

# Centrali geotermoelettriche e "forest decline": telerilevamento per la valutazione dell'impatto sull'ambiente forestale.

C.A. Brunori (1), A. Borgia (2), A. Brunori (3), M. Boschetti (4), M. Meroni (5)

(1) Università di Siena – [cabrunori@email.it](mailto:cabrunori@email.it), (2) EDRA – European Development & Research Agency; Roma , (3) Libero professionista – Perugia, (4) CNR-IREA Milano, (Italy) - [boschetti.m@irea.cnr.it](mailto:boschetti.m@irea.cnr.it), (5) Forest Ecology Lab. – Università della Tuscia Di.S.A.F.Ri., Viterbo - [michele.meroni@unimib.it](mailto:michele.meroni@unimib.it)

## Riassunto

Come osservato altrove in Toscana, una delle cause del deperimento del bosco del M.Amiata sembra essere riconducibile all'attività delle locali centrali geotermoelettriche. La presenza di sostanze acide e metalli pesanti è stata misurata in alcuni siti a diversa distanza dai punti di emissione dei gas. È stato acquisito, analizzato ed interpretato, un set multitemporale di immagini Landsat Thematic Mapper (un'immagine precedente e due successive all'inizio dell'attività delle centrali -1984, 1995 e 2000) finalizzato alla definizione di un trend evolutivo del fenomeno, attraverso il confronto degli indici ottici di vegetazione. Sebbene il sensore satellitare TM (immagini 1984 e 1995) abbia delle caratteristiche strumentali compatibili con il suo successore ETM+ (immagine 2000), purtroppo la stabilità (i.e. calibrazione radiometrica) delle sue misure è andata progressivamente peggiorando, rendendo praticamente impossibile il confronto dei valori assoluti registrati. È stata adottata una tecnica di confronto tra i valori dell'84 e '95 corretti relativamente all'immagine 2000 al fine di rimuovere gli effetti delle diverse condizioni d'illuminazione dovuti all'atmosfera e alla posizione del sole; ciò equivale ad una calibrazione empirica dei dati delle prime due rispetto alla terza (normalizzazione radiometrica tra immagini di un set multitemporale). Potendo osservare una correlazione fra la distribuzione del danno alla vegetazione e la posizione delle centrali geotermoelettriche, si suppone l'esistenza di due meccanismi con cui lo sfruttamento dell'energia geotermica potrebbe influire in maniera determinante sullo stato della vegetazione:

- le emissioni delle centrali sono consistenti in particolare per il contenuto in elementi che possono avere un effetto fitotossico
- l'estrazione del fluido geotermico, che richiama una grande quantità di acqua dagli acquiferi più superficiali riducendo significativamente il loro spessore, fa entrare in uno stato di criticità proprio a causa della mancanza d'acqua a livello degli apparati radicali più profondi.

## Abstract

As observed elsewhere in Tuscany, one of the components of the M.Amiata forest decline appears to be traceable to the activity of the local geothermal power plants. The presence of acid and heavy metals in the rain has been measured in several sampling site with different distances around the gas emission points. Aimed to the phenomenon evolutionary trend definition a set of multitemporal Landsat Thematic Mapper images has been acquired (one before and two after the beginning of the power plant activity - 1984, 1995 and 2000), analysed and interpreted confronting the extracted vegetation optical indexes. Even though the TM sensor (1984 and 1995 images) have instrumental characteristics compatible with its successor ETM+ (image 2000), the stability (i.e. the radiometric calibration) of his measurement progressively worsened making practically impossible comparison among the absolute values recorded. To dismiss the effects of the different illumination conditions, due to the sun position, a comparison methodology between the images taken in 1984 and 1995 relatively to that taken in 2000 needs to be adopted; this is equivalent to an empirical data calibration of the first two respect to the third one (multitemporal normalisation).

We observe a distribution of vegetation damage that increases in proximity and downwind from the geothermal power stations. We propose two mechanisms to explain such influence:

- the emissions from the geothermal power stations bring into the atmosphere elements that can have a phytotoxic effect, particularly boric and sulfidric acids, arsenic and mercury.
- the geothermal fluid extraction drastically lowers the water table of the superficial aquifer, stressing the forest particularly during dry summers.

### La vegetazione dell'Amiata

I sopralluoghi effettuati sull'Amiata (Fig. 1) dall'estate del 2001 hanno evidenziato uno stato di sofferenza dei boschi; Bottacci et al. (1988), Bussotti et al. (1992, 1997 e 2003) descrivono danni simili anche in altre faggete toscane (Vallombrosa, Abetone;), danni categorizzati e catalogati nei manuali europei per la valutazione e il monitoraggio delle condizioni delle foreste (cfr. il manuale della Unione Europea al sito [www.ICP-Forests.org](http://www.ICP-Forests.org)).

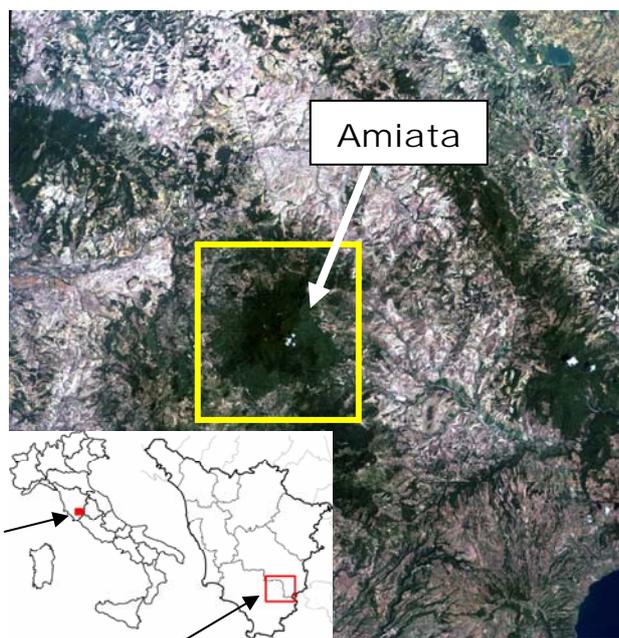


Figura 1: Immagine ETM+(2000) dell'area studiata. Nel riquadro il Mte Amiata: si trova in centro Italia a ridosso del confine tra Toscana, Umbria e Lazio (province di Siena e Grosseto) nei comuni di Abbadia S.Salvatore, Piancastagnaio, Santa Fiora, Arcidosso, Castel del Piano e Seggiano,

I faggi dell'Amiata presentano una sintomatologia attribuibile a condizioni di stress ambientale aspecifico assimilabile ai "danni di nuovo tipo" riferiti, in bibliografia, a condizioni di inquinamento atmosferico diffuso (Schütt e Bowling, 1985). Hartman et al. (1988), in particolare, descrive sintomatologie complesse e qui riconosciute, caratterizzate da:

- presenza, nel periodo estivo di foglie con bordi arrotolati nella parte superiore della chioma;
- ramificazione alterata
- prevalenza di rami sviluppati solo in lunghezza (a "frusta").

Il comportamento anomalo descritto può verificarsi in presenza di inquinamento particellato di natura acida (per es., acido bórico, solfati) che esplica una azione fitotossica quando solubilizzato.

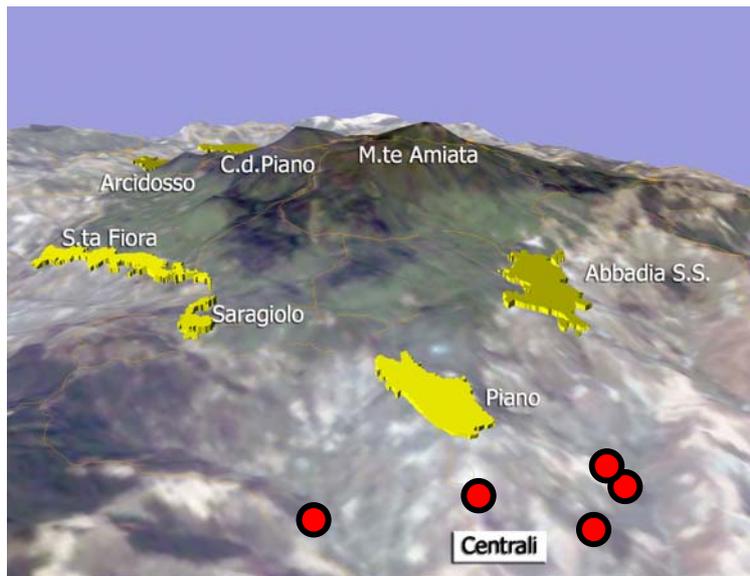
I sintomi osservati, sono quelli caratteristici del *forest decline* (Schütt et al., 1985). La conclusione è che si siano verificati, nel tempo eventi tali da favorire una forma di stress ambientale generalizzato e cronico.

### Analisi chimiche

In generale, si presentano relativamente più danneggiate le piante più vicine alle centrali geotermoelettriche o ad altri punti di emissione di elementi tossici; le analisi chimiche su campioni del fogliame mostrano, fra le altre osservazioni, alcune piante (edera, pino nero ad es.) con anomali quantitativi di metalli pesanti come il Mercurio, rilevato anche in Bacci et al (2000).

Analisi chimiche effettuate su licheni e muschi campionati sui tetti degli abitati di Abbadia S.Salvatore e Piancastagnaio, mostrano come Boro, Mercurio e Zolfo presentino concentrazioni da 3 a 7 volte maggiori rispetto ai valori riscontrabili in aree non contaminate (vedi anche Loppi, 2001; Loppi e Bonini, 2000).

Figura 2: Vista prospettica dell'area studiata.; sono evidenziati i principali centri abitati e le centrali.



La sofferenza osservata potrebbe essere in ogni caso attribuibile ai cambiamenti climatici (riduzione delle precipitazioni, allungamento della siccità estiva, anomale gelate fuori stagione, ecc.), ma non è da escludere l'azione degli acidi presenti nel *fallout* dalle centrali geotermiche che possono determinare una lisciviazione delle sostanze nutritive delle foglie, mentre i metalli pesanti ne determinano l'intossicazione. Inoltre la foresta potrebbe anche risentire dell'impoverimento della falda acquifera (Manzella 2003), anch'esso riconducibile all'utilizzo delle risorse idriche per lo sfruttamento di energia geotermica.

### Processamento e analisi multitemporale delle immagini

La maggiore emissione in atmosfera di inquinanti nell'area studiata, è dunque riferibile allo sfruttamento di energia geotermica come testimoniano sia i lavori citati sia quanto evidenziato dalle analisi effettuate. Dato che l'entrata in funzione della maggior parte delle centrali è relativa alla fine degli anni 80, prima metà 90, per valutare l'evoluzione nel tempo del fenomeno è stata acquisita un'immagine satellitare (TM) del 1984, e due successive ('95 e 2000, ETM+), relativamente al periodo di massimo sviluppo annuale della vegetazione (mesi estivi) quando è possibile ritenere che la curva di crescita del fogliame abbia già raggiunto il massimo sviluppo

Se il sensore TM (immagini 1984 e 1995) possiede caratteristiche strumentali compatibili con il successore ETM+ (immagine 2000), d'altra parte ha subito nel tempo un deterioramento nella qualità di registrazione del segnale. Le misure registrate sono andate progressivamente peggiorando rendendo in pratica impossibile il confronto diretto con i valori assoluti registrati dal sensore ETM+ (Vogelman et al., 2001). È stata quindi applicata una correzione atmosferica relativa delle immagini, adottando una tecnica che permetta il confronto tra i valori registrati nel '84 e '95 con quelli registrati nel 2000, (Song et al. 1999). Ciò equivale ad una calibrazione empirica dei dati (normalizzazione della serie multitemporale) delle prime due rispetto alla terza (Song et al., 2001).

Lo studio dello stato di salute delle piante, è quindi realizzato attraverso l'analisi delle variazioni relative degli indici di vegetazione (VI) ricavati dalle immagini calibrate.

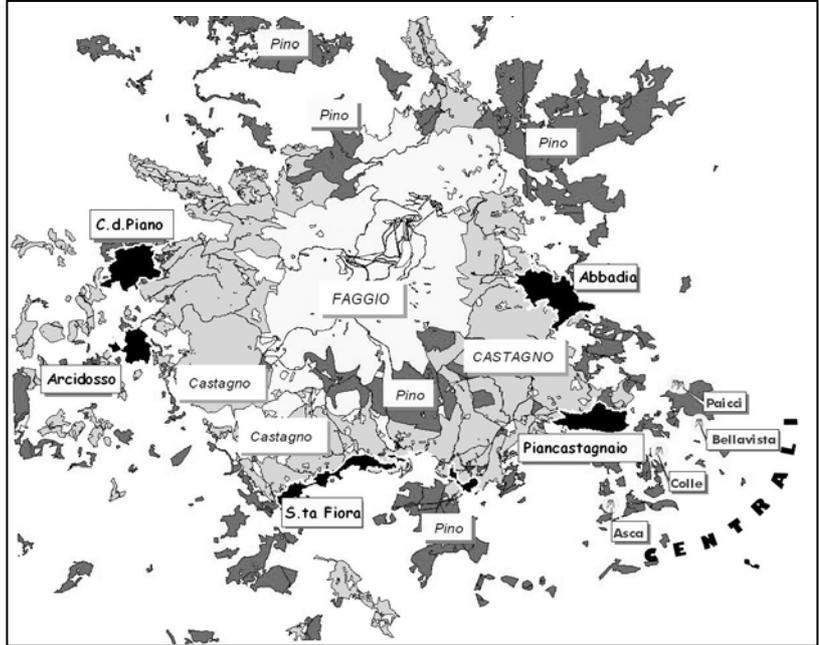
In particolare viene utilizzato il VI *Simple Ratio* (SR), definito come il rapporto fra la radiazione riflessa nell'Infrarosso vicino (NIR) e quella nel Rosso (RED) ( $SR = \rho_{NIR}/\rho_{RED}$  dove  $\rho_{NIR}$  e  $\rho_{RED}$  rappresentano le rispettive riflettanze). Il vantaggio dell'utilizzo di un indice di vegetazione come il SR, sta principalmente nel fatto che può essere calcolato facilmente; inoltre, essendo un rapporto, tende implicitamente a "normalizzare" il dato rispetto all'effetto dei molteplici fattori atmosferici e non, che influenzano i valori rilevati negli intervalli radiometrici osservati (Verstraete M.M, 1994). Le immagini sono state georeferenziate attraverso la tecnica di ortorettificazione. L'immagine del 2000, è stata riportata alla "radianza apparente" al sensore attraverso i parametri di acquisizione (ora e giorno) e calcolato l'indice ottico SR (Simple Ratio) a partire dalle radianze apparenti. La tecnica scelta prevede la correzione radiometrica delle immagini '84 e '95 relativamente al 2000; i valori dell'indice di vegetazione sono stati interpretati ed analizzati per condizioni ritenute omogenee secondo i seguenti fattori:

- lo stato di salute osservata direttamente sulle piante nel 2000;
- le specie arboree dominanti in aree specifiche (faggi, castagni e conifere);

- le diverse condizioni d'illuminazione della vegetazione (luce, penombra e ombra).

Le immagini sono state trattate applicando ai canali rosso e vicino infra-rosso “maschere” relative alle tre condizioni di illuminazione (luce, penombra, ombra), per i tre anni e per le tre specie arboree dominanti (castagni, conifere e faggi. Fig 3).

Figura. 3: Distribuzione delle tre specie arboree dominanti.



L'ipotesi è che entrambe le lunghezze d'onda abbiano mantenuto, nell'arco dei 16 anni la stessa riflettanza mediata su tutto l'Amiata. Ciò equivale a dire che la vegetazione ha mantenuto (mediamente) il proprio vigore vegetativo nel periodo considerato. È un'ipotesi conservativa la dove è stata registrata, al contrario, una indiscutibile sofferenza della vegetazione, particolarmente nell'ultimo periodo. Si è anche ipotizzato che per ogni specie le

lunghezze d'onda (RED e NIR) nelle aree in penombra ed ombra debbano avere, quando mediate su tutta l'area boscata dell'Amiata, la stessa riflettanza delle aree con illuminazione diretta (luce). Sono stati quindi scalati indipendentemente, per ognuna delle specie, i valori di riflettanza sia del RED che del NIR misurati nelle tre condizioni di illuminazione, per le tre date di ripresa, in modo da poter eguagliare la media e la deviazione standard di ognuna di queste popolazioni di valori a quelli della stessa specie in condizioni di illuminazione solare diretta (“luce”) del 2000. Ciò significa calcolare due coefficienti, di cui uno moltiplicativo (gain) ed uno additivo (offset) ed applicarli ad ogni valore misurato. La correzione delle immagini potrà essere accettabile sia rispetto alle divergenze nella taratura degli strumenti, sia alle diverse condizioni di ripresa. Questo tipo di correzione pur non restituendo valori assoluti della riflettanza, permette valutazioni relative attraverso il confronto tra aree distinte. In pratica, per ognuna delle 54 popolazioni di valori di riflettanza ricavate, si calcola la media ( $\bar{x}_{sial}$ ) e la deviazione standard ( $s_{sial}$ ) per il rosso e infra-rosso: dove  $s = \text{faggi, castagni, conifere}$ ,  $i = \text{luce, penombra, ombra}$ ,  $a = 1984, 1995, 2000$  ed  $l = \text{RED, NIR}$ . È facile poi dimostrare che per fare coincidere la media e la deviazione standard di ognuna di queste popolazioni con quelle della popolazione di riferimento (stessa specie arborea, massima illuminazione, anno 2000, stessa lunghezza d'onda) e cioè affinché:  $\bar{x}c_{sial} = \bar{x}_{s,luce,2000,l}$  e  $\bar{s}c_{sial} = s_{s,luce,2000,l}$  dove  $\bar{x}c_{sial}$  e  $\bar{s}c_{sial}$  sono rispettivamente la media e la deviazione standard dei valori scalati (corretti) della popolazione ( $sial$ ) di partenza, si dovranno calcolare coefficienti di

scala che saranno dati da  $gain = a_{sial} = \frac{s_{sial}}{s_{s,luce,2000,l}}$  e  $offset = b_{sial} = \bar{x}_{sial} - a_{sial} \bar{x}_{s,luce,2000,l}$

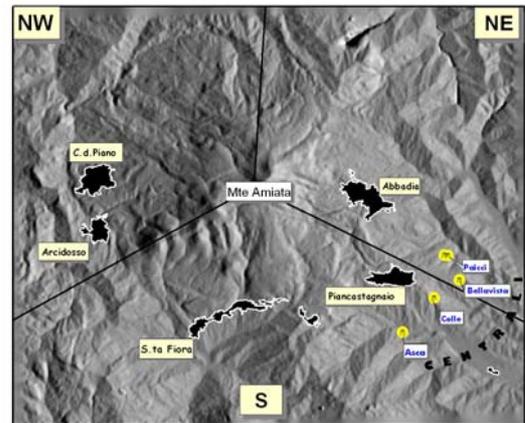
Il valore di riflettanza di ogni pixel ( $r_{xy(sial)}$ ) di coordinate ( $xy$ ) di una data popolazione ( $sial$ ) viene corretto tramite la relazione:  $rc_{xy(sial)} = a_{sial} * r_{xy(sial)} + b_{sial}$ , dove  $rc_{xy(sial)}$  è il valore di riflettanza corretto di ogni pixel di ciascuna popolazione. Infine per calcolare l'indice di vegetazione *simple ratio* ( $SR_{xy(sial)}$ ) per ogni pixel ( $xy$ ) di ciascuna popolazione ( $sial$ ) basterà fare il rapporto tra i valori di riflettanza nel NIR e nel RED, cioè:

$$SR_{xy(sial)} = \frac{rc_{xy(s,i,a,NIR)}}{rc_{xy(s,i,a,RED)}}$$

## Variation of vegetation indices

Observing the images produced from the two differences (SR200 –SR1984 and SR200 –SR1995), three large macro-areas where the slopes of Mt Amiata present different levels of vigor/suffering (Fig. 4).

Figure 4 - Difference between vegetation indices (SR) of forest species of Mt Amiata in the time interval between 1984 and 2000 and between 1995 and 2000. The histograms represent, for each of the macro-areas identified, the quantitative distribution of values in the two periods considered.



The histograms show, for each sector, intervals of value of the differences of SR. The value of the mean of the differences of SR in the macro-area NE indicates a deterioration. In fact, the class between values -1.2 and -0.4 has a higher frequency of the class between 0.4 and 1.2. In the area NW the vegetation index remained constant, while in the area S it shows generally positive values.

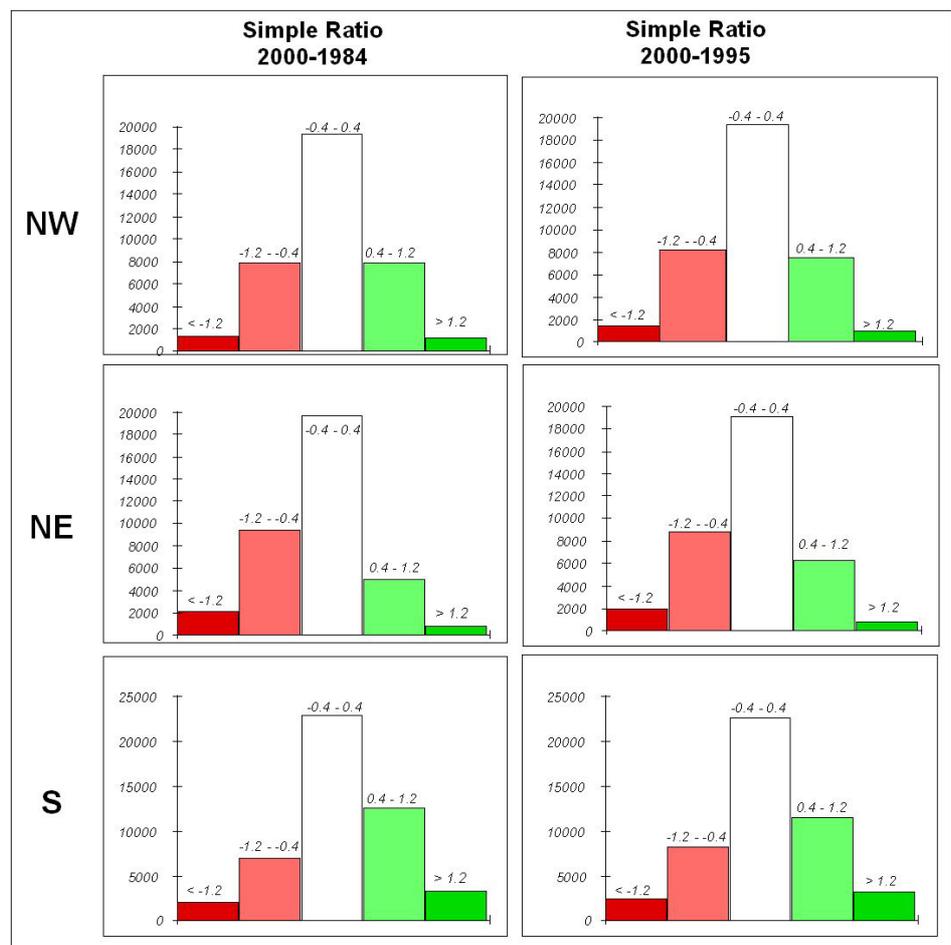
Given that the values of the area NE have a lower mean compared to NW and even more so compared to S, it is evident a deterioration generally widespread in the single macro-area of NE (in particular towards the lower altitudes).

From the analysis of the distribution of the differences it is noted both deteriorations and improvements very evident and localized in small areas in all three zones, especially in NW and S. These depend on forest cuts carried out in the years, in percentage generally constant (and prevalently in the Grosseto area between the macro-areas NW and S), and will therefore have a purely local effect without significantly altering the median values.

## Conclusions

Contrary to what was hypothesized (hypothesis of conservative state of health between 1984 and 2000) it is effectively present a widespread suffering in the vegetation with the described "new type" damages on the eastern and southern slopes of the mountain. This observation is described by the relative variations of the VI SR values which decrease instead of remaining constant as hypothesized.

Furthermore, based on the conservative hypothesis, it is evident how the vegetation index of the macro-area NE has immediately undergone a statistically significant degradation between 1984 and 2000,



rispetto alle macroaree NW e S. Lo stesso può dirsi che sia avvenuto, anche se in forma minore, tra il 1995 ed il 2000. Il sincronismo fra l'entrata in funzione delle centrali e il manifestarsi di stati di sofferenza diffusa della vegetazione, suggeriscono una correlazione fra la loro attività e il degrado dei boschi amiatini. Anche ipotizzando un generale deterioramento della vegetazione legato a locali condizioni ambientali, o a variazioni globali del clima, o all'inquinamento atmosferico diffuso, è evidente una relazione tra stato dei boschi amiatini e fattori di stress indirettamente indotti sulla vegetazione dallo sfruttamento dell'energia geotermica. Almeno due potrebbero essere i meccanismi con cui lo sfruttamento dell'energia geotermica influisce in maniera determinante sullo stato della vegetazione. Come evidenziato in sopralluoghi effettuati nel marzo 2001, le emissioni delle centrali sono consistenti in particolare per il contenuto in elementi che possono avere un effetto fitotossico (acido solfidrico, acido borico, arsenico e mercurio). Va sottolineato il fatto che la parte più sofferente del bosco amiatino (NE) è proprio quella investita dai venti dominanti che trasportano i vapori emessi dalle centrali (venti sud orientali di scirocco).

L'estrazione del fluido geotermico richiama una grande quantità di acqua dagli acquiferi più superficiali riducendo significativamente il loro spessore. In un lavoro di Regione Toscana e Istituto di Geoscienze e Georisorse (Manzella 2003), si evince che la superficie freatica è anormalmente depressa. Il bosco potrebbe quindi entrare in uno stato di criticità proprio a causa della mancanza d'acqua a livello degli apparati radicali più profondi.

### **Riferimenti bibliografici**

Bottacci A., Brogi L., Bussotti F., Cenni E., Clauser F., Ferretti M., Gellini R., Grossoni P., Schiff S. 1988. Inquinamento ambientale e deperimento del bosco in Toscana. Regione Toscana, Soc. Bot. Ita., Firenze.

Bussotti F., Gellini R., Grossoni P., Raddi S., 1992 - Mediterranean forest tree decline in Italy. Edited by P. Raddi. National Research Council, Italy. Firenze. 64 p.

Bussotti F., Cenni E., Cozzi A., Ferretti M., 1997. The impact of geothermal power plants on forest vegetation . A case study at Travale (Tuscany, Central Italy). Environmental Monitoring and assessment 45, pp 181- 194

Bussotti F., Tognelli R., Montagni G., Borghini F., Bruschi P., Tani C., 2003. Response of Quercus pubescens leaves exposed to geothermal pollutant input in southern Tuscany (Italy).

Goward S.N, Markam B., Dye D.G., Dulaney W and Yang J.(1991); Normalized Difference Vegetation Index Measurement from the Advanced Very High Resolution Radiometer. Remote Sensing of Environment, 35, 257-277.

Hartmann G., Nienhaus F., Butin H., 1988 - Farbatlas Waldschäden - Diagnose von Baumkrankheiten. Eugen Ulmer GmbH and Co. Verlag, Stuttgart. 256 p.

Loppi Stefano, 2001. Environmental distribution of mercury and other trace elements in the geothermal area of Bagnore (Mt. Amiata, Italy). Chemosphere, 45, pp 991-995.

Manzella A., 2003. Convenzione tra la Regione Toscana e Istituto di Geoscienze e Georisorse per la realizzazione della campagna geofisica triennale tramite elettromagnetismo relativa all'acquifero dell'edificio vulcanico del Monte Amiata. Prima relazione intermedia, pp. 10.

Schütt O., Cowling E.B., 1985 - Waldsterben, a general decline of forests in central Europe: symptoms, development and possible causes. Plant Disease, 69: 548-558.

Schütt P., Koch W., Blaschke H., Lang K.J., Reigber E., Schuck H.J., Summerer H. 1985. So stirbt der Wald (Così muore il bosco). BLV Verlagsgesellschaft, Munchen.

Song C., Woodcock C. E., Seto K. C. (2001). Classification and change detection using Landsat TM data: when and how to correct atmospheric effects? Remote sensing of Environment; Vol. 75:230-244.

Verstraete M. M. (1994) Retrieving Properties from Remote Sensing Measurement: Imaging Spectrometry – a Tool for Environmental Observation, 109-123. J.Hill and J.Megiér (eds.). © 1994 ECSC, EEC,EAEC, Brussels.