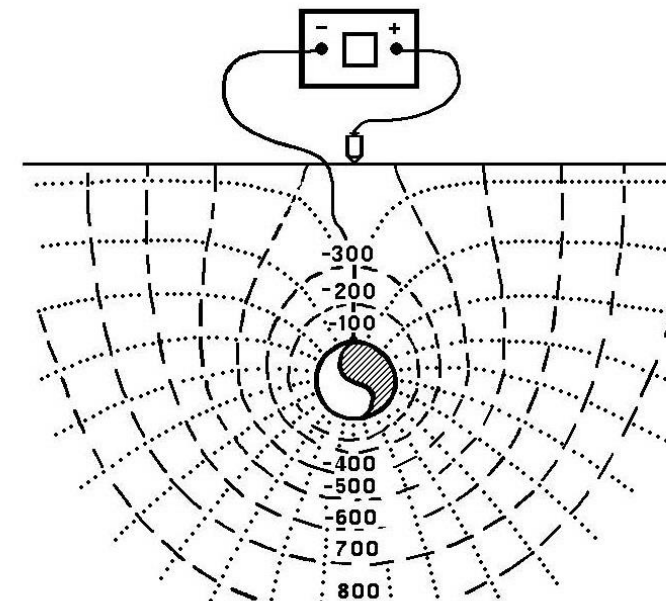
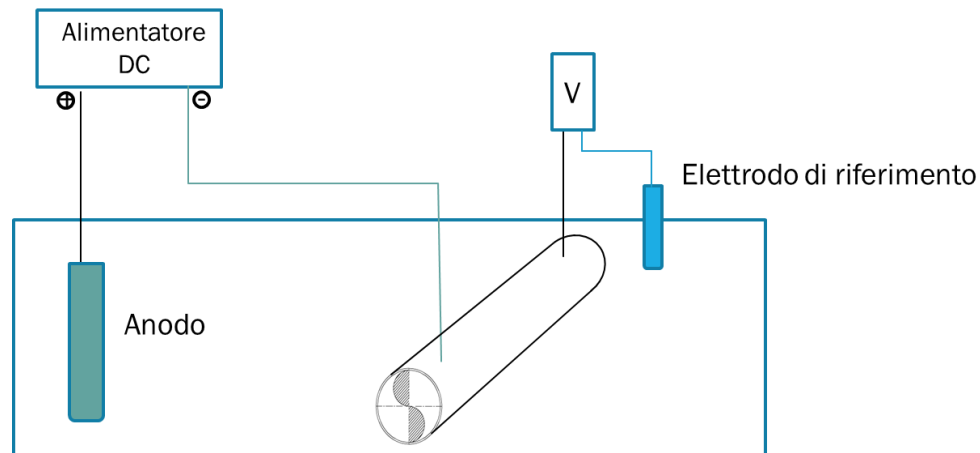
Linee di corrente per due cariche positive

Il capo elettrico è sempre perpendicolare alle superfici equipotenziali.

Il Campo Elettrico

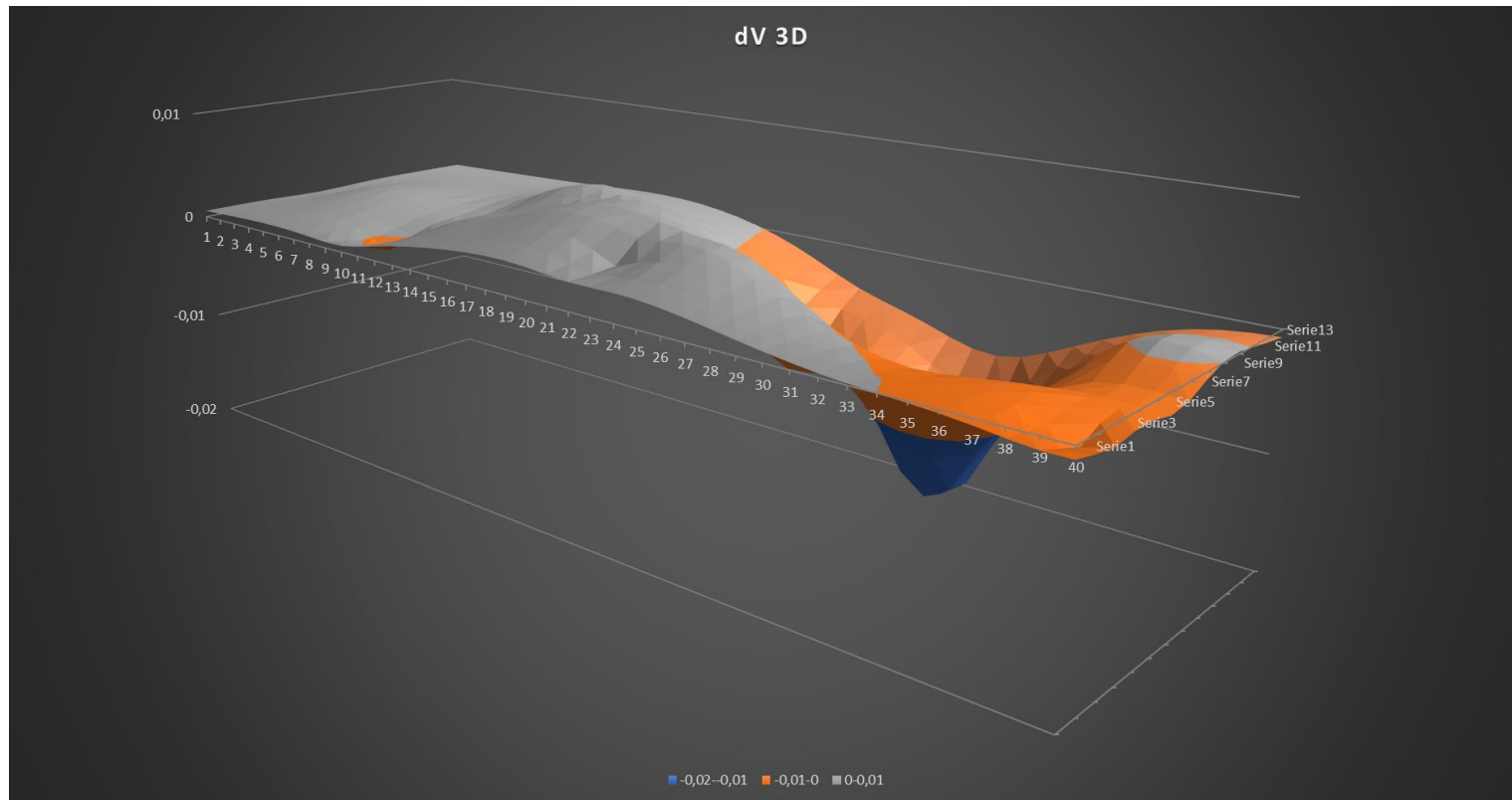
La protezione Catodica, basa il suo principio di funzionamento sull' ELETTOCHIMICA.

Siccome pone un elettrodo POSITIVO ed un Elettrodo NEGATIVO in un ELETTROLITA, analogamente alle cariche elettriche viste in precedenza, quando passa corrente, genera un CAMPO ELETTRICO.



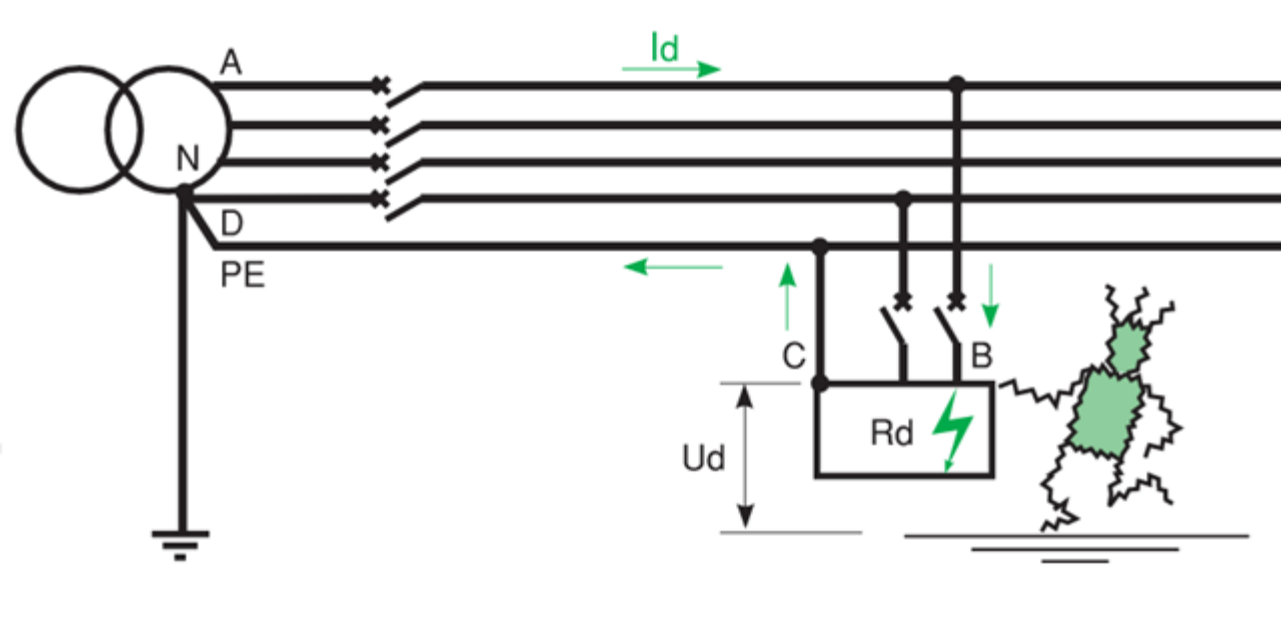
Il Campo Elettrico

Un **campo elettrico** può diventare complesso quando ci sono distribuzioni di varie cariche elettriche diverse



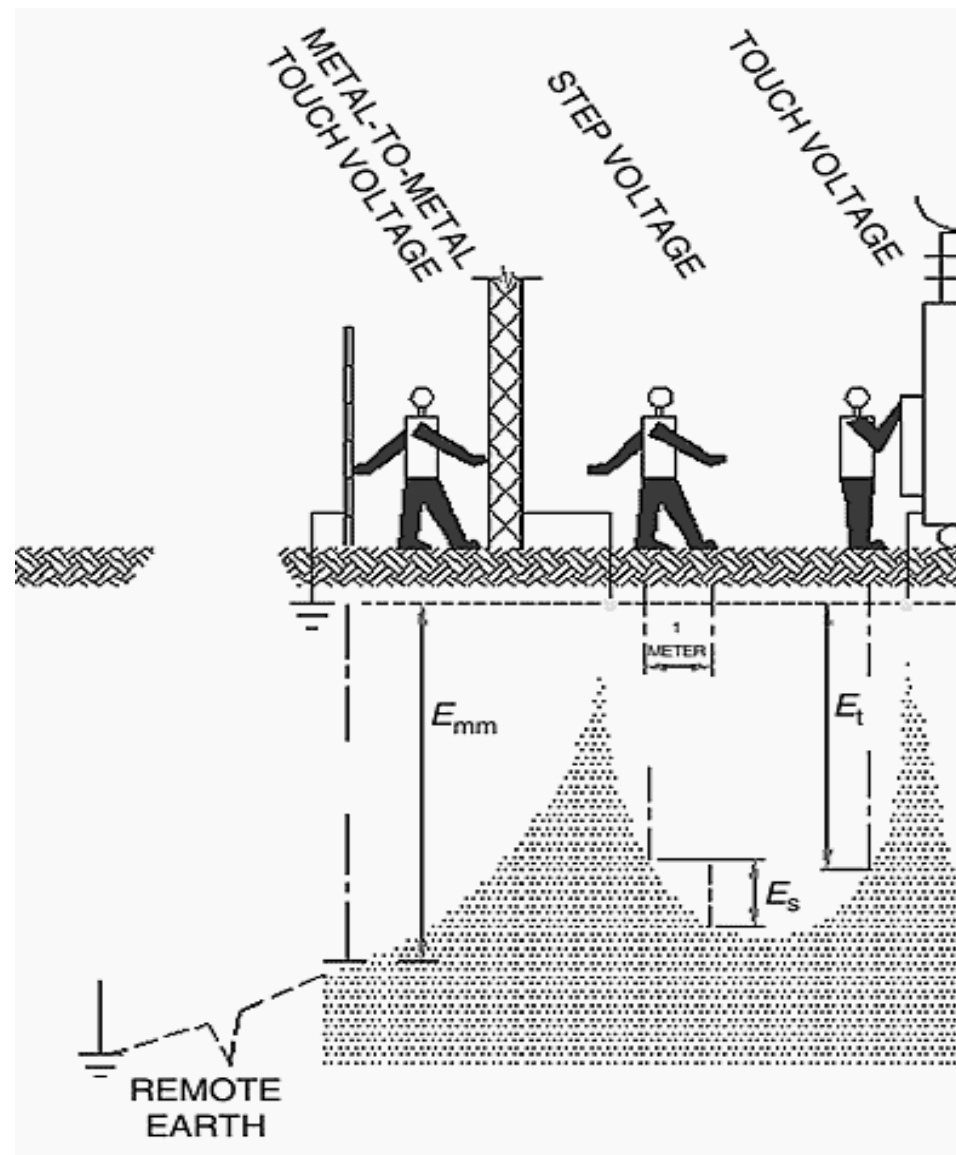
Un **campo elettrico** reale assomiglia più ad un campo complesso che ad uno semplice a «due punti»

Terra locale - Terra remota



O Terra locale, o Terra remota, ricordiamoci che con l'elettricità non si scherza
(trovata sul web)

Terra locale - Terra remota



Definizioni Ufficiali: cosa dice la norma UNI 14505

Gradiente di potenziale di un dispersore

Il dispersore può essere considerato come punto di origine di linee equipotenziali. Le linee equipotenziali esistono fino a una distanza remota dall'anodo. Nelle adiacenze del dispersore anodico le linee del potenziale anodico sono concentrate e quindi il gradiente di potenziale in volt al metro (V/m) sarà più alto e il potenziale del terreno si innalzerà.

Definizioni Ufficiali: cosa dice la norma UNI 14505

Gradiente di potenziale di un dispersore

Il dispersore può essere considerato come punto di origine di linee equipotenziali. Le linee equipotenziali esistono fino a una distanza remota dall'anodo. Nelle adiacenze del dispersore anodico le linee del potenziale anodico sono concentrate e quindi il gradiente di potenziale in volt al metro (V/m) sarà più alto e il potenziale del terreno si innalzerà.

S'innalza o s'abbassa?
Forse dipende dal verso della corrente ?

Criterio generale «pratico» suggerito da AMPP nei suoi corsi per definire la «copertura» degli anodi

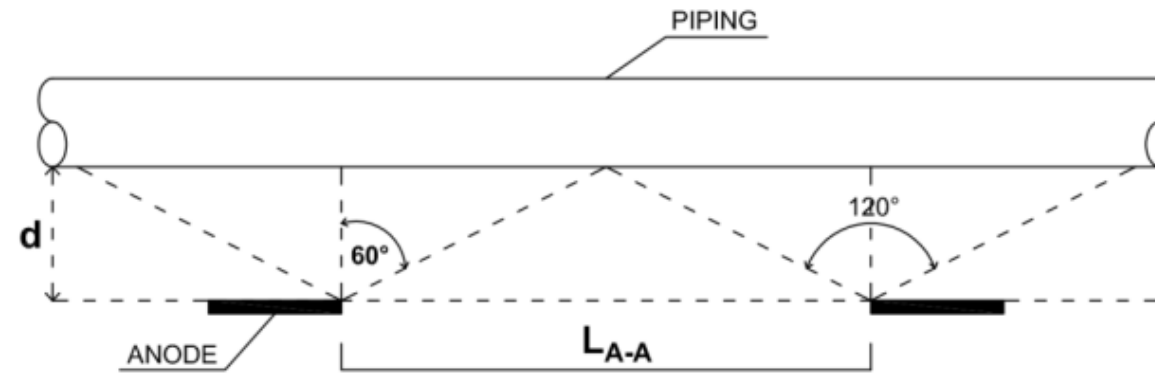


Figure 1: Anode-to-Anode Spacing to achieve relatively uniform current distribution with close Anode-to-Anode Spacing.

The distance L_{A-A} shall be calculated from the following equation:

$$L_{A-A} = 2 \cdot d \cdot \tan \theta$$

where: L_{A-A} is the Anode-to-Anode Spacing;
 d is the anode distance from piping;
 θ is 60° .

Cosa dice la norma UNI 14505

Protezione Catodica di strutture complesse

Calcolo del potenziale del terreno sulla sua superficie

Generalità

In un elettrolita che, per semplicità, si considera uniforme, si può calcolare il potenziale del terreno sulla sua superficie. Questi calcoli possono essere usati per dare indicazioni sull'influenza di anodi posti nelle immediate vicinanze della struttura complessa.

Tuttavia, questa influenza dipende anche dalla geometria e dall'area della struttura complessa.

Il profilo del potenziale nel senso dell'asse del dispersore (asse x) è diverso dal profilo in senso perpendicolare all'asse del dispersore stesso (asse z).

Le equazioni da (1) a (3) si applicano a dispersori orizzontali e quelle da (4) a (6) a dispersori verticali.

$$U_x = \frac{\rho l}{2\pi L} \ln \left[\frac{x+L + \sqrt{t^2 + (x+L)^2}}{x + \sqrt{t^2 + x^2}} \right] \quad (1)$$

$$U_z = \frac{\rho l}{2\pi L} \ln \left[\frac{L + \sqrt{4t^2 + 4z^2 + L^2}}{-L + \sqrt{4t^2 + 4z^2 + L^2}} \right] \quad (2)$$

$$U_A = \frac{\rho l}{2\pi L} \left\langle \ln \left[\frac{L + \sqrt{d^2 + L^2}}{-L + \sqrt{d^2 + L^2}} \right] + \ln \left[\frac{L + \sqrt{(4t-d)^2 + L^2}}{-L + \sqrt{(4t-d)^2 + L^2}} \right] \right\rangle \quad (3)$$

$$U_y = \frac{\rho l}{2\pi L} \ln \left[\frac{t+L + \sqrt{y^2 + (t+L)^2}}{t + \sqrt{y^2 + t^2}} \right] \quad (4)$$

$$U_A = \frac{\rho l}{2\pi L} \ln \left[\frac{2L}{d} \sqrt{\frac{4t+3L}{4t+L}} \right] \quad (5)$$

rsori

L'equazione (5) si applica quando $d \ll L$; altrimenti si usa la seguente equazione:

$$U_A = \frac{\rho I}{4\pi L} \left\langle \ln \left[\frac{L + \sqrt{d^2 + L^2}}{-L + \sqrt{d^2 + L^2}} \right] + \ln \left[\frac{4t + 3L + \sqrt{d^2 + (4t + 3L)^2}}{4t + L + \sqrt{d^2 + (4t + L)^2}} \right] \right\rangle \quad (6)$$

dove:

U_A	è il potenziale dell'anodo verso la condotta, misurato rispetto alla terra remota;	[V]
U_x	è il potenziale sulla superficie del terreno nel punto x;	[V]
U_y	è il potenziale sulla superficie del terreno nel punto y;	[V]
U_z	è il potenziale sulla superficie del terreno nel punto z;	[V]
t	è la profondità del dispersore, in metri;	[m]
L	è la lunghezza del dispersore, in metri;	[m]
d	è il diametro della sezione del dispersore, in metri;	[m]
ρ	è la resistività del terreno (assunta uguale a 100 $\Omega \times m$);	[$\Omega \times m$]
I	è la corrente erogata dal dispersore anodico.	[A]

Per dispersori con anodi orizzontali

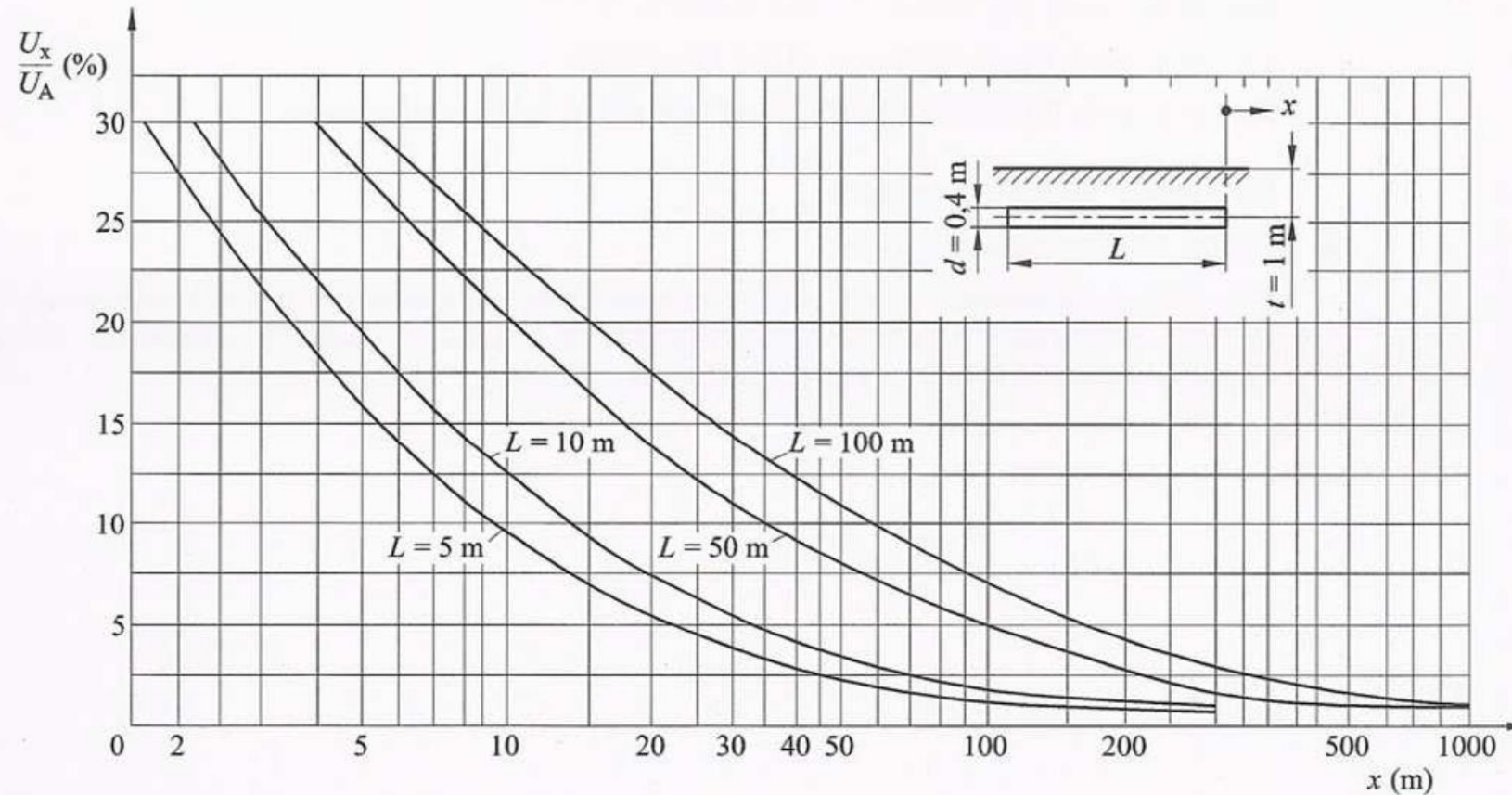
Nota Vedere punto D.3.1 per la spiegazione dei simboli.

I grafici sono stati tracciati servendosi delle equazioni (1) e (3), con $d = 0,4$ m e $t = 1$ m

figura D.1

Curva di attenuazione della tensione intorno a un dispersore orizzontale, misurata lungo l'asse x (asse longitudinale del dispersore)

dispersori

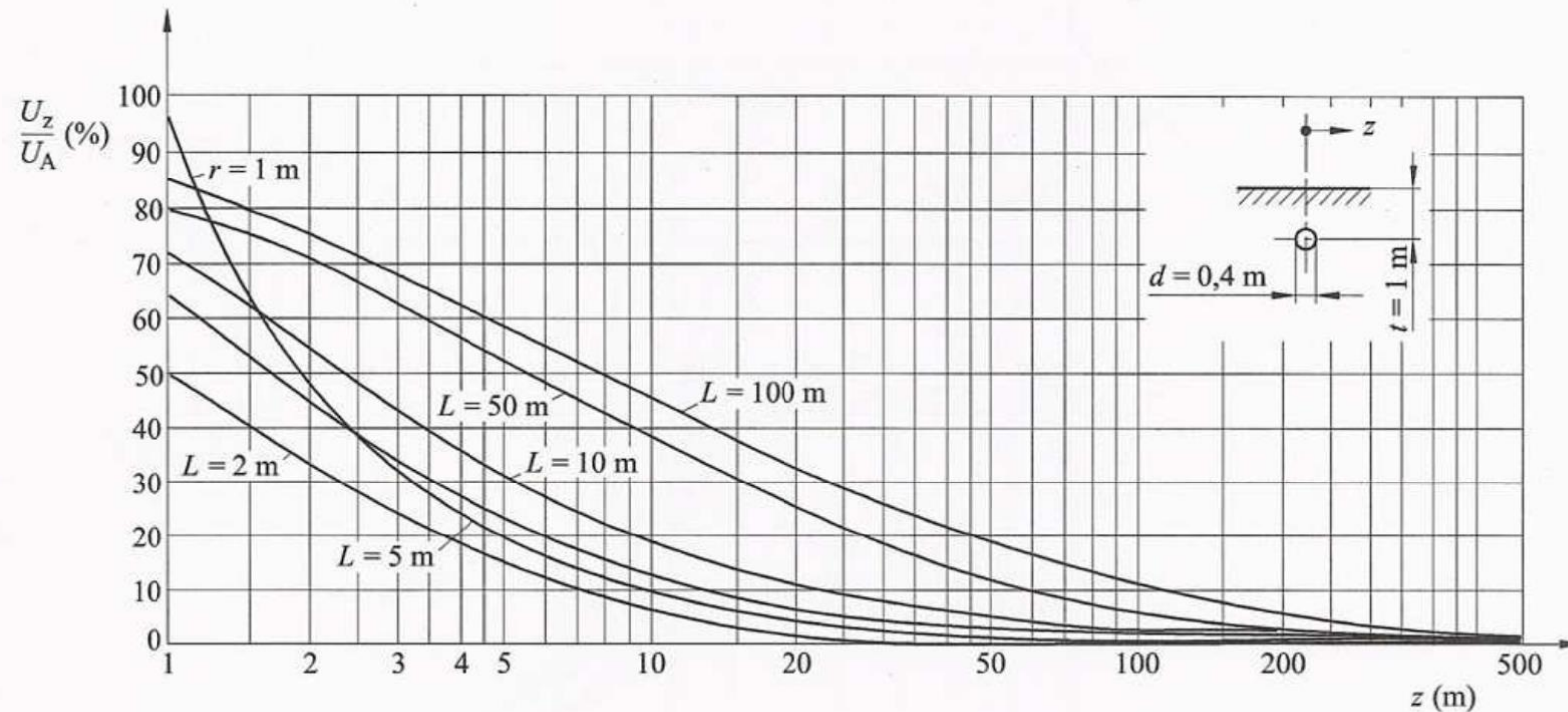


Nota Vedere punto D.3.1 per la spiegazione dei simboli.

I grafici sono stati tracciati servendosi delle equazioni (2) e (3), con $d = 0,4$ m e $t = 1$ m.

La curva " $r = 1$ m" si applica a un ipotetico dispersore emisferico con raggio $r = 1$ m, usato come riferimento.

figura D.2 Curva di attenuazione della tensione intorno a un dispersore orizzontale, misurata lungo l'asse z (perpendicolare all'asse del dispersore)



La curva di attenuazione della tensione ("cono" di tensione dell'anodo, espresso dai rapporti U_x/U_A e U_z/U_A) che si sviluppa, sulla superficie del terreno, intorno ad anodi orizzontali si calcola usando le equazioni da (1) a (3), dove $d = 0,4$ m e $L = 1$ m.

- Lungo l'asse x (come prolungamento del dispersore).
- Lungo l'asse z (perpendicolarmente all'anodo, al centro dell'anodo).

D.3.3

Per dispersori con anodi verticali

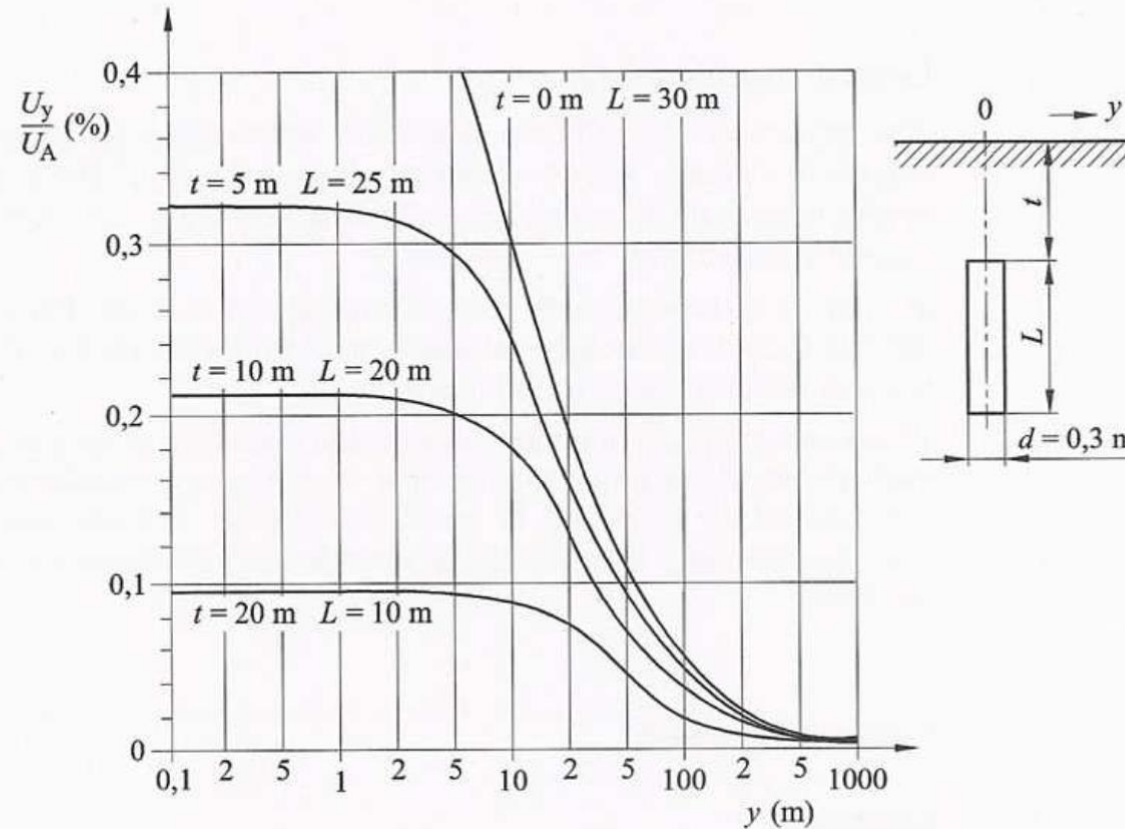
Nota Vedere punto D.3.1 per la spiegazione dei simboli.

La curva di attenuazione della tensione ("cono" di tensione dell'anodo, espresso dal rapporto U_y/U_A) che si sviluppa, sulla superficie del terreno, intorno ad anodi verticali si calcola usando le equazioni (4) e (5), oppure (4) e (6), dove $d = 0,3$ m.

I Dispersori

figura D.3

Curve di attenuazione della tensione intorno a dispersori verticali, misurata, sulla superficie del terreno, lungo l'asse y



AMPP – ISO

Approccio leggermente differente... chi avrà ragione?

AMPP – ISO

AMPP: Uno è un approccio puramente grafico, facile da usare per distribuire gli anodi.
Ma non dice nulla ne sull'interazione tra anodi, ne tra anodi e catodi.
Forse è ancora un po' legato al mondo dei praticoni.

ISO: approccio analitico ma oltre ad essere complicato
anch'esso non tiene per nulla conto dell'interazione tra anodi.

Simulazioni

Direi che è il momento di andare a capirci di più...

Di tutte le formule proposte, solo alcune ci interessano particolarmente, e che ho usato per le simulazioni grafiche.

La norma dice:

Il profilo del potenziale nel senso dell'asse del dispersore (asse x) è diverso dal profilo in senso perpendicolare all'asse del dispersore stesso (asse z).

Chiaramente si pensa ad anodi di forma allungata.

Simulazioni

l'asse x (come prolungamento del dispersore).

l'asse z (perpendicolarmente all'anodo, al centro dell'anodo).

U_A è il potenziale dell'anodo verso la condotta, misurato rispetto alla terra remota; [V]

$$U_A = \frac{\rho I}{2\pi L} \left\langle \ln \left[\frac{L + \sqrt{d^2 + L^2}}{-L + \sqrt{d^2 + L^2}} \right] + \ln \left[\frac{L + \sqrt{(4t-d)^2 + L^2}}{-L + \sqrt{(4t-d)^2 + L^2}} \right] \right\rangle$$

t è la profondità del dispersore, in metri; [m]

L è la lunghezza del dispersore, in metri; [m]

d è il diametro della sezione del dispersore, in metri; [m]

ρ è la resistività del terreno (assunta uguale a $100 \Omega \times m$); [$\Omega \times m$]

I è la corrente erogata dal dispersore anodico. [A]

Simulazioni

La formula l'abbiamo individuata:

$$U_A = \frac{\rho l}{2\pi L} \left\langle \ln \left[\frac{L + \sqrt{d^2 + L^2}}{-L + \sqrt{d^2 + L^2}} \right] + \ln \left[\frac{L + \sqrt{(4t-d)^2 + L^2}}{-L + \sqrt{(4t-d)^2 + L^2}} \right] \right\rangle$$

Se inseriamo Correnti « l » col segno negativo, possiamo egualmente simulare il campo elettrico che si forma intorno al catodo.

Simulazioni

La formula l'abbiamo individuata:

$$U_A = \frac{\rho l}{2\pi L} \left\langle \ln \left[\frac{L + \sqrt{d^2 + L^2}}{-L + \sqrt{d^2 + L^2}} \right] + \ln \left[\frac{L + \sqrt{(4t-d)^2 + L^2}}{-L + \sqrt{(4t-d)^2 + L^2}} \right] \right\rangle$$

Se inseriamo Correnti «*l*» col segno negativo, possiamo egualmente simulare il campo elettrico che si forma intorno al catodo.

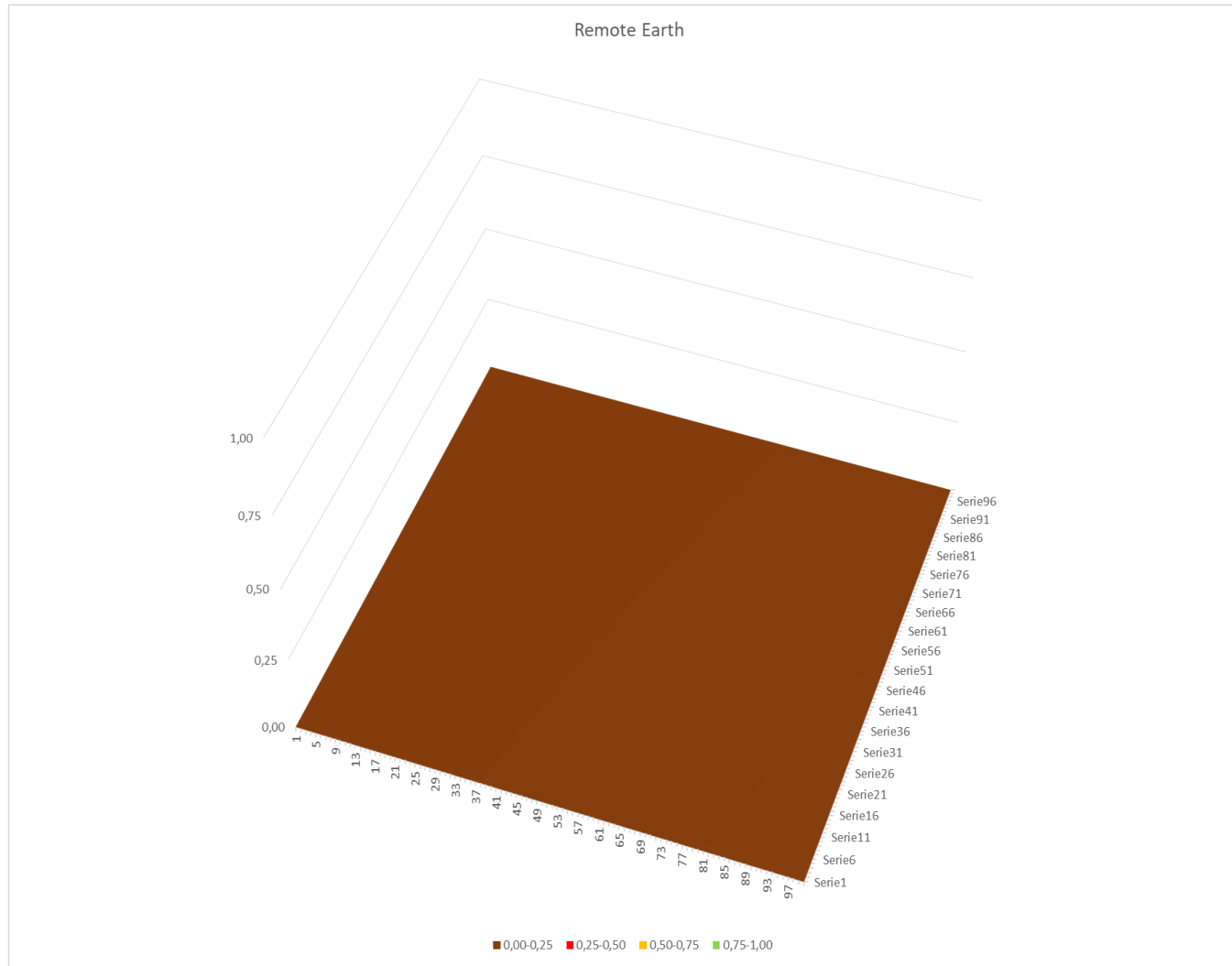
A questo punto creo una matrice supponiamo di 100 x 100 caselle (in cui ogni casella corrisponde ad 1 metro).

Piazzando arbitrariamente catodi ed anodi in certi punti della matrice, posso calcolare U_a ad OGNI distanza dal mio elettrodo (ogni casella).

Siccome la somma di ogni effetto singolo è uguale alla somma degli effetti, calcolandoli ad uno ad uno e sommandoli assieme ottengo una matrice totale.

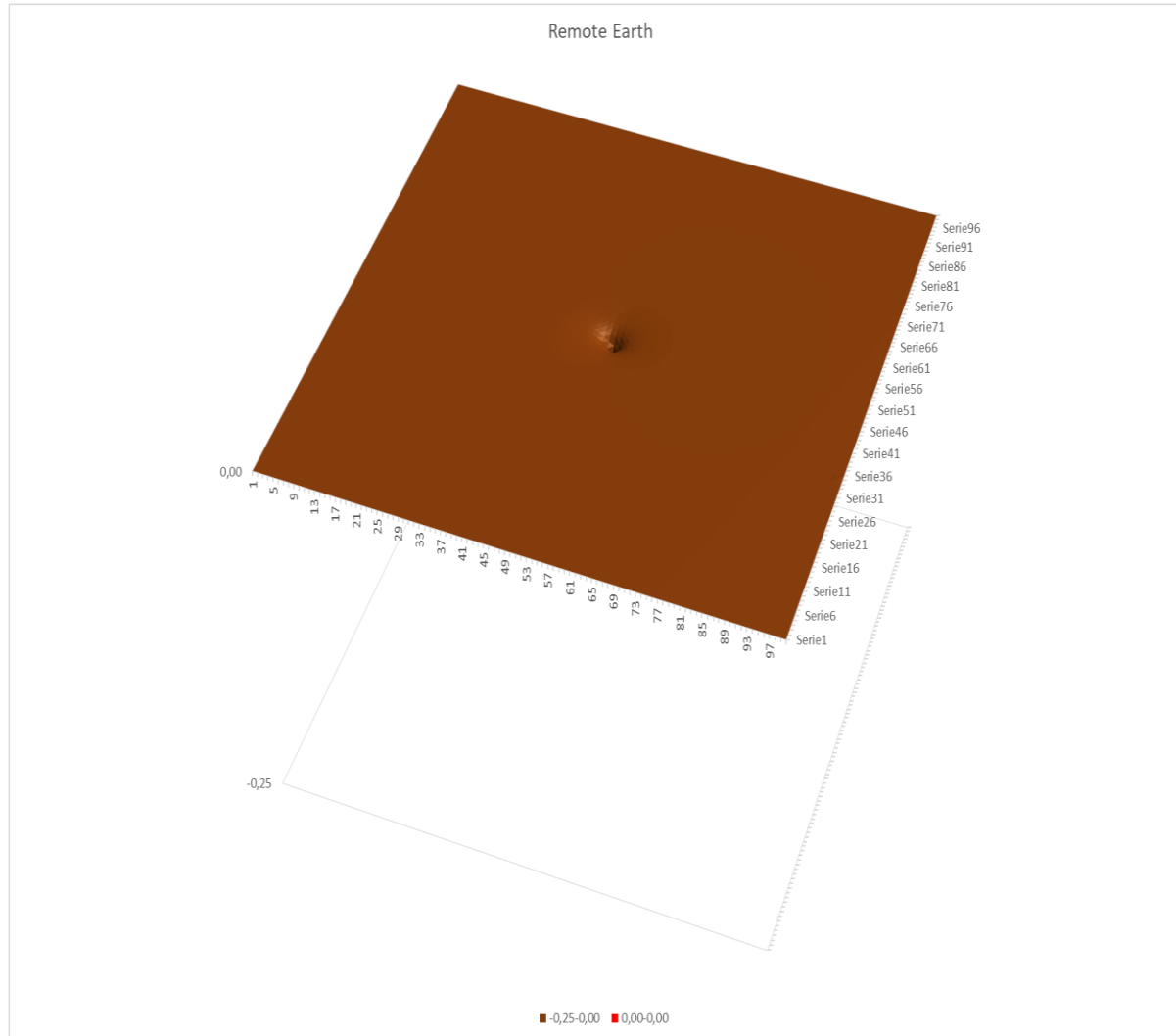
Piazzando i risultati della matrice su una tabella EXCEL, è facile ricavarne il grafico 3D.

Simulazioni



POTENZIALI VERSO
UN ELETTRODO REMOTO
IN UN CAMPO **IMPURTURBATO**
(anodi e catodi con corrente $I=0$)

Simulazioni

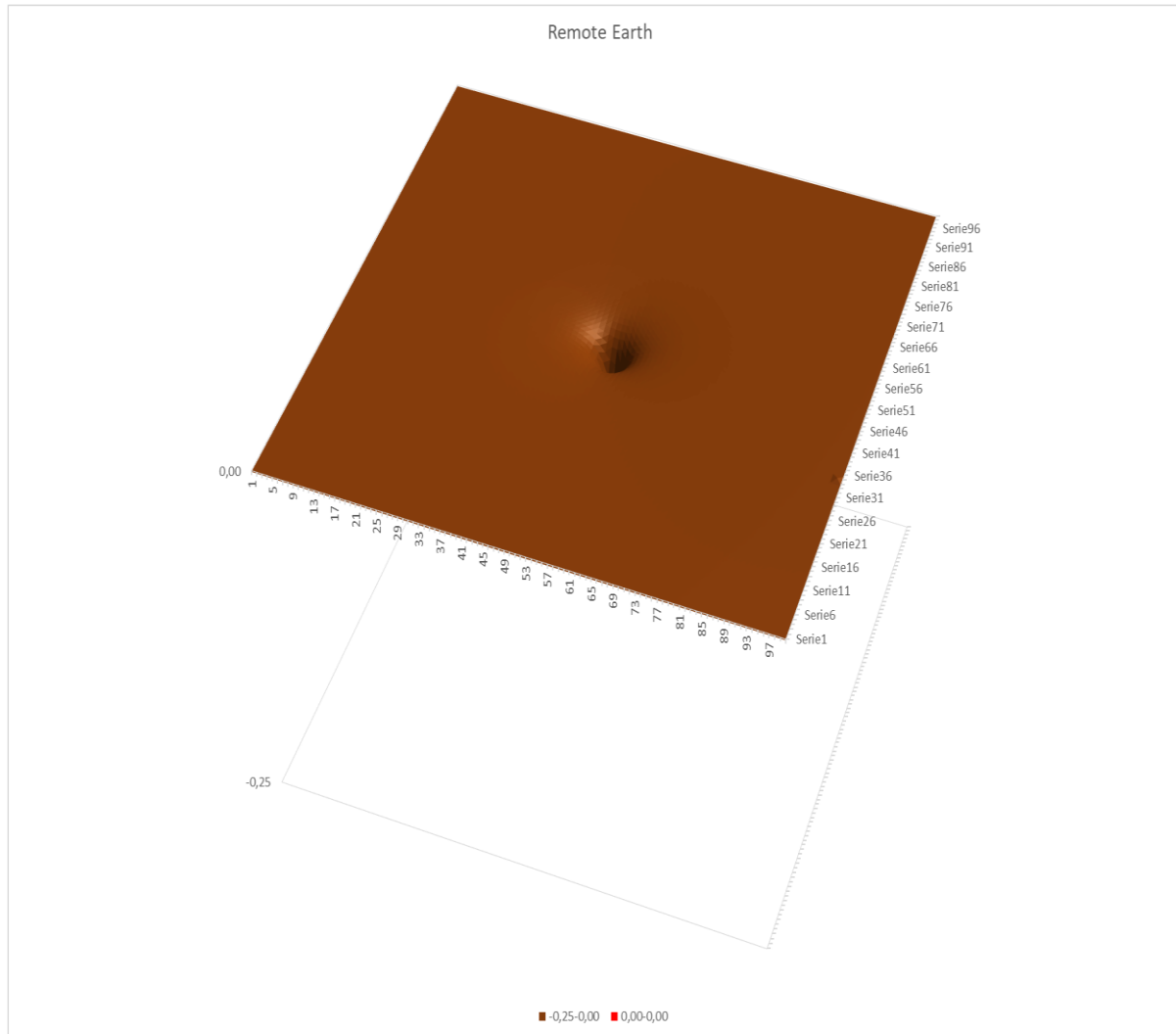


CAMPO PERTURBATO DA
un un catodo da 1 m²
 Che assorbe una corrente di 5 mA

In un terreno di 20 ohm.m

Resistivita'	Ohm,m	20			
Elemento	Posizione X	Posizione Y	Corrente	Prof	Pot nat
C01	50,00	50,00	-5	1,00	0,00

Simulazioni



CAMPO PERTURBATO DA
un un catodo da 1 m^2
Che assorbe una corrente di 20 mA

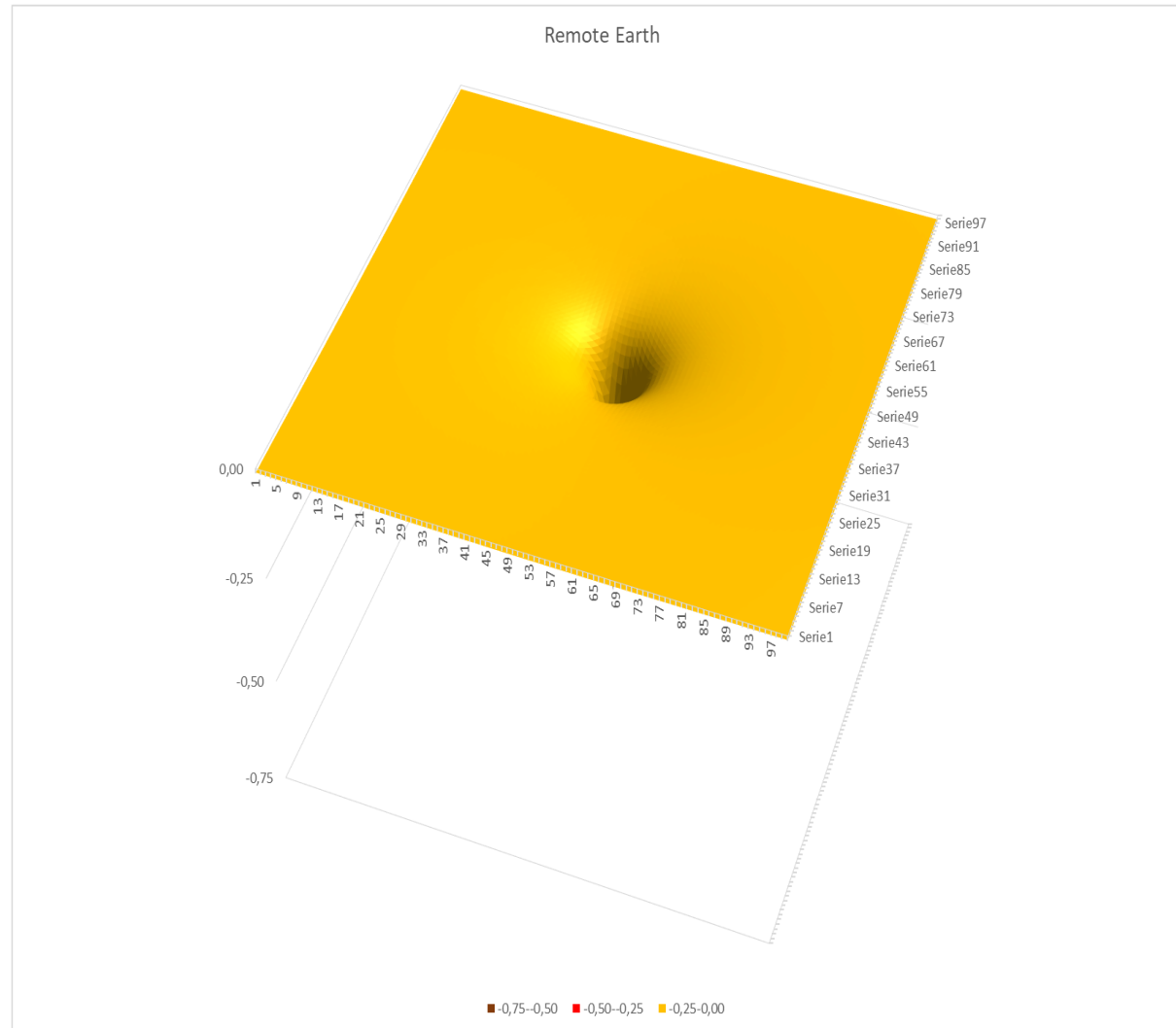
In un terreno di 20 ohm.m

Resistivita'	Ohm,m	20			
Elemento	Posizione X	Posizione Y	Corrente	Prof	Pot nat
C01	50,00	50,00	-20	1,00	0,00

Simulazioni

CAMPO PERTURBATO DA
un un catodo da 1 m^2
Che assorbe una corrente di 20 mA

In un terreno di **200 ohm.m**

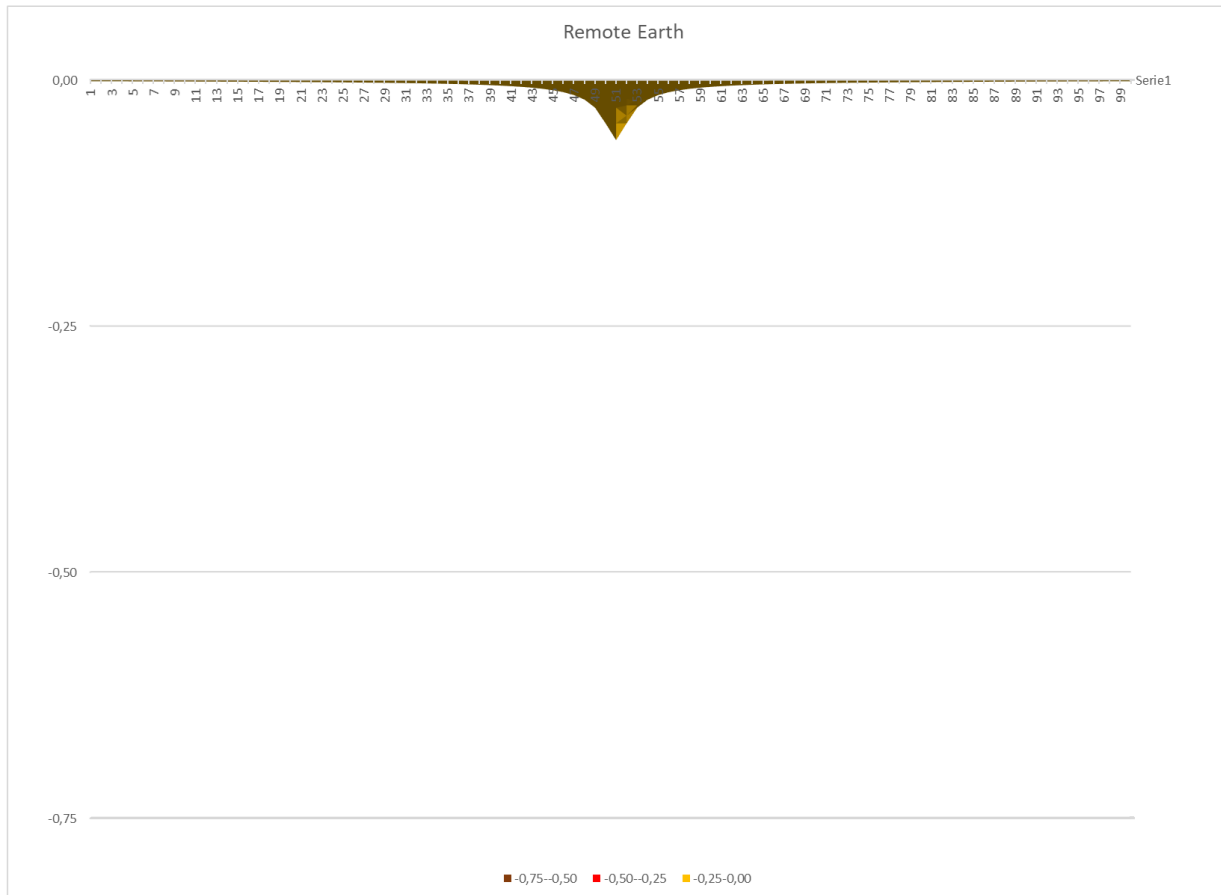


Elemento	Posizione X	Posizione Y	Corrente	Prof	Pot nat
C01	50,00	50,00	-20	1,00	0,00

Simulazioni

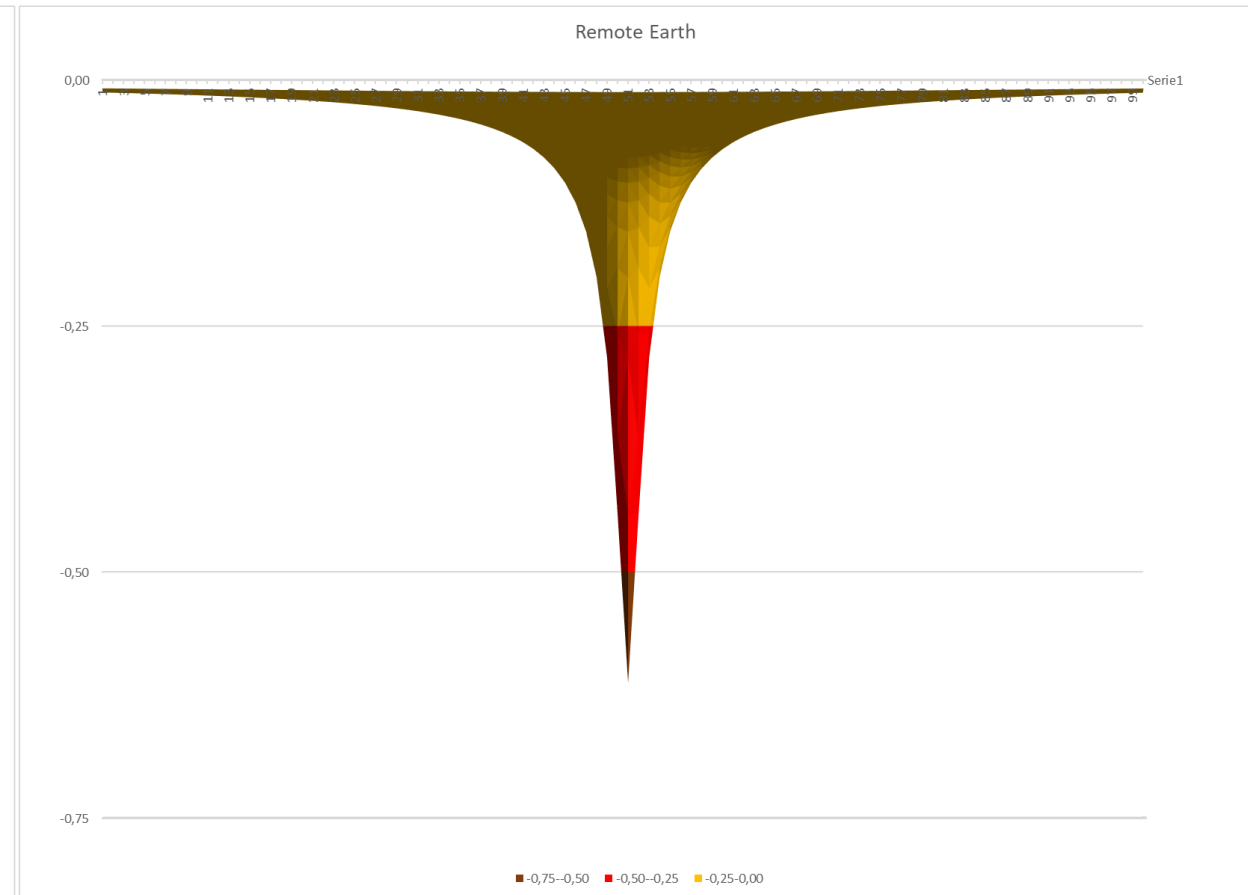
CAMPO PERTURBATO DA un catodo da 1 m²

Che assorbe una corrente di 20 mA
Ro = 20 ohm.m

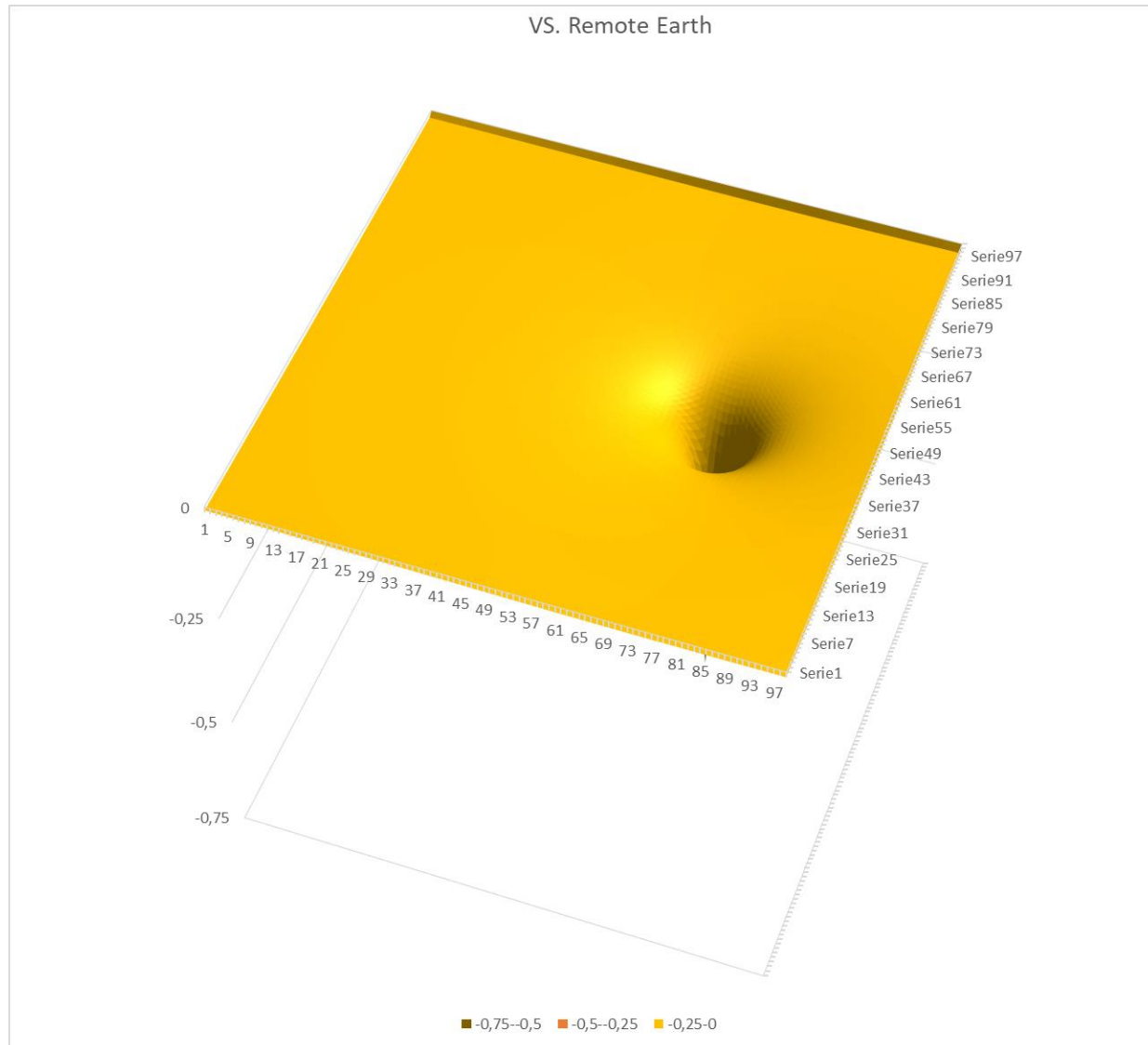


CAMPO PERTURBATO DA un catodo da 1 m²

Che assorbe una corrente di 20 mA
Ro = 200 ohm.m



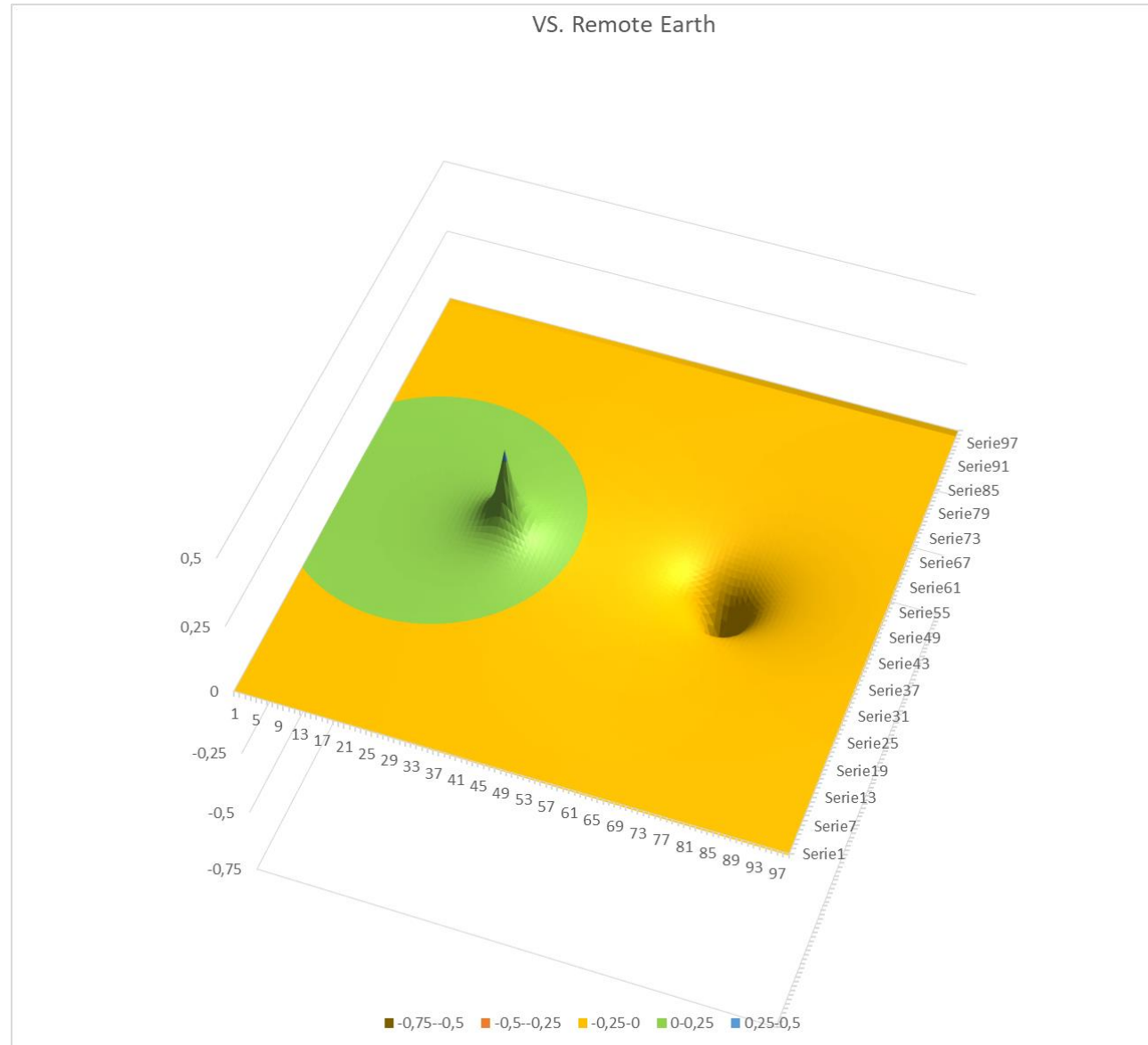
Simulazioni



CAMPO PERTURBATO DA
un un catodo da 1 m^2
Che assorbe una corrente di 20 mA

In un terreno di 200 ohm.m

Elemento	Posizione X	Posizione Y	Corrente	Prof	Pot nat
C01	50,00	50,00	-20	1,00	0,00



CAMPO PERTURBATO da
un un catodo da 1 m^2
Che assorbe una corrente di 20 mA

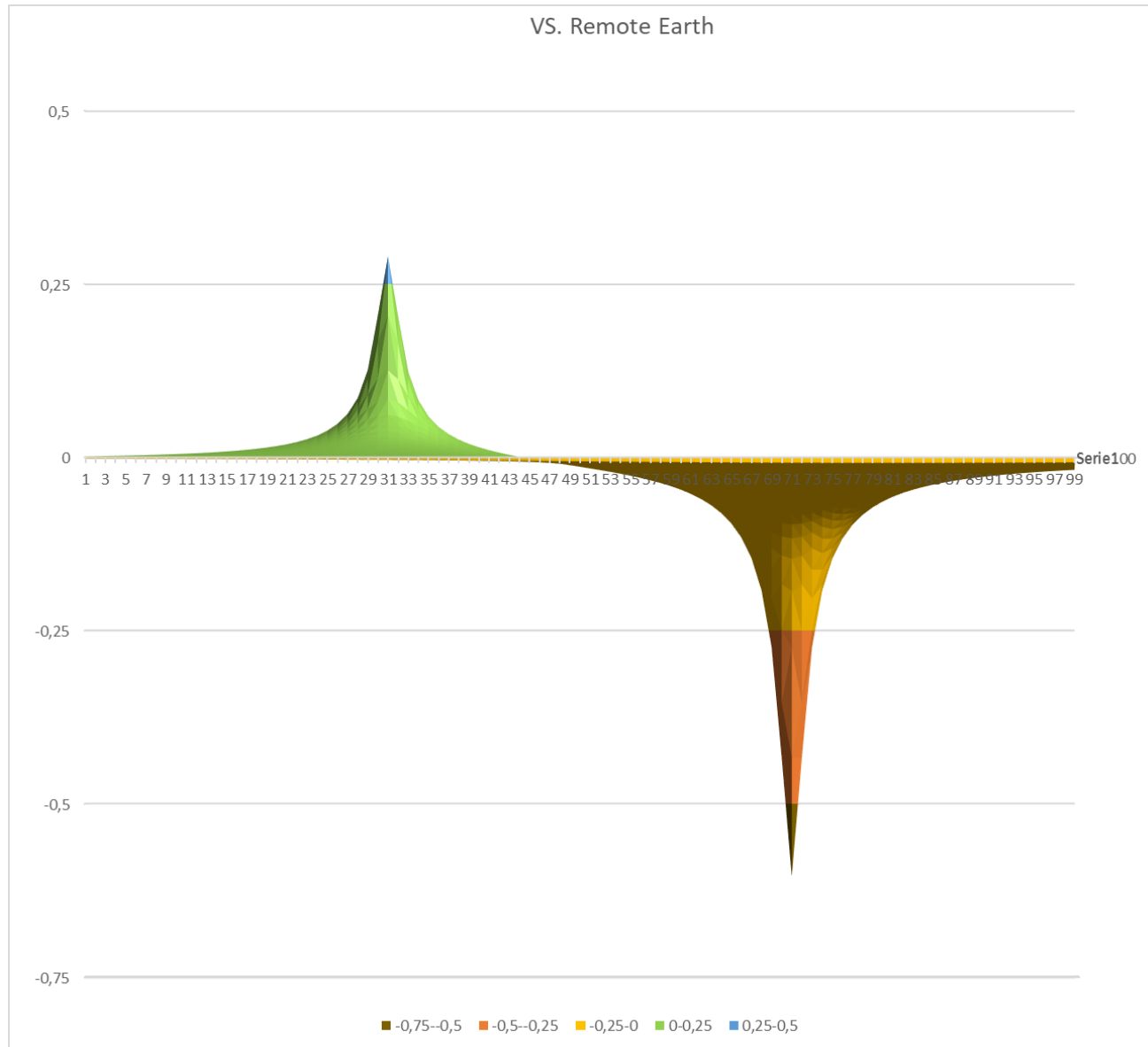
E da

un anodo da 1 m^2
Che eroga una corrente di 20 mA

In un terreno di 200 ohm.m

Elemento	Posizione X	Posizione Y	Corrente	Prof	Pot nat
A01	30,00	50,00	20	1,00	0,00
C01	70,00	50,00	-20	1,00	0,00

Simulazioni



CAMPO PERTURBATO da
un un catodo da 1 m^2
Che assorbe una corrente di 20 mA

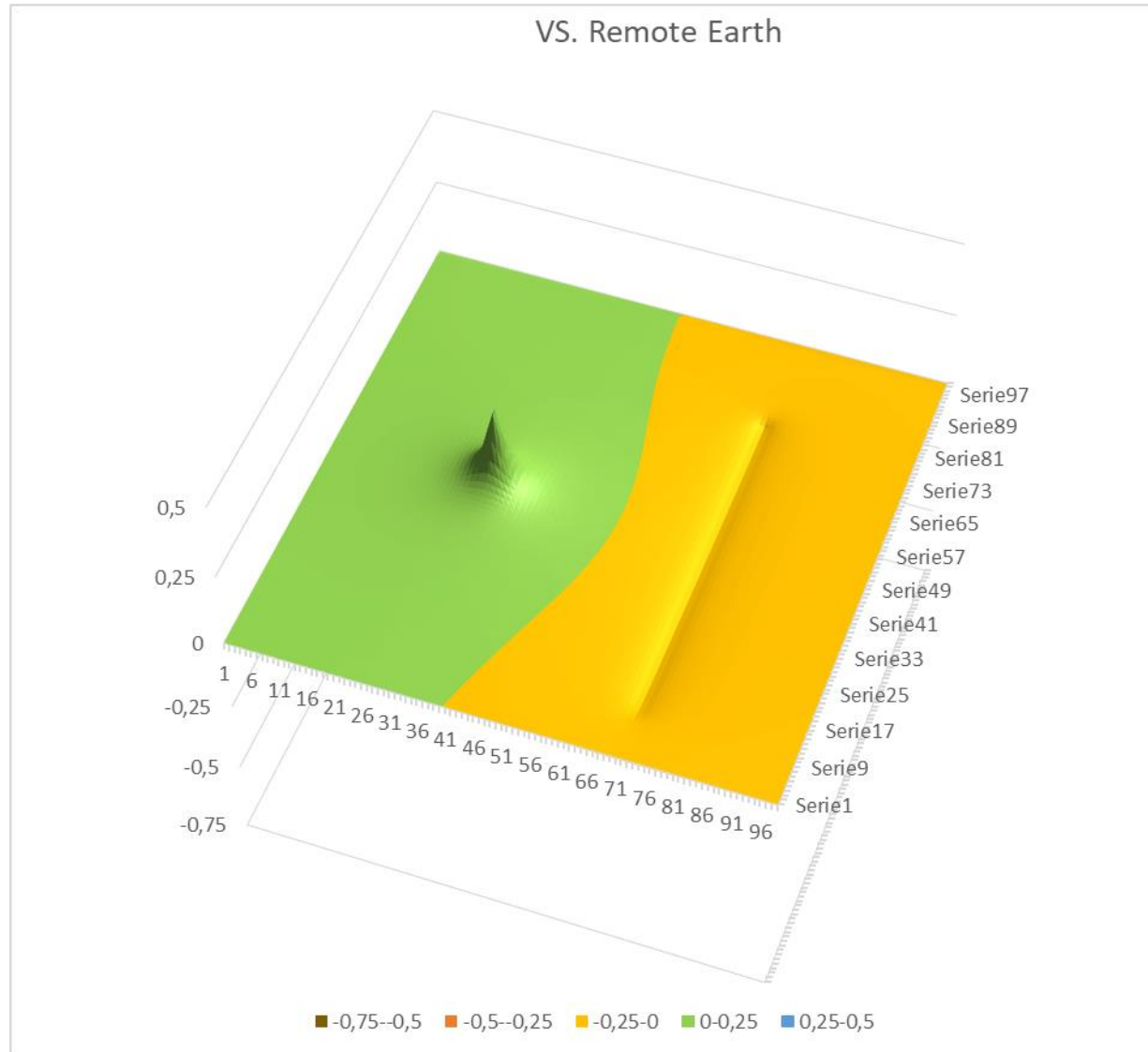
E da

un anodo da 1 m^2
Che eroga una corrente di 20 mA

In un terreno di 200 ohm.m

Resistivita'	Ohm,m	200			
Elemento	Posizione X	Posizione Y	Corrente	Prof	Pot nat
A01	30,00	50,00	20	1,00	0,00
C01	70,00	50,00	-20	1,00	0,00

Simulazioni



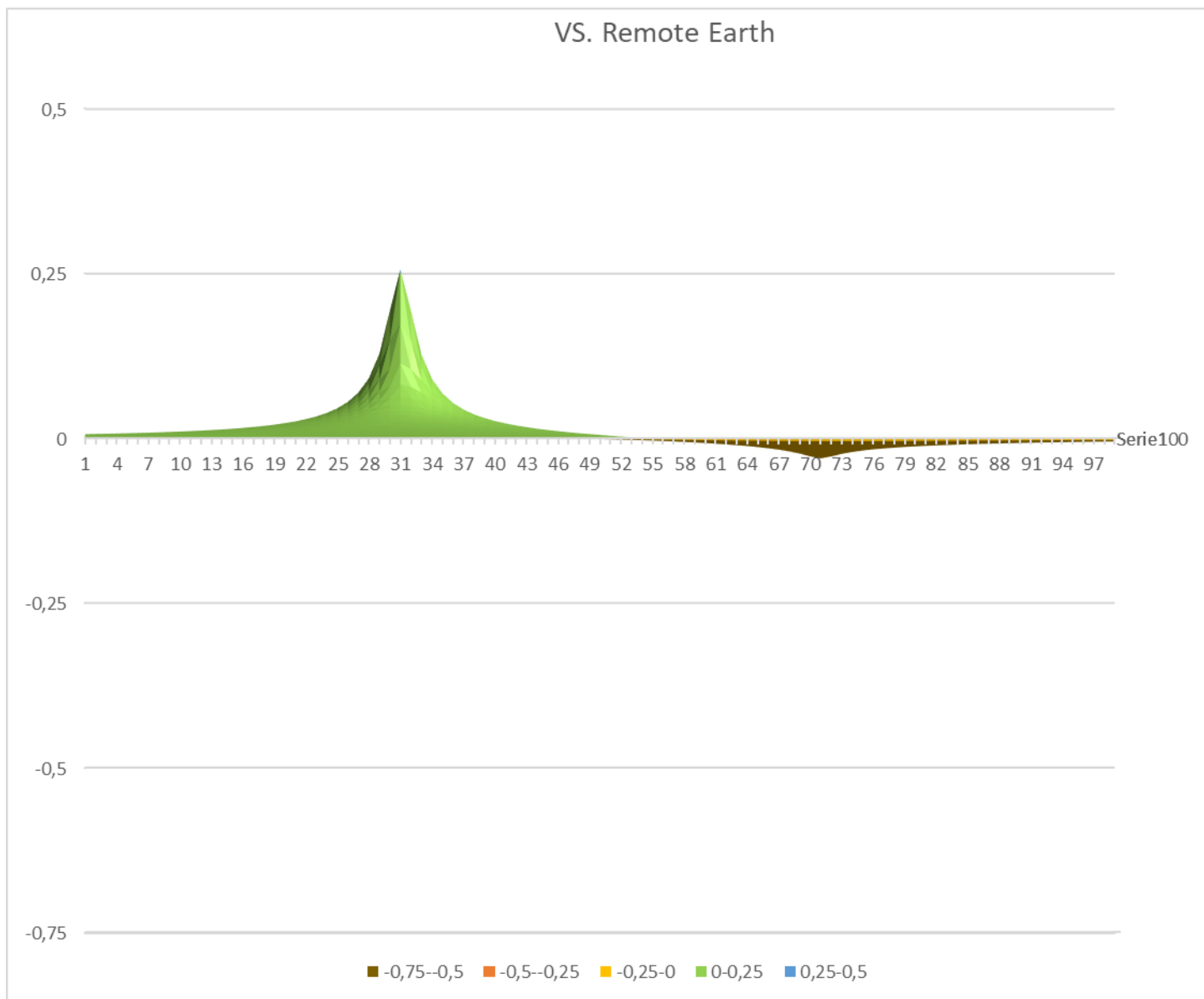
CAMPO PERTURBATO da
un un catodo da **70 m²**
Che assorbe una corrente di 20 mA
E da

un anodo da **2 m²**
Che eroga una corrente di 20 mA

In un terreno di 200 ohm.m

Resistivita'	Ohm,m	200				
Elemento	Posizione X	Posizione Y	Corrente	Prof	Pot nat	
A01	49	30	10	1	0	
A02	50	30	10	1	0	
C01	10	70	-0,2857	1	0	
...
C070	79	70	-0,2857	1	0	

Simulazioni



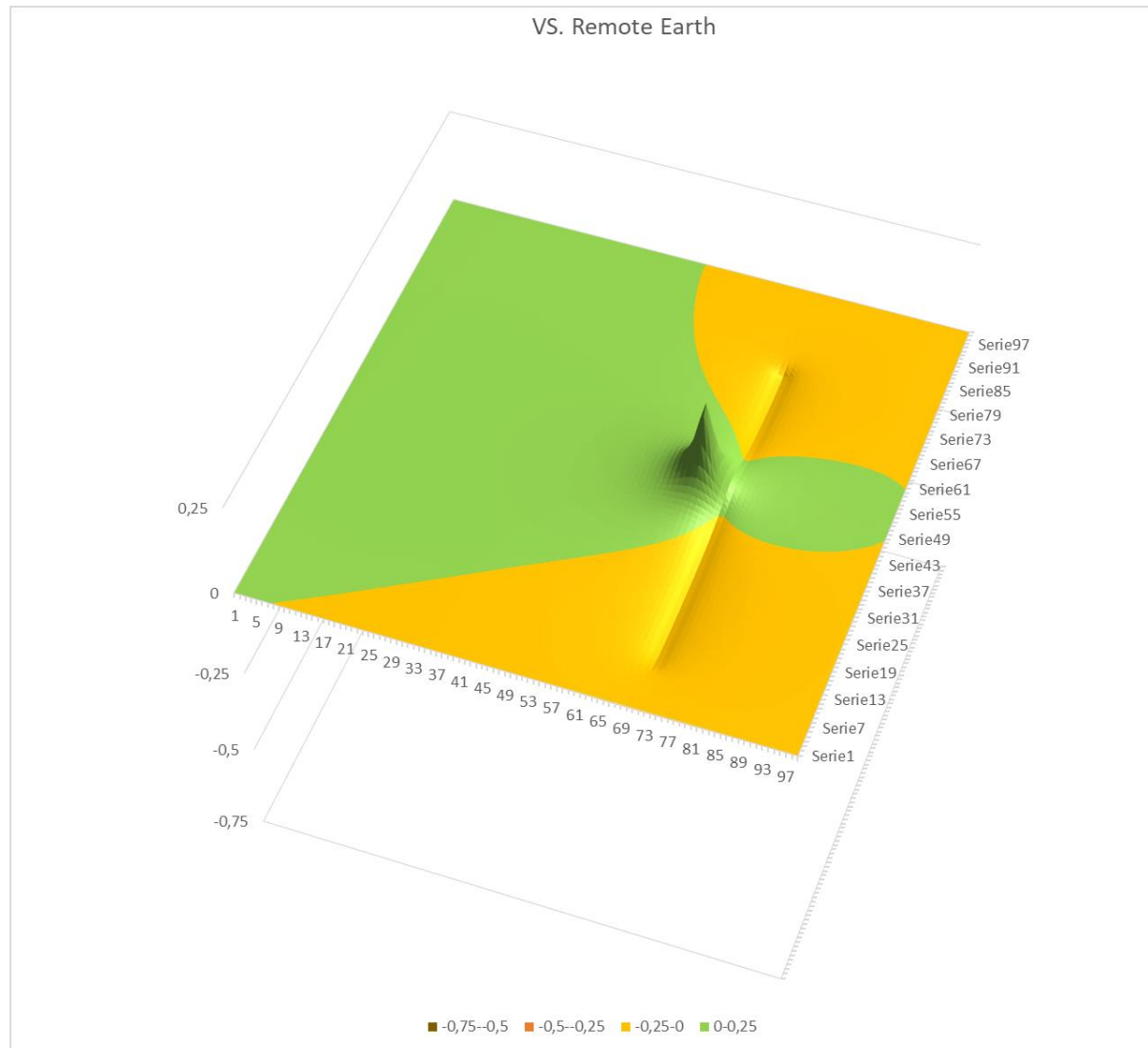
CAMPO PERTURBATO da
 un un catodo da **70 m²**
 Che assorbe una corrente di 20 mA
 E da

un anodo da **2 m²**
 Che eroga una corrente di 20 mA

In un terreno di 200 ohm.m

Resistivita'	Ohm,m	200			
Elemento	Posizione X	Posizione Y	Corrente	Prof	Pot nat
A01	49	30	10	1	0
A02	50	30	10	1	0
C01	10	70	-0,2857	1	0
...
C070	79	70	-0,2857	1	0

Simulazioni



CAMPO PERTURBATO da
un un catodo da 70 m²
Che assorbe una corrente di 20 mA

ed un anodo da 3 m²
Che eroga una corrente di 20 mA

Posto alla profondità di 1 m

Distante 5 m dal catodo

In un terreno di 200 ohm.m

Resistivita'	Ohm,m	200			
Elemento	Posizione X	Posizione Y	Corrente	Prof	Pot nat
A01	49	65	6,66	1	0
A02	50	65	6,66	1	0
A03	51	65	6,66	1	0
C01	10	70	-0,2857	1	0
...
C070	79	70	-0,2857	1	0

Simulazioni

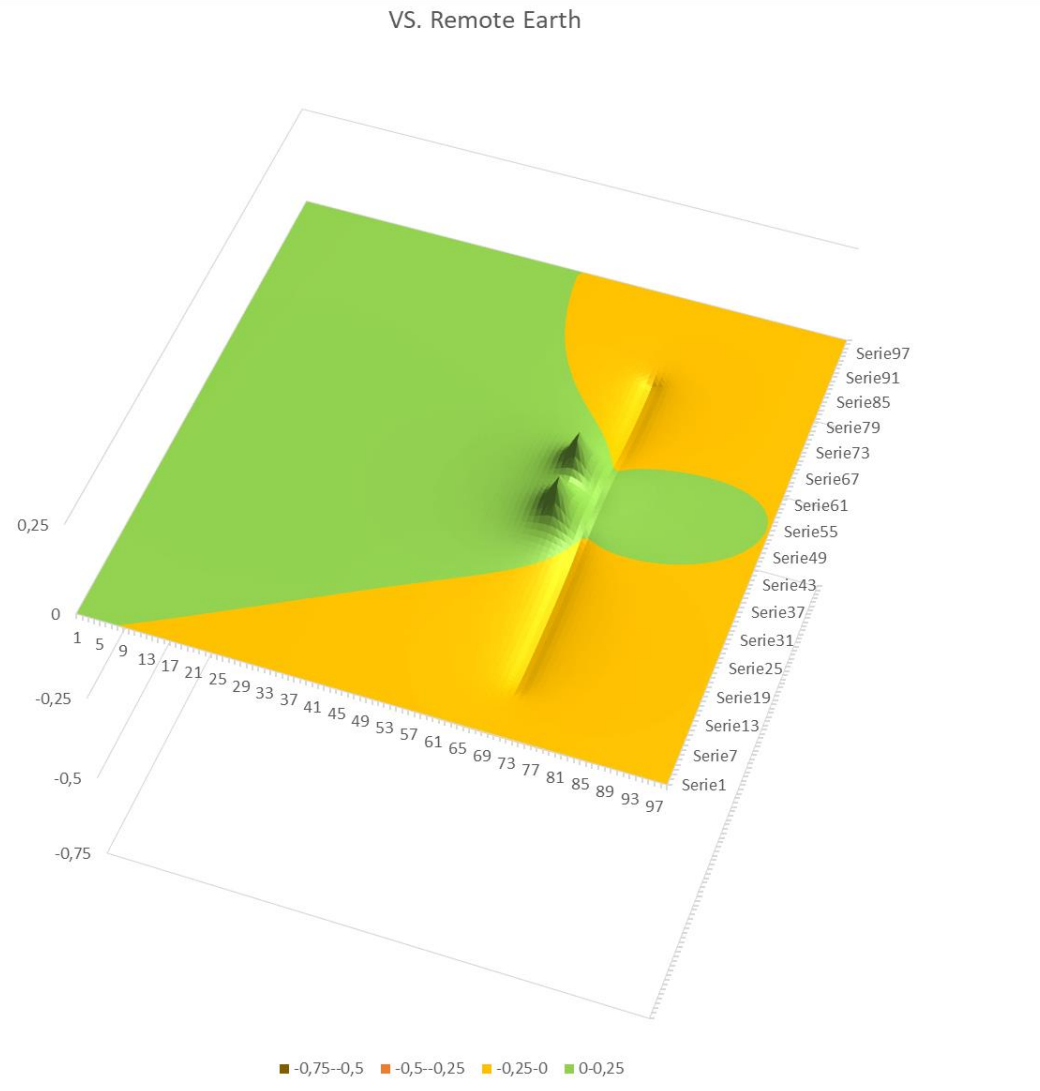
CAMPO PERTURBATO da
un un catodo da 70 m^2
Che assorbe una corrente di 20 mA

E DUE anodi da 3 m^2
Che erogano una corrente di 10 mA cad

Posti alla profondità di 1 m

Distanti 5 m dal catodo

In un terreno di 200 ohm.m



Simulazioni

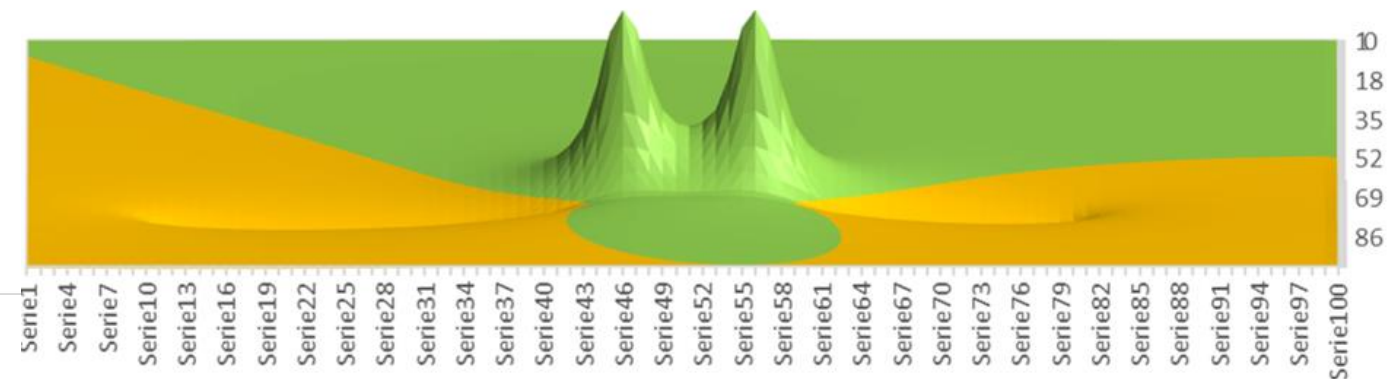
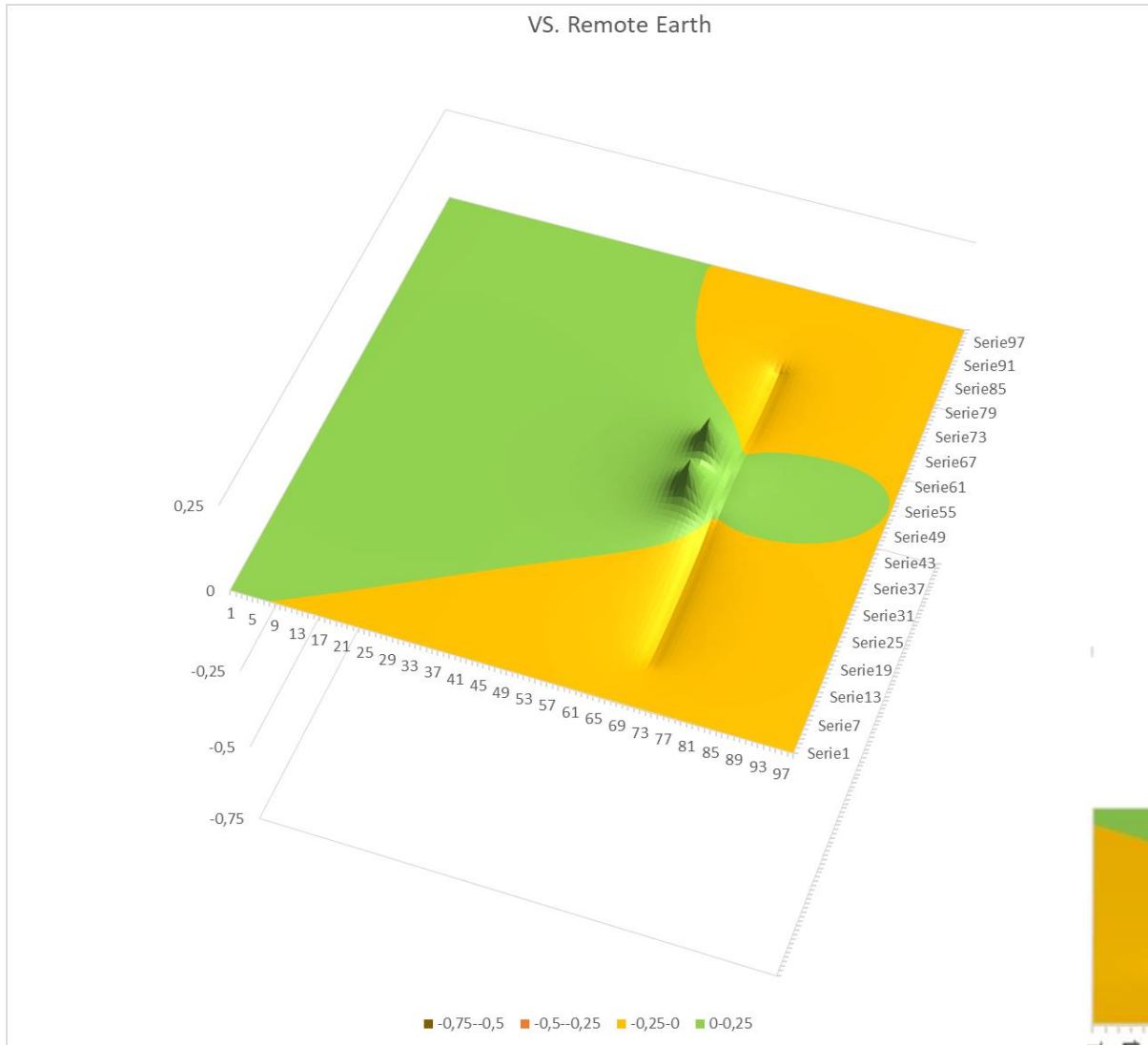
CAMPO PERTURBATO da
un un catodo da 70 m^2
Che assorbe una corrente di 20 mA

E DUE anodi da 3 m^2
Che erogano una corrente di 10 mA cad

Posti alla profondità di 1 m

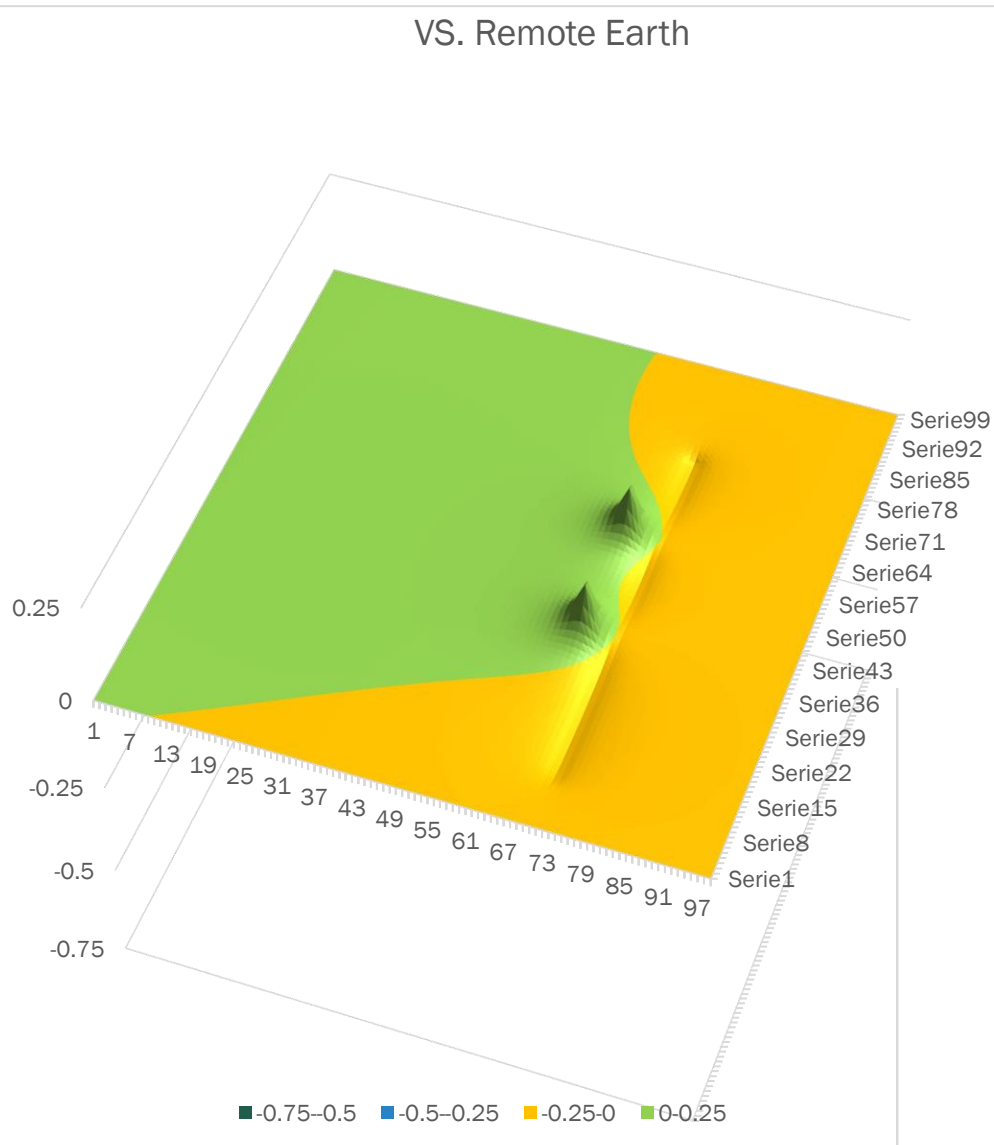
Distanti 5 m dal catodo

In un terreno di 200 ohm.m



Simulazioni

VS. Remote Earth



CAMPO PERTURBATO da
un un catodo da 70 m^2
Che assorbe una corrente di 20 mA

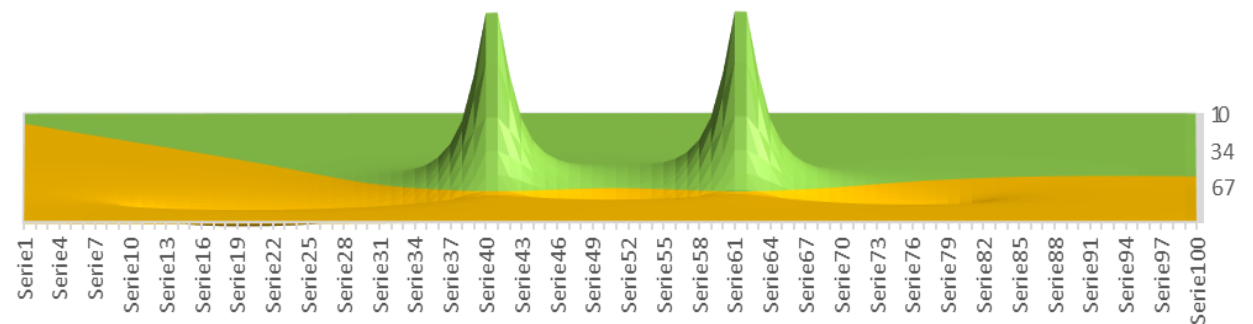
E DUE anodi da 2 m^2
Che erogano una corrente di 10 mA cad

Posti alla profondità di 1 m

Distanti 5 m dal catodo

In un terreno di 200 ohm.m

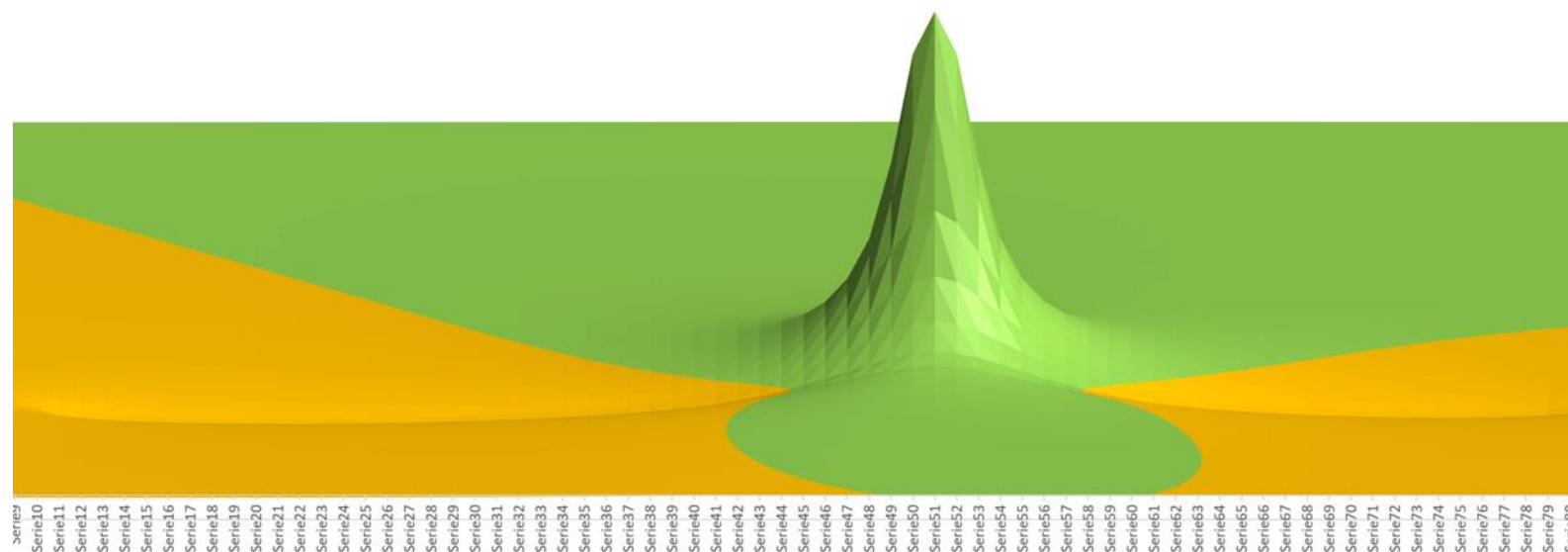
Distanti 20 m tra loro (AMPP)



Simulazioni

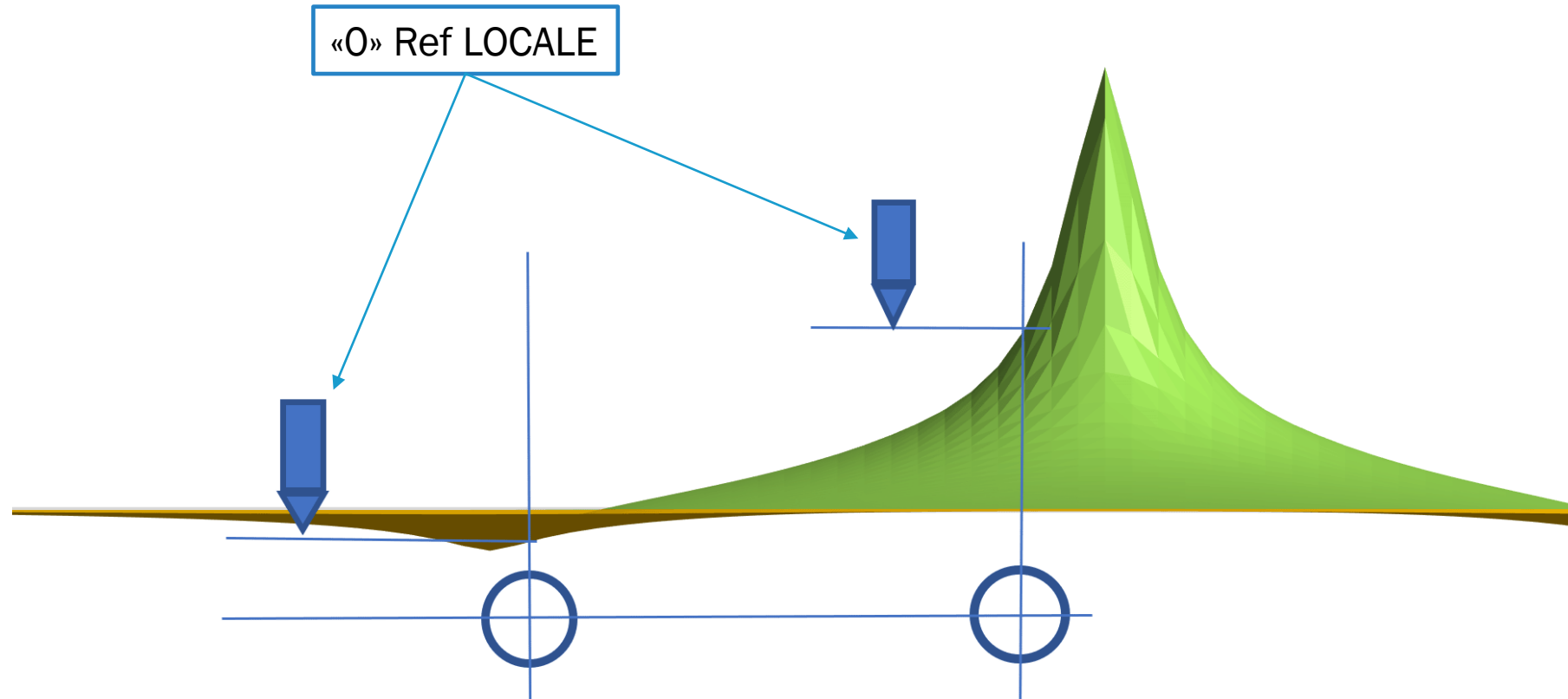
Ma in tutto questo, Von Baeckman, dove sta?

Simulazioni

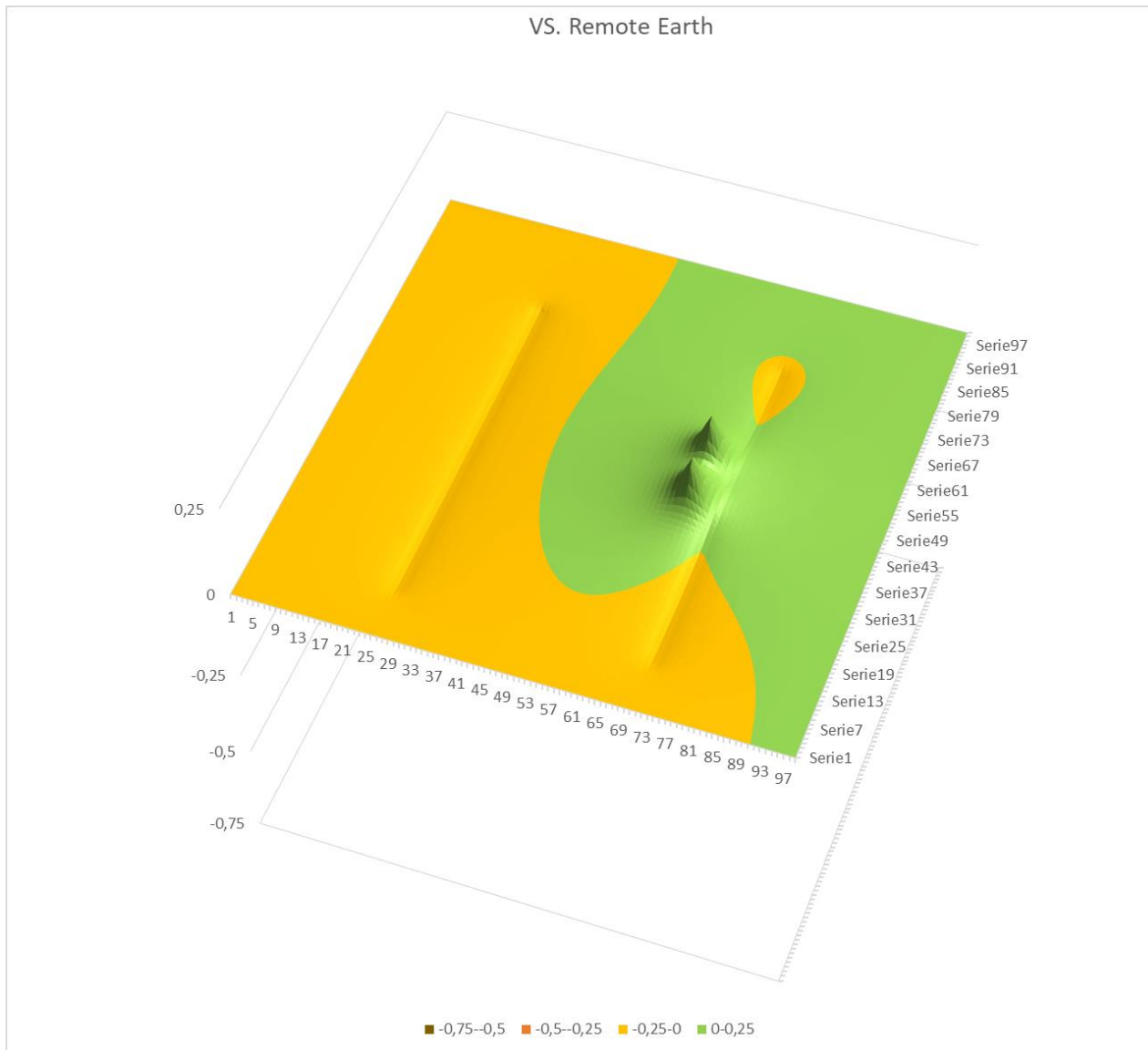


Intanto abbiamo usato formule che derivano dai suoi studi, poi sta parzialmente in questa figura. Il concetto fondamentale è: invece di abbassare il potenziale dei tubi, ALZO il potenziale del terreno, aumentando di conseguenza la dV tra tubo e terreno. E' fondamentale ricordare che questi calcoli sono riferiti ad una TERRA REMOTA, che al nostro catodo non interessa. Per la corrosione è importante invece il riferimento verso il suo elettrolita «all'intorno». Pertanto se invece della terra remota guardiamo i «gradienti locali» ci accorgiamo delle grandi differenze di potenziale tra punti vicini tra loro.

Simulazioni



Simulazioni



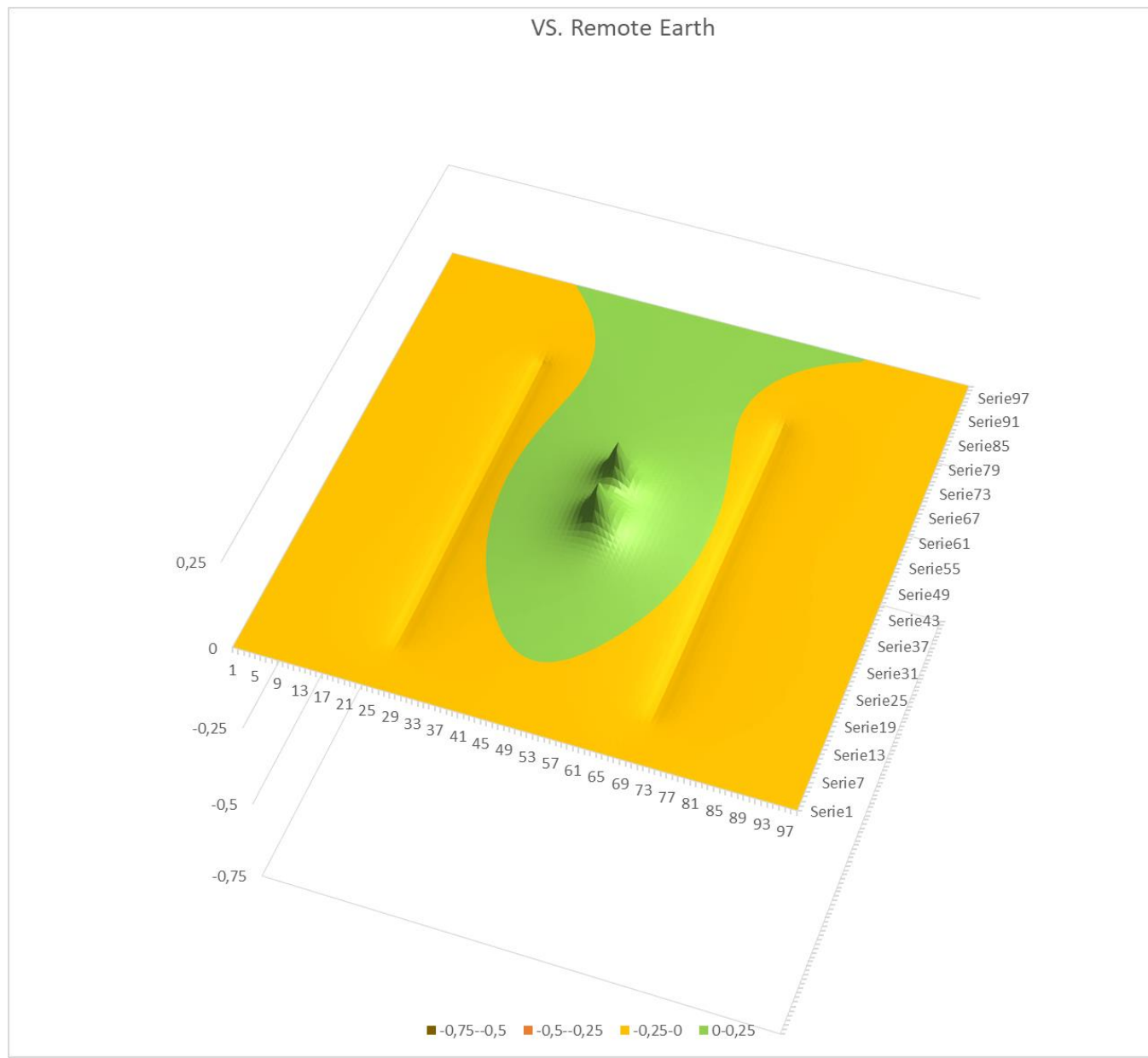
Calcolo con doppio catodo.

Simula meglio una situazione reale di area concentrata

Seppur è chiaro che usando anodi lineari si eliminano i «picchi» in corrispondenza degli anodi sorge un dubbio:

Ma allora non sarà meglio allontanare gli anodi dal catodo per alzare «tutto il campo» come fa un importante distributore in Italia?

Simulazioni



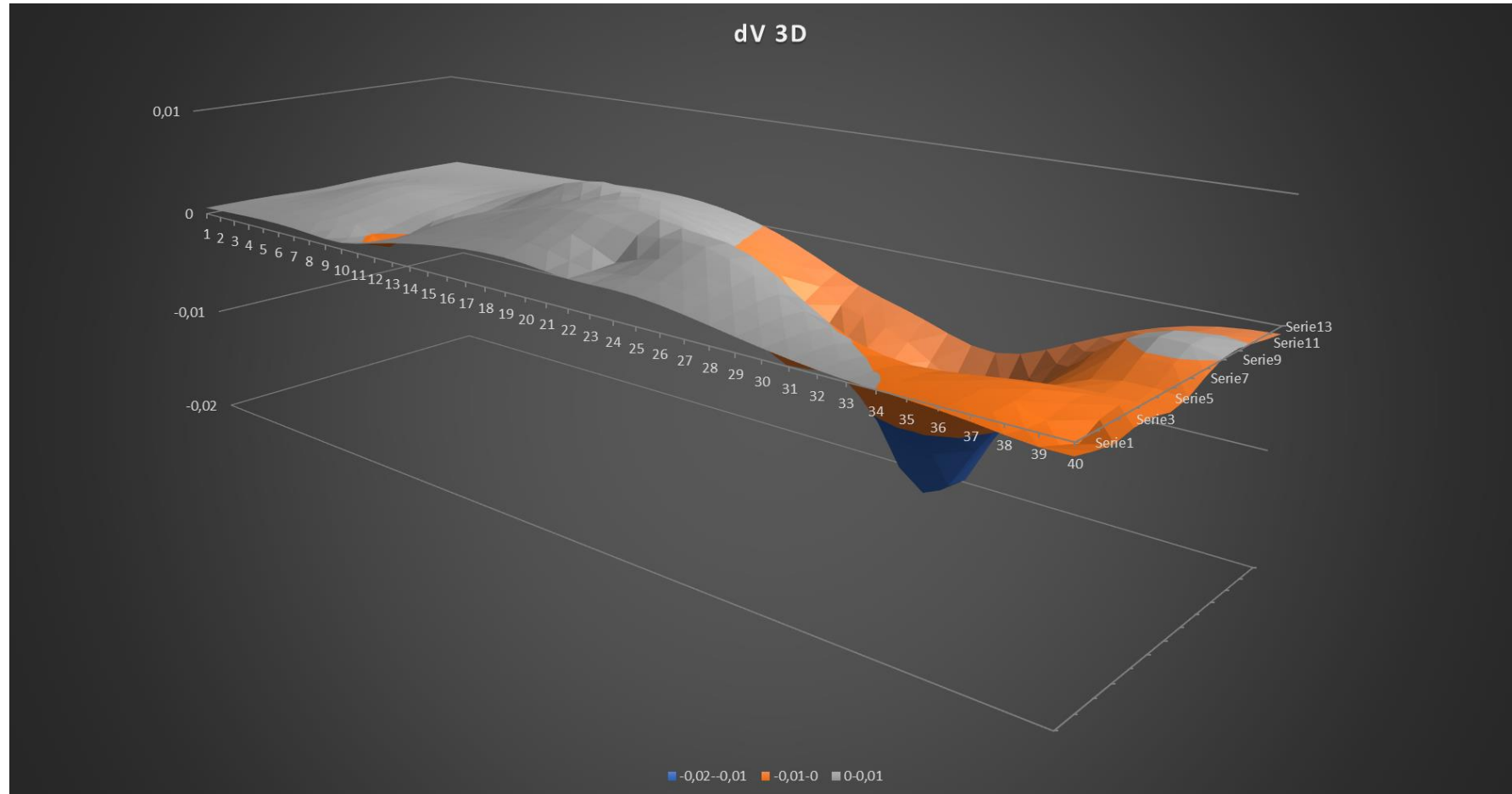
Calcolo con doppio catodo spostando gli anodi al centro tra i catodi.

Il campo elettrico intorno ai catodi si riappiattisce, perdendo l'effetto Baeckman.

Per ritrovare un buon effetto bisogna aumentare molto l'erogazione di corrente degli anodi.

Senza tenere conto che qui trattiamo comunque una situazione ideale, senza basamenti e/o reti di terra nel mezzo

Simulazioni



Un **campo elettrico** reale assomiglia più ad un campo bombardato

Nota finale e Conclusioni

AMPP – ISO ?

Hanno ovviamente ragione entrambi

AMPP: è un approccio puramente grafico, facile da usare, ottimo per una distribuzione preliminare degli anodi o per un intervento «veloce» in campo.

Per contro, abbiamo visto che non dice nulla ne sull'interazione tra anodi, ne tra anodi e catodi

ISO: approccio analitico corretto ma complicato e solo teorico:

Bastano variazioni sulle correnti richieste / erogate per cambiare tutto l'assetto elettrico.

Anodi vicini ai catodi o anodi lontani uniformemente distribuiti ?

Dalle simulazioni sembra chiaro che, nelle situazioni reali, con enormi masse estranee presenti, sia decisamente meglio usare anodi vicini alle tubazioni cercando di creare il maggior gradiente possibile con il minimo possibile di energia richiesta

Grazie per l'attenzione