

# Root distribution and uptake of surface-applied radionuclides by maize in field soils

**Doctoral Thesis**

**Author(s):**

Centofanti, Tiziana

**Publication date:**

2005

**Permanent link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-004946484>

**Rights / license:**

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#)

Diss. ETH No. 15929

**ROOT DISTRIBUTION AND UPTAKE OF SURFACE-APPLIED RADIONUCLIDES BY  
MAIZE IN FIELD SOILS**

**A dissertation submitted to the**

**SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH**

**for the degree of  
Doctor of Natural Sciences**

**presented by**

**TIZIANA CENTOFANTI**

**Laurea in Scienze Agrarie, Università degli Studi di Ancona**

**born 06.07.1974**

**citizen of Italy**

**accepted on the recommendation of**

**Prof. E. Frossard, examiner**

**Prof. H. Flühler, co-examiner**

**Dr. S. Pellerin, co-examiner**

**2005**

## Abstract

Risk assessment models for the soil-to-plant transfer of radionuclides rely on the assumption that soils are homogeneously contaminated. However, field soils are characterized by a high degree of heterogeneities mainly caused by macro-structure which can affect the distribution of surface-applied radionuclides and their accessibility by plant roots. The main objective of this thesis was to evaluate the influence of the heterogeneous distribution of surface-applied radionuclides and their spatial relation with roots on the soil-to-plant transfer of four radionuclides ( $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{65}\text{Zn}$  and  $^{134}\text{Cs}$ ). The analysis of the distribution of surface-applied radionuclides was carried out using dye tracers which allowed the visualization of the structure-induced water flow paths.  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{65}\text{Zn}$ , and  $^{134}\text{Cs}$  have been applied on the surface of two untilled agricultural soils located in Switzerland and maize (*Zea mays* L. cv. Corso) was used as model plant. Root distribution and the spatial interrelation with the preferential flow paths (PFP) have been carried out by *in-situ* mapping technique.

We questioned the relevance for real field conditions of the standard experimental approach advised by the International Atomic Energy Agency to obtain data for the transfer factor parameter which is used in the mathematical model to quantify the soil-to-plant transfer of radionuclides. Standard experiments carried out in greenhouses with plants grown in sieved and homogeneously contaminated soils. We analyzed the effect of soil macro-structure on the recovery of  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{65}\text{Zn}$  and  $^{134}\text{Cs}$  in the aerial part of maize grown in an untilled agricultural soil in comparison to the recovery in the aerial part of maize grown in the greenhouse and on the same soil that was sieved and homogeneously labeled before being repacked in pots. We observed a heterogeneous distribution of the surface-applied radionuclides due to the structure-induced heterogeneous water flow, and a moderate (10 to 15%) occurrence of roots in these areas of radionuclides enrichment. A significantly higher recovery of  $^{57}\text{Co}$  (2-fold) and  $^{134}\text{Cs}$  (10-fold) was observed in the plants grown in the field soil, whereas no differences in the recovery of  $^{54}\text{Mn}$  and  $^{65}\text{Zn}$  between the two experiments was detected.

Risk assessment models for the soil-to-plant transfer of radionuclides do not take into account the time-dependent variations of radionuclides accessibility by roots occurring at the soil-root interface. We studied the redistribution of  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{65}\text{Zn}$ ,  $^{57}\text{Co}$ , and  $^{134}\text{Cs}$  in the soil profile and their uptake by maize grown on an untilled agricultural soil during a growing season. Surface-applied radionuclides were concentrated in the preferential flow paths in comparison to the soil matrix due to structure-induced non-uniform water flow. However, the amount and the seasonal distribution of the precipitation promoting the convective vertical displacement of radionuclides and their infiltration into the soil matrix caused an expansion of the PFP and a decrease of radionuclides concentration in these areas with time. Only a small fraction (15-20%) of the root system was located within the preferential flow paths. Results of the study of the time-dependent variation of the recovery of the surface applied radionuclides during an entire maize growth cycle varied

depending on the radionuclide. The recovery of  $^{54}\text{Mn}$  in the aerial part of maize increased with time showing significantly higher values at each subsequent harvest. The recovery of  $^{57}\text{Co}$  and  $^{65}\text{Zn}$  in the aerial part of maize increased from the first (leaf development stage 3) to the second harvest (pollen shed), while it was constant between pollen shed and maturity.  $^{134}\text{Cs}$  was not detectable in the aerial part of maize at LDS3 and at maturity.

Results obtained in the field experiments have shown that only a small fraction (10 to 15%) of the root system was located in the preferential flow pathways where radionuclides were concentrated in respect to the soil matrix. This suggested that the roots located in these areas were responsible for the uptake of radionuclides. A split-root experiment was used to simulate the heterogeneous distribution of  $^{134}\text{Cs}$  and root. A single root was grown in a  $^{134}\text{Cs}$  contaminated compartment, while the rest of the root system was grown in an uncontaminated compartment. Plants with the whole root system growing in a solution contaminated with  $^{134}\text{Cs}$  were used as control. We tested the effect of the competition between Cs and K on the uptake and translocation of  $^{134}\text{Cs}$  by using two target potassium concentrations: one at 0.2mM and one at 1.05mM. The single root (equivalent to 21% of the dry matter of the control root) was able to take up 50% of the amount of  $^{134}\text{Cs}$  taken up by the control root; the quantity translocated to the shoots was equal to 47% of that of the control shoot. This effect was about 3 times weaker in the higher K treatment (1.05mM).

The Barber-Claassen model was used to predict the uptake of  $^{134}\text{Cs}$  and K by maize at leaf development stage 3 and at pollen shed. Predicted value of the recovery of  $^{134}\text{Cs}$  of plant at pollen shed was one order of magnitude higher than the measured value, while the predicted value of the recovery of K was in the same order of magnitude of that measured but two-times higher. K and  $^{134}\text{Cs}$  uptake by maize at leaf development stage 3 could not be predicted with the model because it was not possible to obtain the Michaelis-Menten parameters for plant at this development stage.

In view of these results, it appears that the soil-to-plant transfer of radionuclides in field soils can be explained by various factors; the effect of the soil macrostructure on the distribution of radionuclides and roots represents only part of the factors influencing it. Other processes are involved in the dynamics between the soil, the root, and the radionuclides, such as: (i) environmental conditions (i.e. amount and seasonal distribution of rainfall), (ii) the activity of rhizosphere microbes and mycorrhizae fungi, (iii) the recirculation of the absorbed ions within the plant's organs, and (iv) competing ions.

## Riassunto

I modelli matematici utilizzati per predire il rischio associato al trasporto di isotopi radioattivi dal suolo alla pianta considerano il suolo come un substrato omogeneo in cui gli isotopi radioattivi sono uniformemente distribuiti. E' noto, tuttavia, che suoli naturali o agrari presentano delle eterogeneità causate principalmente dalla struttura fisica o macrostruttura del suolo, la quale influenza la distribuzione degli isotopi radioattivi e la loro accessibilità da parte dell'apparato radicale. L'obiettivo principale di questa tesi è stato quello di valutare l'effetto della distribuzione eterogenea degli isotopi radioattivi e della loro interrelazione spaziale (su un piano bidimensionale) con la distribuzione delle radici, sul trasporto di  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{65}\text{Zn}$  and  $^{134}\text{Cs}$  dal suolo alla pianta. L'analisi della distribuzione degli isotopi radioattivi nel profilo del suolo è stata effettuata mediante l'uso di sostanze coloranti che permettono la visualizzazione delle zone lungo le quali, data la presenza di macropori, l'acqua e soluti fluiscono in maniera preferenziale (zone di flusso preferenziale, ZFP).  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{65}\text{Zn}$  and  $^{134}\text{Cs}$  sono stati distribuiti sulla superficie di due suoli agrari non arati situati in Svizzera. Il mais è stato utilizzato come pianta modello. La distribuzione delle radici nel profilo del suolo e la loro interrelazione su un piano bidimensionale con le ZFP è stata effettuata mediante la tecnica delle mappe *in-situ*.

Le linee guida prescritte dall'Agenzia Internazionale per l'Energia Atomica per la determinazione del fattore di trasporto dal suolo alla pianta usato nei modelli matematici, prevedono esperimenti in serra e con suoli passati a setaccio e omogeneamente contaminati. Queste linee guida non rispecchiano la realtà dei suoli agrari e non possono pertanto descrivere in maniera adeguata il fenomeno.

L'effetto della struttura del suolo sul trasporto di  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{65}\text{Zn}$  and  $^{134}\text{Cs}$  nel mais è stato analizzato in un suolo agrario non arato. I risultati ottenuti sono stati messi a confronto con quelli ottenuti da piante cresciute in serra e nello stesso suolo passato a setaccio e omogeneamente contaminato prima di essere messo in vaso.

E' stata osservata una maggior concentrazione degli isotopi radioattivi nelle ZFP rispetto alla matrice del suolo ed una moderata (10 al 15%) crescita preferenziale delle radici è stata osservata all'interno e nelle vicinanze delle ZFP. La quantità di  $^{134}\text{Cs}$  e  $^{57}\text{Co}$  misurata nelle parti aeree di mais coltivato in campo agrario è stata rispettivamente 2 volte e 10 volte maggiore della quantità misurata in piante cresciute in serra. Per  $^{54}\text{Mn}$  e  $^{65}\text{Zn}$  non è stata osservata nessuna differenza tra i due esperimenti.

La ridistribuzione di  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{65}\text{Zn}$ ,  $^{57}\text{Co}$  and  $^{134}\text{Cs}$  nel profilo del suolo e il trasporto nelle parti aeree di mais è stato studiato in un secondo suolo agrario non arato e durante l'intero ciclo di crescita del mais.

E' stata osservata una maggiore concentrazione degli isotopi radioattivi nelle ZFP rispetto alla matrice del suolo. Tuttavia, la quantità e la distribuzione stagionale delle precipitazioni, promuovendo un flusso convettivo verticale degli isotopi e la loro infiltrazione nella matrice del suolo, ha causato una diminuzione della concentrazione degli isotopi radioattivi nelle ZFP con il tempo. Una moderata (10 al

15%) crescita preferenziale delle radici è stata osservata all'interno e nelle vicinanze delle ZFP. Lo studio delle dinamiche temporali dell'assorbimento degli isotopi radioattivi durante un intero ciclo di crescita del mais ha dato risultati variabili a seconda del tipo di isotopo. L'assorbimento di  $^{54}\text{Mn}$  nelle parti aeree di mais è aumentato con il tempo, presentando dei valori significativamente più elevati ad ogni raccolta consecutiva. L'assorbimento di  $^{57}\text{Co}$  e  $^{65}\text{Zn}$  è stato più elevato in piante in fioritura rispetto a piante alla terza foglia, mentre è rimasto invariato tra la fioritura e la maturazione. Non è stato possibile misurare la quantità di  $^{134}\text{Cs}$  nelle piante alla terza foglia e alla maturazione.

I risultati ottenuti nei due esperimenti effettuati su suoli agrari hanno dimostrato che solo una frazione (10-15%) dell'apparato radicale era localizzata nelle ZFP dove gli isotopi radioattivi erano maggiormente concentrati rispetto alla matrice del suolo. Questi risultati hanno suggerito che le radici presenti nelle ZFP erano responsabili nell'assorbimento degli isotopi radioattivi. Un esperimento a radici separate (split-root) è stato utilizzato per simulare la distribuzione eterogenea di  $^{134}\text{Cs}$  e delle radici. Una singola radice è stata immersa in una soluzione nutritiva contaminata con  $^{134}\text{Cs}$ , mentre il resto dell'apparato radicale è stato immerso in un adiacente contenitore riempito di soluzione nutritiva non contaminata. Piante di cui l'intero apparato radicale è stato immerso in una soluzione nutritiva interamente contaminata con  $^{134}\text{Cs}$  sono state utilizzate come controllo. Due concentrazioni potassiche sono state utilizzate per verificare l'effetto della competizione tra Cs e K per i sistemi di trasporto a livello radicale. Un maggior assorbimento di Cs è stato ottenuto quando la concentrazione potassica della soluzione nutritiva era di 0.2mM. La singola radice, la cui sostanza secca rappresentava il 21% di quella dell'intero apparato radicale, ha assorbito il 50% della quantità assorbita dall'apparato radicale del controllo. La quantità traslocata alle parti aeree è stata del 47% rispetto al controllo. Questo effetto è stato circa tre volte inferiore quando la concentrazione potassica della soluzione nutritiva era di 1.05mM.

Il modello matematico sviluppato da Barber-Claassen è stato utilizzato per predire l'assorbimento di  $^{134}\text{Cs}$  e K in piante alla terza foglia e in fioritura. Nelle piante in fioritura, i valori di assorbimento del  $^{134}\text{Cs}$ , erano di un ordine di grandezza superiore rispetto ai valori misurati, mentre quelli per il K erano dello stesso ordine di grandezza di quelli misurati ma due volte superiori. Non è stato possibile calcolare il valore di assorbimento del  $^{134}\text{Cs}$  e del K per le piante alla terza foglia a causa dell'impossibilità a determinare i parametri della cinetica di assorbimento secondo il modello di Michaelis-Menten.

In seguito a questi risultati appare che il trasporto di isotopi radioattivi dal suolo alla pianta in suoli agrari sia dovuto a vari fattori, di cui l'effetto della struttura fisica del suolo sulla distribuzione degli isotopi radioattivi e delle radici rappresenta solo una parte. Altri processi sono coinvolti nelle dinamiche tra il suolo, la radice e gli isotopi radioattivi, quali: (i) condizioni ambientali (quantità e distribuzione stagionale delle precipitazioni), (ii) attività di microrganismi presenti nella rizosfera e di micorrizze, (iii) redistribuzione degli isotopi all'interno della pianta, e (iv) competizione tra ioni.