

POLITECNICO DI MILANO
Dipartimento di Ingegneria Idraulica, Ambientale,
Infrastrutture viarie, e Rilevamento



**APPLICAZIONE DEL COMMUNITY LAND
MODEL IN SUD AFRICA: COMPARAZIONE
TRA MODELLO BIOGEOCHIMICO E
MODELLO DI DINAMICA DELLA
VEGETAZIONE**

Relatore: Prof. Carlo DE MICHELE

Correlatore: Ing. Davide DONZELLI

Tesi di laurea di:

Pietro SANTORO

Matr. 725255

Anno accademico 2009/2010

Ringraziamenti

Sintesi

Lo scopo del presente elaborato di laurea è quello di generare serie stagionali di variabili relative alla vegetazione coerenti con quelle dei dati osservati nel territorio del Sud Africa da confrontare poi con i dati di vegetazione media osservati. A tale scopo è stato utilizzato un modello biogeochimico e un modello di dinamica della vegetazione al fine di comprendere quale potesse essere il più utile al nostro studio. L'analisi effettuata ha interessato tre diverse tipologie di bioma (*savana*, *prateria* e *deserto*) tipiche del territorio del Sud Africa. Per ognuno dei tre siti scelti si è utilizzato sia il modello biogeochimico CN sia il modello dinamico di vegetazione globale CNDV, per un totale di sei simulazioni in modalità *single site*.

La ricerca di un modello in grado di generare serie stagionali di variabili relative alla vegetazione ha messo in evidenza diverse limitazioni soprattutto quando si è utilizzato il modello di dinamica della vegetazione globale CNDV, suggerendo alcune criticità nel suo utilizzo in simulazioni rappresentanti scenari di cambiamento climatico in Sud Africa.

Il confronto con i dati di letteratura (dove possibile) ha evidenziato una forte tendenza a sottostimare le variabili da parte del modello CNDV, inferiori anche di un ordine di grandezza rispetto al modello biogeochimico CN. Le differenze tra i due modelli sono state meno evidenti nel bioma desertico della regione Nama Karoo. Negli altri due tipi di bioma invece il modello biogeochimico e quello di dinamica della vegetazione sono risultati concordi solo per alcune variabili simulate. Inoltre per la simulazione nel bioma savana effettuata al sito di Skukuza è stato realizzato un confronto non solo tra il modello CN e quello CNDV ma si è considerato lo studio effettuato da [Scholes e Walker, 1999] nel sito di ricerca di Nylsvley. Tenendo conto delle semplificazioni adottate, si è potuto confermare un buon accordo nel rappresentare i diversi flussi e serbatoi presenti, almeno sul piano qualitativo, per quanto riguarda il modello biogeochimico.

Indice dei contenuti

RINGRAZIAMENTI.....	I
SINTESI.....	III
INDICE DEI CONTENUTI.....	IV
INDICE DELLE FIGURE	VI
INDICE DELLE TABELLE.....	X
CAPITOLO 1 INTRODUZIONE.....	1
1.1 INQUADRAMENTO	1
1.2 OBIETTIVO DELLO STUDIO	5
1.3 ARTICOLAZIONE DELL'ELABORATO.....	5
CAPITOLO 2 THE COMMUNITY LAND MODEL: CLM	7
2.1 STORIA DEL MODELLO E PANORAMICA	7
2.1.1 <i>Eterogeneità della superficie e struttura dei dati</i>	8
2.1.2 <i>Processi biogeofisici</i>	10
2.2 REQUISITI DEL MODELLO	13
2.2.1 <i>Accoppiamento atmosferico</i>	13
2.2.2 <i>Inizializzazione</i>	16
2.2.3 <i>Dati superficiali</i>	16
2.3 COMPOSIZIONE E STRUTTURA DELL'ECOSISTEMA.....	19
2.4 FLUSSI RADIATIVI	22
2.5 FLUSSI DI CALORE SENSIBILE E DI CALORE LATENTE	22
2.6 TEMPERATURE DEL TERRENO E DELLA NEVE	24
2.7 IDROLOGIA	24
2.7.1 <i>Acqua della chioma</i>	25
2.7.2 <i>Ruscigliamento superficiale ed infiltrazione</i>	28
2.7.3 <i>Acqua del suolo e proprietà idrauliche</i>	28

2.7.4	<i>Interazioni tra acqua sotterranea e acqua del suolo</i>	29
2.8	RESISTENZA STOMATALE E FOTOSINTESI	30
2.9	MODELLO BIOGEOCHIMICO CN	30
2.9.1	<i>Descrizione del modello</i>	30
2.9.2	<i>Variabili di stato della vegetazione</i>	31
2.9.3	<i>Respirazione autotrofa ed eterotrofa</i>	32
2.9.4	<i>Allocazione del carbonio e dell'azoto</i>	33
2.9.5	<i>Fenologia e struttura della vegetazione</i>	34
2.9.6	<i>Incendi e mortalità</i>	35
2.9.7	<i>Fonti di azoto e perdite</i>	36
2.10	MODELLO DINAMICO DI VEGETAZIONE GLOBALE CNDV	37
2.10.1	<i>Stabilimento e sopravvivenza</i>	38
2.10.2	<i>Competizione per la luce</i>	40
2.10.3	<i>Processi modificati del CN per l'accoppiamento con il CNDV</i>	41
CAPITOLO 3 ANALISI		42
3.1	ARTICOLAZIONE DELLO STUDIO	42
3.2	CONFIGURAZIONE DEL MODELLO CLM E UTILIZZO DEL SERVER LAGRANGE AL CILEA	44
3.3	SIMULAZIONE NEL BIOMA SAVANA	47
3.3.1	<i>Idrologia</i>	49
3.3.2	<i>Produttività della vegetazione</i>	53
3.3.3	<i>Cicli biogeochimici del carbonio e dell'azoto</i>	56
3.4	SIMULAZIONE NEL BIOMA PRATERIA	68
3.4.1	<i>Idrologia</i>	71
3.4.2	<i>Produttività della vegetazione</i>	75
3.4.3	<i>Cicli biogeochimici del carbonio e dell'azoto</i>	78
3.5	SIMULAZIONE NEL BIOMA DESERTO	87
3.5.1	<i>Idrologia</i>	89
3.5.2	<i>Produttività della vegetazione</i>	93
3.5.3	<i>Cicli biogeochimici del carbonio e dell'azoto</i>	95
CAPITOLO 4 CONCLUSIONI		104
RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI		107
APPENDICE A COSTANTI FISICHE		111
A.1	CONSTANTI FISICHE CONDIVISE DA TUTTE LE COMPONENTI DEL MODELLO	111

Indice delle figure

FIGURA 1.1 TIPOLOGIE DI BIOMA IN SUD AFRICA.	2
FIGURA 1.2 PRECIPITAZIONE ANNUALE MEDIA SUL SUD AFRICA PER IL PERIODO 1961-1990.	4
FIGURA 1.3 TEMPERATURA ANNUALE ANNUALE MEDIA SUL SUD AFRICA PER IL PERIODO 1961-1990.	4
FIGURA 2.1 CONFIGURAZIONE DI DEFAULT ATTUALE DELLA GERARCHIA DELLA SUBGRIGLIA DEL CLM, CHE EVIDENZIA L'UNITÀ DI TERRITORIO VEGETATO.	9
FIGURA 2.2 BIOGEOFISICA DEL TERRITORIO E PROCESSI IDROLOGICI SIMULATI DAL CLM.	12
FIGURA 2.3 MODIFICA DELLA PRECIPITAZIONE DA PARTE DELLA VEGETAZIONE.....	26
FIGURA 2.4 SERBATOI DEL CARBONIO E DELL'AZOTO.	32
FIGURA 3.1 SERIE STORICA DELLA VARIABILE DI OUTPUT NPP (PRODUZIONE PRIMARIA NETTA) DEL CN PER CIRCA 1000 ANNI DI SIMULAZIONE.	46
FIGURA 3.2 SERIE STORICA DELLA VARIABILE DI OUTPUT NPP (PRODUZIONE PRIMARIA NETTA) DEL CNDV PER CIRCA 1000 ANNI DI SIMULAZIONE.	46
FIGURA 3.3 LOCALIZZAZIONE DEL SITO SKUKUZA.....	48
FIGURA 3.2 VEGETAZIONE TIPICA DEL BIOMA SAVANA.....	48
FIGURA 3.3 ANDAMENTO STAGIONALE DELLA PRECIPITAZIONE USATA COME INPUT PER LE SIMULAZIONI CON IL MODELLO CN E CON IL MODELLO CNDV.	49
FIGURA 3.4 ANDAMENTO STAGIONALE DEL CONTENUTO VOLUMETRICO D'ACQUA NEL SUOLO CON IL MODELLO CN.	50
FIGURA 3.5 ANDAMENTO STAGIONALE DEL CONTENUTO VOLUMETRICO D'ACQUA NEL SUOLO CON IL MODELLO CNDV.	50
FIGURA 3.6 ANDAMENTO STAGIONALE DELL'EVAPORAZIONE E DELLA TRASPIRAZIONE DELLA CHIOMA E DELL'EVAPORAZIONE DEL TERRENO CON IL MODELLO CN.	51
FIGURA 3.7 ANDAMENTO STAGIONALE DELL'EVAPORAZIONE E DELLA TRASPIRAZIONE DELLA CHIOMA E DELL'EVAPORAZIONE DEL TERRENO CON IL MODELLO CNDV.....	52
FIGURA 3.8 ANDAMENTO STAGIONALE DELLA PRODUZIONE PRIMARIA LORDA (GPP), DELLA PRODUZIONE PRIMARIA NETTA (NPP) E DELLA RESPIRAZIONE AUTOTROFA (AR) CON IL MODELLO CN.....	54
FIGURA 3.9 ANDAMENTO STAGIONALE DELLA PRODUZIONE PRIMARIA LORDA (GPP), DELLA PRODUZIONE PRIMARIA NETTA (NPP) E DELLA RESPIRAZIONE AUTOTROFA (AR) CON IL MODELLO CNDV.	54
FIGURA 3.10 ANDAMENTO STAGIONALE DELL'INDICE DI AREA FOGLIARE (LAI) E DELL'INDICE DI AREA DEL GAMBO (SAI) CON IL MODELLO CN.	55

FIGURA 3.11 ANDAMENTO STAGIONALE DELL'INDICE DI AREA FOGLIARE (LAI) E DELL'INDICE DI AREA DEL GAMBO (SAI) CON IL MODELLO CNDV.	55
FIGURA 3.12 ANDAMENTO STAGIONALE DELLA CADUTA SULLA LETTIERA CON IL MODELLO CN.	57
FIGURA 3.13 ANDAMENTO STAGIONALE DELLA CADUTA SULLA LETTIERA CON IL MODELLO CNDV.	57
FIGURA 3.14 ANDAMENTO STAGIONALE DEL CARBONIO E DELL'AZOTO TOTALE AL LIVELLO DEI PFT CON IL MODELLO CN.	58
FIGURA 3.15 ANDAMENTO STAGIONALE DEL CARBONIO E DELL'AZOTO TOTALE AL LIVELLO DEI PFT CON IL MODELLO CNDV.	59
FIGURA 3.16 ANDAMENTO STAGIONALE DEL CARBONIO E DELL'AZOTO TOTALE NELLA LETTIERA CON IL MODELLO CN. ..	59
FIGURA 3.17 ANDAMENTO STAGIONALE DEL CARBONIO E DELL'AZOTO TOTALE NELLA LETTIERA CON IL MODELLO CNDV.	60
FIGURA 3.18 ANDAMENTO STAGIONALE DEL CARBONIO E DELL'AZOTO AL LIVELLO DELLA FOGLIA CON IL MODELLO CN..	60
FIGURA 3.19 ANDAMENTO STAGIONALE DEL CARBONIO E DELL'AZOTO AL LIVELLO DELLA FOGLIA CON IL MODELLO CNDV.	61
FIGURA 3.20 ANDAMENTO STAGIONALE DEL TASSO DI MINERALIZZAZIONE LORDA E NETTA CON IL MODELLO CN.	62
FIGURA 3.21 ANDAMENTO STAGIONALE DELLA MINERALIZZAZIONE LORDA E NETTA CON IL MODELLO CNDV.	62
FIGURA 3.22 ANDAMENTO STAGIONALE DELL'IMMOBILIZZAZIONE E DELLA DENITRIFICAZIONE CON IL MODELLO CN.	63
FIGURA 3.23 ANDAMENTO STAGIONALE DELL'IMMOBILIZZAZIONE E DELLA DENITRIFICAZIONE CON IL MODELLO CNDV.	64
FIGURA 3.24 ANDAMENTO STAGIONALE DELLA MINERALIZZAZIONE DI AZOTO NEL SUOLO E DEL PRELIEVO DA PARTE DELLA PIANTA DI AZOTO MINERALE DAL SUOLO CON IL MODELLO CN.	64
FIGURA 3.25 ANDAMENTO STAGIONALE DELLA MINERALIZZAZIONE DI AZOTO NEL SUOLO E DEL PRELIEVO DA PARTE DELLA PIANTA DI AZOTO MINERALE DAL SUOLO CON IL MODELLO CNDV.	65
FIGURA 3.26 ANDAMENTO STAGIONALE DEL CARBONIO E DELL'AZOTO PERSI NEGLI INCENDI AL LIVELLO DEI PFT CON IL MODELLO CN.	66
FIGURA 3.27 LOCALIZZAZIONE DEL SITO NELLA ZONA DEL LESOTHO (GRASSLAND).	69
FIGURA 3.28 VEGETAZIONE TIPICA DEL BIOMA GRASSLAND.	70
FIGURA 3.29 ANDAMENTO STAGIONALE DELLA PRECIPITAZIONE USATA COME INPUT PER LE SIMULAZIONI CON IL MODELLO CN E CON IL MODELLO CNDV.	71
FIGURA 3.30 ANDAMENTO STAGIONALE DEL CONTENUTO VOLUMETRICO D'ACQUA NEL SUOLO CON IL MODELLO CN. ..	72
FIGURA 3.31 ANDAMENTO STAGIONALE DEL CONTENUTO VOLUMETRICO D'ACQUA NEL SUOLO CON IL MODELLO CNDV	72
FIGURA 3.32 ANDAMENTO STAGIONALE DELL'EVAPORAZIONE E DELLA TRASPIRAZIONE DELLA CHIOMA E DELL'EVAPORAZIONE DEL TERRENO CON IL MODELLO CN.	73
FIGURA 3.33 ANDAMENTO STAGIONALE DELL'EVAPORAZIONE E DELLA TRASPIRAZIONE DELLA CHIOMA E DELL'EVAPORAZIONE DEL TERRENO CON IL MODELLO CNDV.	73

FIGURA 3.34 ANDAMENTO STAGIONALE DELLA PRODUZIONE PRIMARIA LORDA (GPP), DELLA PRODUZIONE PRIMARIA NETTA (NPP) E DELLA RESPIRAZIONE AUTOTROFA (AR) CON IL MODELLO CN.	75
FIGURA 3.35 ANDAMENTO STAGIONALE DELLA PRODUZIONE PRIMARIA LORDA (GPP), DELLA PRODUZIONE PRIMARIA NETTA (NPP) E DELLA RESPIRAZIONE AUTOTROFA (AR) CON IL MODELLO CNDV.....	75
FIGURA 3.36 ANDAMENTO STAGIONALE DELL'INDICE DI AREA FOGLIARE (LAI) E DELL'INDICE DI AREA DEL GAMBO (SAI) CON IL MODELLO CN.	76
FIGURA 3.35 ANDAMENTO STAGIONALE DELL'INDICE DI AREA FOGLIARE (LAI) E DELL'INDICE DI AREA DEL GAMBO (SAI) CON IL MODELLO CNDV.....	76
FIGURA 3.38 ANDAMENTO STAGIONALE DELLA CADUTA SULLA LETTIERA CON IL MODELLO CN.	78
FIGURA 3.39 ANDAMENTO STAGIONALE DELLA CADUTA SULLA LETTIERA CON IL MODELLO CNDV.	78
FIGURA 3.40 ANDAMENTO STAGIONALE DEL CARBONIO E DELL'AZOTO TOTALE AL LIVELLO DEI PFT CON IL MODELLO CN.	79
FIGURA 3.41 ANDAMENTO STAGIONALE DEL CARBONIO E DELL'AZOTO TOTALE AL LIVELLO DEI PFT CON IL MODELLO CNDV.....	79
FIGURA 3.42 ANDAMENTO STAGIONALE DEL CARBONIO E DELL'AZOTO TOTALE NELLA LETTIERA CON IL MODELLO CN. ...	80
FIGURA 3.43 ANDAMENTO STAGIONALE DEL CARBONIO E DELL'AZOTO TOTALE NELLA LETTIERA CON IL MODELLO CNDV.	80
FIGURA 3.44 ANDAMENTO STAGIONALE DEL CARBONIO E DELL'AZOTO AL LIVELLO DELLA FOGLIA CON IL MODELLO CN. .	81
FIGURA 3.45 ANDAMENTO STAGIONALE DEL CARBONIO E DELL'AZOTO AL LIVELLO DELLA FOGLIA CON IL MODELLO CNDV.	81
FIGURA 3.46 ANDAMENTO STAGIONALE DELLA MINERALIZZAZIONE LORDA E NETTA CON IL MODELLO CN.	82
FIGURA 3.47 ANDAMENTO STAGIONALE DELLA MINERALIZZAZIONE LORDA E NETTA CON IL MODELLO CNDV.....	82
FIGURA 3.48 ANDAMENTO STAGIONALE DELL'IMMOBILIZZAZIONE E DELLA DENITRIFICAZIONE CON IL MODELLO CN.	83
FIGURA 3.49 ANDAMENTO STAGIONALE DELL'IMMOBILIZZAZIONE E DELLA DENITRIFICAZIONE CON IL MODELLO CNDV.	83
FIGURA 3.50 ANDAMENTO STAGIONALE DELLA MINERALIZZAZIONE DI AZOTO NEL SUOLO E DEL PRELIEVO DA PARTE DELLA PIANTA DI AZOTO MINERALE DAL SUOLO CON IL MODELLO CN.....	84
FIGURA 3.51 ANDAMENTO STAGIONALE DELLA MINERALIZZAZIONE DI AZOTO NEL SUOLO E DEL PRELIEVO DA PARTE DELLA PIANTA DI AZOTO MINERALE DAL SUOLO CON IL MODELLO CNDV.	84
FIGURA 3.52 ANDAMENTO STAGIONALE DEL CARBONIO E DELL'AZOTO PERSI NEGLI INCENDI AL LIVELLO DEI PFT CON IL MODELLO CN.....	85
FIGURA 3.53 LOCALIZZAZIONE DEL SITO NELLA ZONA DESERTICA DEL NAMA KAROO.	87
FIGURA 3.54 VEGETAZIONE TIPICA DEL BIOMA NAMA KAROO.	88
FIGURA 3.55 ANDAMENTO STAGIONALE DELLA PRECIPITAZIONE USATA COME INPUT PER LE SIMULAZIONI CON IL MODELLO CN E CON IL MODELLO CNDV.	89
FIGURA 3.56 ANDAMENTO STAGIONALE DEL CONTENUTO VOLUMETRICO D'ACQUA NEL SUOLO CON IL MODELLO CN . . .	90

FIGURA 3.57 ANDAMENTO STAGIONALE DEL CONTENUTO VOLUMETRICO D'ACQUA NEL SUOLO CON IL MODELLO CNDV	90
FIGURA 3.58 ANDAMENTO STAGIONALE DELL'EVAPORAZIONE E DELLA TRASPIRAZIONE DELLA CHIOMA E DELL'EVAPORAZIONE DEL TERRENO CON IL MODELLO CN.	91
FIGURA 3.59 ANDAMENTO STAGIONALE DELL'EVAPORAZIONE E DELLA TRASPIRAZIONE DELLA CHIOMA E DELL'EVAPORAZIONE DEL TERRENO CON IL MODELLO CNDV.	91
FIGURA 3.60 ANDAMENTO STAGIONALE DELLA PRODUZIONE PRIMARIA LORDA (GPP), DELLA PRODUZIONE PRIMARIA NETTA (NPP) E DELLA RESPIRAZIONE AUTOTROFA (AR) CON IL MODELLO CN.	93
FIGURA 3.61 ANDAMENTO STAGIONALE DELLA PRODUZIONE PRIMARIA LORDA (GPP), DELLA PRODUZIONE PRIMARIA NETTA (NPP) E DELLA RESPIRAZIONE AUTOTROFA (AR) CON IL MODELLO CNDV.	93
FIGURA 3.62 ANDAMENTO STAGIONALE DELL'INDICE DI AREA FOGLIARE (LAI) E DELL'INDICE DI AREA DEL GAMBO (SAI) CON IL MODELLO CN.	94
FIGURA 3.63 ANDAMENTO STAGIONALE DELL'INDICE DI AREA FOGLIARE (LAI) E DELL'INDICE DI AREA DEL GAMBO (SAI) CON IL MODELLO CNDV.	94
FIGURA 3.64 ANDAMENTO STAGIONALE DELLA CADUTA SULLA LETTIERA CON IL MODELLO CN.	95
FIGURA 3.65 ANDAMENTO STAGIONALE DELLA CADUTA SULLA LETTIERA CON IL MODELLO CNDV.	96
FIGURA 3.66 ANDAMENTO STAGIONALE DEL CARBONIO E DELL'AZOTO TOTALE AL LIVELLO DEI PFT CON IL MODELLO CN.	97
FIGURA 3.67 ANDAMENTO STAGIONALE DEL CARBONIO E DELL'AZOTO TOTALE AL LIVELLO DEI PFT CON IL MODELLO CNDV.	97
FIGURA 3.68 ANDAMENTO STAGIONALE DEL CARBONIO E DELL'AZOTO TOTALE NELLA LETTIERA CON IL MODELLO CN. ..	98
FIGURA 3.69 ANDAMENTO STAGIONALE DEL CARBONIO E DELL'AZOTO TOTALE NELLA LETTIERA CON IL MODELLO CNDV.	98
FIGURA 3.70 ANDAMENTO STAGIONALE DEL CARBONIO E DELL'AZOTO AL LIVELLO DELLA FOGLIA CON IL MODELLO CN..	99
FIGURA 3.71 ANDAMENTO STAGIONALE DEL CARBONIO E DELL'AZOTO AL LIVELLO DELLA FOGLIA CON IL MODELLO CNDV.	99
FIGURA 3.72 ANDAMENTO STAGIONALE DELLA MINERALIZZAZIONE LORDA E NETTA CON IL MODELLO CN.	100
FIGURA 3.73 ANDAMENTO STAGIONALE DELLA MINERALIZZAZIONE LORDA E NETTA CON IL MODELLO CNDV.	100
FIGURA 3.74 ANDAMENTO STAGIONALE DELL'IMMOBILIZZAZIONE E DELLA DENITRIFICAZIONE CON IL MODELLO CN. ..	101
FIGURA 3.75 ANDAMENTO STAGIONALE DELL'IMMOBILIZZAZIONE E DELLA DENITRIFICAZIONE CON IL MODELLO CNDV.	101
FIGURA 3.76 ANDAMENTO STAGIONALE DELLA MINERALIZZAZIONE DI AZOTO NEL SUOLO E DEL PRELIEVO DA PARTE DELLA PIANTA DI AZOTO MINERALE DAL SUOLO CON IL MODELLO CN.	102
FIGURA 3.77 ANDAMENTO STAGIONALE DELLA MINERALIZZAZIONE DI AZOTO NEL SUOLO E DEL PRELIEVO DA PARTE DELLA PIANTA DI AZOTO MINERALE DAL SUOLO CON IL MODELLO CNDV.	102

Indice delle tabelle

TABELLA 2.1. INPUT ATMOSFERICO AL MODELLO CLM.....	14
TABELLA 2.2. OUTPUT DEL CLM AL MODELLO ATMOSFERICO.....	15
TABELLA 2.3. DATI SUPERFICIALI RICHIESTI PER IL CLM, LORO RISOLUZIONE SPAZIALE DI BASE E METODO DI AGGREGAZIONE ALLA GRIGLIA DEL MODELLO.....	18
TABELLA 2.4. TIPI FUNZIONALI DI PIANTE (PFT).....	20
TABELLA 2.5. ALTEZZE DEI TIPI FUNZIONALI DI PIANTE (PFT).	21
TABELLA 2.6. BIOGEOGRAFIA DEI TIPI FUNZIONALI DI PIANTE (PFT) RISPETTO AL CLIMA.	40
TABELLA 3.1. TEMPI DI SPIN-UP DEL CLM NECESSARI PER IL RAGGIUNGIMENTO DI UNO STATO DI EQUILIBRIO CON IL CLIMA.....	45
TABELLA 3.2. VALORI ANNUALI DELLE VARIABILI IDROLOGICHE OTTENUTI CON IL MODELLO CLM PER SKUKUZA. NELL'ULTIMA COLONNA È INDICATO IL VALORE DI RIFERIMENTO IN LETTERATURA.	53
TABELLA 3.3. VALORI ANNUALI DELLE VARIABILI RELATIVE ALLA PRODUTTIVITÀ OTTENUTI CON IL MODELLO CLM PER LA SIMULAZIONE EFFETTUATA A SKUKUZA. NELLE ULTIME DUE COLONNE SONO RIPORTATI I VALORI DI RIFERIMENTO IN LETTERATURA.	56
TABELLA 3.4. VALORI ANNUALI DELLE VARIABILI RELATIVE AI CICLI BIOGEOCHIMICI DI CARBONIO (C) E AZOTO (N) OTTENUTI CON IL MODELLO CLM PER LA SIMULAZIONE EFFETTUATA A SKUKUZA. NELL'ULTIMA COLONNA SONO RIPORTATI I VALORI DI RIFERIMENTO IN LETTERATURA.	66
TABELLA 3.5. VALORI ANNUALI DELLE VARIABILI IDROLOGICHE OTTENUTI CON IL MODELLO CLM PER LA SIMULAZIONE EFFETTUATA A LESOTHO.	73
TABELLA 3.6. VALORI ANNUALI DELLE VARIABILI RELATIVE ALLA PRODUTTIVITÀ OTTENUTI CON IL MODELLO CLM PER LA SIMULAZIONE EFFETTUATA A LESOTHO. NELL'ULTIMA COLONNA SONO RIPORTATI I VALORI DI RIFERIMENTO IN LETTERATURA.	77
TABELLA 3.7. VALORI ANNUALI DELLE VARIABILI RELATIVE AI CICLI BIOGEOCHIMICI DI CARBONIO (C) E AZOTO (N) OTTENUTI CON IL MODELLO CLM PER LA SIMULAZIONE EFFETTUATA A LESOTHO.	86
TABELLA 3.8. VALORI ANNUALI DELLE VARIABILI IDROLOGICHE OTTENUTI CON IL MODELLO CLM PER LA SIMULAZIONE EFFETTUATA A NAMA KAROO.	92

TABELLA 3.9. VALORI ANNUALI DELLE VARIABILI RELATIVE ALLA PRODUTTIVITÀ OTTENUTI CON IL MODELLO CLM PER LA SIMULAZIONE EFFETTUATA A NAMA KAROO. NELL' ULTIMA COLONNA SONO RIPORTATI I VALORI DI RIFERIMENTO IN LETTERATURA.	95
TABELLA 3.10. VALORI ANNUALI DELLE VARIABILI RELATIVE AI CICLI BIOGEOCHIMICI DI CARBONIO (C) E AZOTO (N) OTTENUTI CON IL MODELLO CLM PER LA SIMULAZIONE EFFETTUATA A NAMA KAROO.	103
TABELLA A.1. COSTANTI FISICHE.	111

CAPITOLO 1

INTRODUZIONE

1.1 Inquadramento

Il presente elaborato di laurea va collocato all'interno di un progetto di tutela della biodiversità che prevede di individuare i legami esistenti tra il cambiamento climatico, la biodiversità e la desertificazione in Sud Africa e le possibili misure per limitarne le aree desertiche [De Michele e Scholes, 2009]. L'applicazione di un modello eco-idrologico ad alcuni dei bioma presenti in Sud Africa ha lo scopo di ottenere delle mappe di cambiamento della biodiversità e di espansione e contrazione delle aree desertiche. La desertificazione è un fenomeno che cambia il volto del territorio rendendo aree produttive in aree non-produttive, come conseguenza soprattutto delle attività umane ed è influenzata dalle variazioni climatiche. La desertificazione è supportata dallo sfruttamento eccessivo dei pascoli, dalla distruzione della vegetazione (legno usato come combustibile), da pratiche di irrigazione e di coltivazione errate. Essa generalmente si verifica nelle aree semi-aride ai confini dei deserti, caratterizzate da una precipitazione annuale media inferiore ai 600 (mm) (Figura 1.2). Circa il 60% del Sud Africa è semi-arido e a rischio di desertificazione. In Sud Africa la precipitazione annuale media è di 498 mm, il 60% del paese riceve meno che 600 mm di pioggia l'anno (il minimo per un raccolto che abbia successo in un suolo secco), il 30% meno di 300 mm l'anno e il 21% meno di 200 mm all'anno. Una linea di precipitazione annuale che corre da nord a sud divide il Sud Africa in due parti: la parte ovest più secca e la parte est più umida. Uno dei maggiori impatti della desertificazione è la perdita di biodiversità. Il Sud Africa è caratterizzato da cinque biomi dominanti spazialmente, chiamati Fynbos, Succulent Karoo, Nama Karoo, Grassland (Prateria) e Savana, con due biomi di piccola estensione geografica, il Deserto e la Foresta. Alcuni di questi biomi sono unici al mondo e sono caratterizzati da livelli straordinari di abbondanza ed endemismo come Fynbos e Succulent

Karoo. Il bioma Grassland contiene molte specie endemiche, nonostante non sia tradizionalmente riconosciuto come un centro di endemismo. Il Nama Karoo si trova in Sud Africa, in Namibia e in Botswana, ha un basso livello di biodiversità vegetale e di endemismo. La Savana è il bioma più diffuso dell’Africa. I biomi sono influenzati dal clima di una regione e in particolare dalla quantità di precipitazione annua e dalla sua partizione durante l’anno (la quantità durante la stagione secca e la quantità durante la stagione umida). Il Deserto è caratterizzato da una precipitazione annua media di 10 mm ad ovest, 70 o 80 mm nel margine nelle zone interne. Il Succulent Karoo è caratterizzato da una precipitazione compresa tra 20 e 290 mm all’anno. Il Fynbos tende ad occorrere dove la precipitazione è tra i 250 e i 600 mm l’anno. Il Nama Karoo ha una precipitazione che varia tra i 100 e i 520 mm per anno. Nella Savana la precipitazione oscilla tra i 235 e i 1000 mm. La Foresta è caratterizzata da più di 525 mm nella regione di precipitazione invernale e da più di 725 mm nella regione di precipitazione estiva.

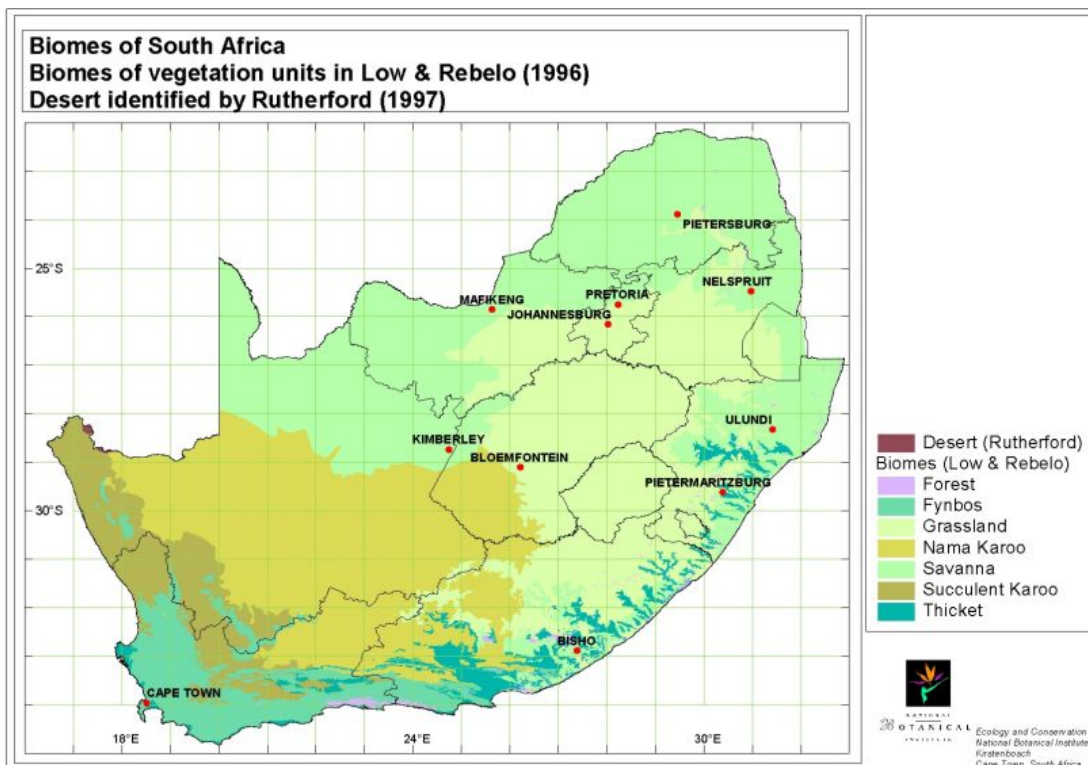


Figura 1.1 Tipologie di bioma in Sud Africa.

Un altro importante impatto della desertificazione è la perdita di capacità produttiva. La desertificazione riduce l’abilità del suolo di supportare attività pastorali e agricole. La riduzione della copertura vegetale che accompagna la desertificazione porta ad accelerare

l'erosione del suolo ad opera del vento e dell'acqua. La parte occidentale del Sud Africa è caratterizzata da limo e sabbia mentre la parte orientale da argilla. Da ciò si nota come le aree coltivate siano soprattutto nella parte orientale del paese in Mpumalanga e in Gauteng. Il mais è la principale coltivazione in Sud Africa, seguita dal frumento, dallo zucchero di canna e dal girasole. Se il Sud Africa diverrà più caldo sotto l'influenza dei cambiamenti climatici globali, probabilmente i suoi ecosistemi aumenteranno la loro propensione alla invasioni da parte di specie tropicali non autoctone. Eventi climatici estremi come le alluvioni inaspriranno il problema, permettendo alle piante invasive di spostarsi verso le aree fluviali. La trasformazione e la frammentazione dell'ecosistema dovuta all'intervento umano tenderanno a promuovere l'ingresso e ad intensificare la diffusione di specie invasive, con impatti negativi molto gravi sulla biodiversità e l'economia del Sud Africa, impatti concentrati su disponibilità idrica, frequenza e distribuzione territoriale degli incendi ed erosione del suolo. L'impatto del cambiamento climatico è probabilmente composto dalla frammentazione dell'habitat e dalla degradazione del suolo, che costringe lo spostamento delle specie, e potrebbe significare che aree che sarebbero state adatte alla migrazione delle specie, sotto il cambiamento delle condizioni climatiche, non sono più in grado di sostenere tali spostamenti.

L'effetto del cambiamento climatico sulla biodiversità e sulla desertificazione è complesso ed ancora non sufficientemente compreso [Millennium Ecosystem Assessment, 2005]. Il cambiamento climatico può influire in modo avverso la biodiversità e inasprire la desertificazione, dovuta all'aumento dell'evapotraspirazione e ad una probabile diminuzione della precipitazione nei suoli aridi. Comunque, poiché l'anidride carbonica è anche una maggiore risorsa per la produzione della pianta, l'efficienza nell'utilizzo dell'acqua migliorerà significativamente per alcune specie di suolo arido, le quali potranno rispondere positivamente a questo aumento. Queste risposte contrastanti tra differenti specie vegetali potrebbero portare a dei cambiamenti nella composizione e nell'abbondanza delle specie con modalità difficile da prevedere, e che richiedono l'uso di modelli e approcci teorici appropriati al fine di fornire valutazioni robuste e affidabili alle autorità che sono chiamate alla gestione delle risorse naturali in Sud Africa.

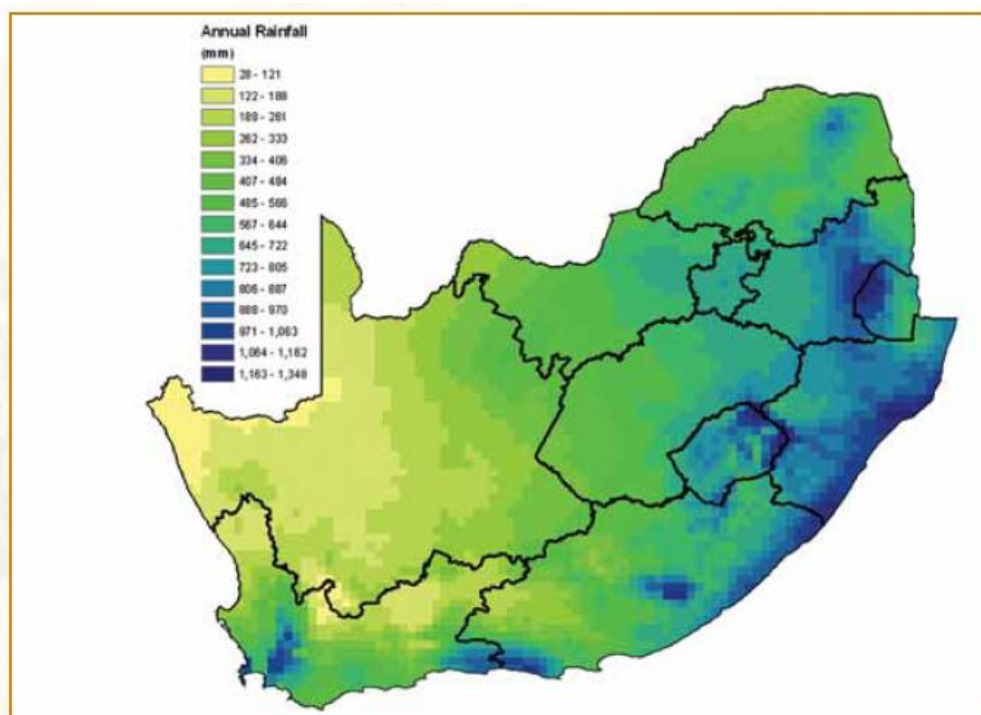


Figura 1.2 Precipitazione annuale media sul Sud Africa per il periodo 1961-1990.

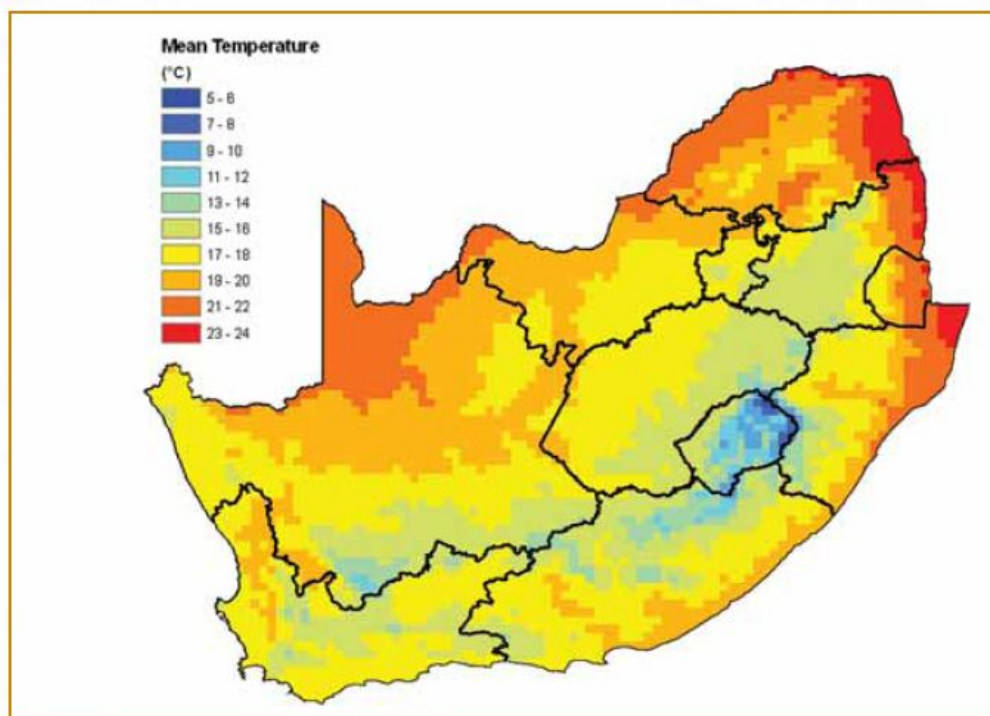


Figura 1.3 Temperatura annuale media sul Sud Africa per il periodo 1961-1990.

1.2 Obiettivo dello studio

L'obiettivo del presente elaborato di laurea è quello di generare serie stagionali di variabili relative alla vegetazione coerenti con quelle dei dati osservati nel territorio del Sud Africa (Figura 1.1) da confrontare poi con i dati di vegetazione media osservati. A tale scopo è stato utilizzato un modello biogeochimico e un modello di dinamica della vegetazione al fine di comprendere quale potesse essere il più utile al nostro studio.

1.3 Articolazione dell'elaborato

Nel Capitolo 2 viene introdotto e descritto il modello climatico *CLM (Community Land Model)*, che rappresenta la componente terrestre del *CAM (Community Atmosphere Model)* e del *CESM (Community Earth System Model)* utilizzato in questo elaborato di tesi. E' descritta una breve storia del modello climatico completo con tutte le sue componenti e ne viene presentata una panoramica. Sono inoltre delineati i requisiti del modello e la sua rappresentazione e parametrizzazione dei vari processi, comprendenti la composizione e la struttura dell'ecosistema, i flussi radiativi, l'idrologia, la resistenza stomatale e il bilancio fotosintetico. Nella parte conclusiva del capitolo è presentato il modello biogeochimico CN e il modello dinamico di vegetazione globale CNDV. Il Capitolo 3 riguarda l'analisi effettuata in questo studio: tre simulazioni *single site* in Sud Africa per tre diverse tipologie di bioma (*savana, prateria e deserto*). Per ognuno dei tre siti si è utilizzato sia il modello biogeochimico CN sia il modello dinamico di vegetazione globale CNDV, per un totale di sei simulazioni *single site*. L'ultimo capitolo è, infine, dedicato alle conclusioni.

CAPITOLO 2

THE COMMUNITY LAND MODEL: CLM

In questo capitolo viene introdotto e descritto il modello CLM preso in considerazione per lo studio in oggetto. Per una descrizione più dettagliata delle parametrizzazioni fisiche e dell'implementazione numerica si rimanda alla guida tecnica “ *Technical Description of version 4.0 of the Community Land Model (CLM)* ” dell' NCAR [Oleson et al., 2010].

2.1 Storia del modello e panoramica

Il *CESM (Community Earth System Model)* è un modello climatico accoppiato che serve a simulare il sistema climatico della Terra. E' costituito da quattro modelli separati che simulano contemporaneamente l'atmosfera, l'oceano, la superficie terrestre e i ghiacciai della Terra, e da una componente centrale (detta *coupler*) che permette di accoppiare i diversi moduli. Il CESM appartiene alla categoria dei *General Circulation Model*, che rappresentano strumenti fondamentali per la ricerca sulle caratteristiche climatiche della Terra nel passato, nel presente e nel futuro.

Il *CCM (Community Climate model)* è stato creato dall' *NCAR (National Center for Atmospheric Research)* nel 1983, come un modello atmosferico globale liberamente disponibile per l'utilizzo da parte della vasta comunità di ricerca climatica. La formulazione del CCM è stata costantemente migliorata nel corso degli ultimi due decenni. La potenza dei computer, sufficiente per far funzionare il modello, è diventata relativamente economica e ampiamente disponibile, e il suo utilizzo si è diffuso nella comunità universitaria e in alcuni laboratori statunitensi ed internazionali. Una limitazione del CCM originale, similmente ad

alti GCM nelle prime formulazioni, era la mancanza di una modellazione esplicita del comportamento degli oceani e della criosfera. Nel 1994, perciò, gli scienziati del NCAR sottomisero un progetto per lo sviluppo del CSM (*Climate System Model*), comprendente una parametrizzazione che doveva includere i modelli dell'atmosfera, della superficie terrestre, degli oceani e della criosfera. In aggiunta, fu adottata una peculiare struttura di gestione e sviluppo del progetto basata sul modello dell'*open-source*, consentendo cioè alla comunità scientifica interessata di avere l'opportunità per partecipare a tutti gli aspetti dello sviluppo del CSM. Nel maggio del 1996, si tenne a Breckenridge, in Colorado, il primo Workshop del CSM, in cui furono presentate le componenti del CSM, i primi risultati di simulazioni climatiche, nonché la natura della futura gestione "aperta" nello sviluppo delle successive generazioni del modello. Il periodo successivo è stato caratterizzato da un sostanziale progresso nell'organizzazione e nello sviluppo sotto la guida di una commissione scientifica costituita allo scopo, che ha portato al rilascio di versioni sempre più complete, che allo stato attuale (25 Giugno 2010) è divenuto CESM 1.0.

Il CLM (*Community Land Model*) è il modello della componente terrestre utilizzato dal CESM e dal CAM (*Community Atmosphere Model*). Si tratta di un progetto di collaborazione tra gli scienziati del TSS (*Terrestrial Sciences Section*) e del CGD (*Climate and Global Dynamics Division*) all' NCAR e del CESM Land Model Working Group. Il modello CLM formalizza e quantifica i concetti di climatologia ecologica. La climatologia ecologica è un framework interdisciplinare per comprendere come i cambiamenti naturali e antropici nella vegetazione influenzano il clima. Il modello esamina i processi fisici, chimici e biologici per mezzo dei quali gli ecosistemi terrestri influenzano e sono influenzati dal clima, attraverso una varietà di scale spaziali e temporali. Il tema centrale è che gli ecosistemi terrestri, per mezzo dei loro cicli di energia, acqua, elementi chimici e gas, sono importanti determinanti del clima. Le componenti del modello consistono in: biogeofisica, ciclo idrologico, biogeochimica e dinamica della vegetazione. La superficie terrestre è rappresentata per mezzo di cinque tipi primari di coperture del suolo (ghiacciai, laghi, paludi, urbanizzato e vegetato) in ogni cella della griglia.

2.1.1 Eterogeneità della superficie e struttura dei dati

Nel CLM l'eterogeneità spaziale della superficie del territorio è rappresentata per mezzo di una gerarchia costituita da una sotto-griglia innestata, nella quale le celle sono composte da diverse unità di territorio, da strati di terreno/neve e da PFT (*Plant Functional Type* o tipi funzionali di pianta) (Figura 2.1). Ogni cella della griglia può avere un differente numero di unità di territorio, ciascuna unità di territorio può avere un numero diverso di strati, e ogni strato può avere molteplici PFT. Il primo livello della sotto-griglia, l'unità di

territorio, ha lo scopo di cogliere i modelli spaziali più ampi che caratterizzano l'eterogeneità del territorio. Le unità comprendono ghiacciai, laghi, paludi, aree urbanizzate e vegetate. Il secondo livello della sotto-griglia, lo strato, intende cogliere la variabilità potenziale nelle variabili di stato del suolo e della neve all'interno di una singola unità di territorio. Ad esempio, l'unità di territorio vegetato potrebbe contenere diversi strati, aventi profili verticali dell'acqua del suolo e della temperatura che evolvono indipendentemente. Seguendo l'esempio utilizzato prima, l'unità di territorio della vegetazione artificiale potrebbe essere divisa in due colonne, irrigata e non-irrigata.

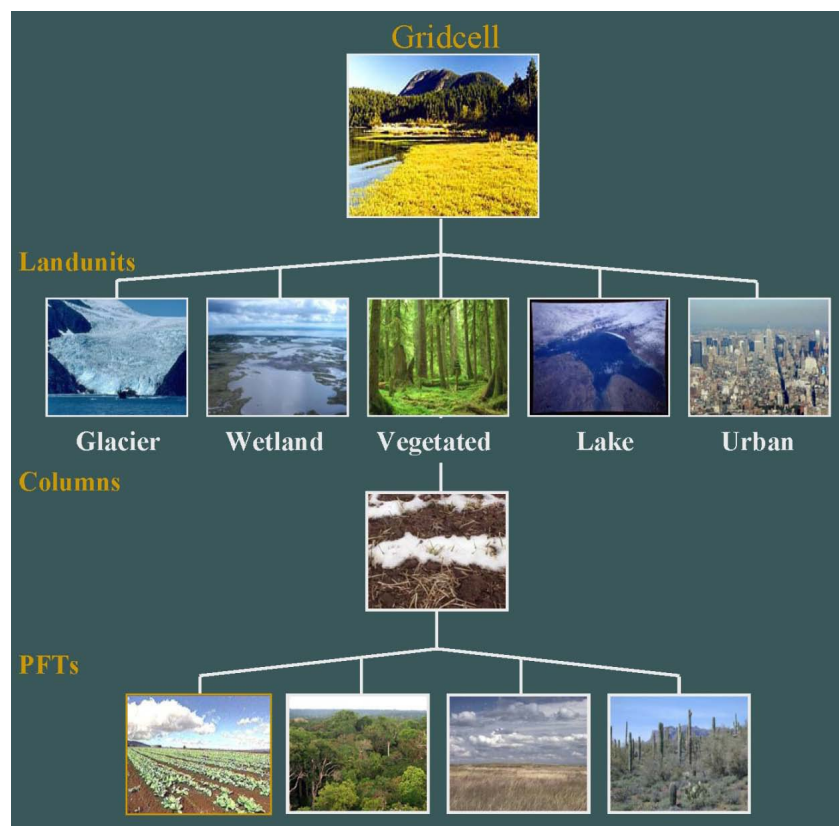


Figura 2.1 Configurazione di default attuale della gerarchia della subgriglia del CLM, che evidenzia l'unità di territorio vegetato.

Lo strato di terreno/neve è rappresentato da quindici livelli per il terreno più cinque livelli per la neve, a seconda della profondità della neve. La caratteristica fondamentale del livello strato della sotto-griglia, è di definire le variabili di stato per l'acqua e l'energia nel suolo e nella neve, come pure i flussi di queste componenti all'interno del terreno e della neve. Indipendentemente dal numero e dal tipo di PFT che occupano lo spazio sullo strato, la fisica dello strato funziona con un singolo set di flussi sui contorni superiori, come pure un singolo

set di flussi per la traspirazione, provenienti da diversi livelli del terreno. Questi flussi di contorno sono pesati come medie su tutti i PFT. Attualmente, è assegnato un singolo strato ad ogni unità di territorio, per il ghiaccio, il lago, la palude, l'urbanizzato e la vegetazione.

Il terzo livello della sotto-griglia è riferito come il livello dei PFT, ed include anche il trattamento per il suolo nudo. Questo livello intende cogliere le differenze biofisiche e biochimiche tra le vaste categorie di piante in termini delle loro caratteristiche funzionali. Su un singolo strato possono coesistere fino a 16 PFT che differiscono nella fisiologia e nella struttura. Tutti i flussi diretti e provenienti dalla superficie sono definiti al livello PFT, come sono le variabili di stato della vegetazione (ad esempio la temperatura della vegetazione e l'immagazzinamento d'acqua della chioma). In aggiunta alle strutture dati delle variabili di stato e di flusso per le componenti conservative, ogni livello della sotto-griglia ha anche una struttura dati di stato fisico, per tenere in conto delle quantità che non sono coinvolte nei controlli della conservazione (variabili diagnostiche). Ad esempio, l'umidità è definita attraverso una variabile di stato fisico al livello dell'unità di territorio, il numero di strati di neve è definito come variabile di stato fisico al livello dello strato, e l'indice dell'area fogliare e della frazione della chioma che è bagnata, sono definite come variabili di stato fisiche al livello PFT. E' da notare come i processi biogeofisici legati al terreno e alla neve richiedano che le proprietà del livello PFT siano aggregate al livello di strato. Ad esempio, il flusso netto di calore nel suolo è richiesto come condizione al contorno per la soluzione delle temperature del terreno/neve. Questa proprietà del livello di strato deve essere determinata aggregando il flusso netto di calore proveniente da tutti i PFT che condividono lo strato, e le proprietà corrispondenti sono calcolate attraverso una somma pesata della quantità desiderata su tutti i PFT, il cui peso dipende dall'area relativa occupata da ciascun tipo funzionale.

2.1.2 Processi biogeofisici

I processi biogeofisici sono simulati per ogni unità di territorio, per ogni strato e per ogni PFT della sotto-griglia indipendentemente, ed ogni unità mantiene le sue variabili prognostiche. La stessa forzante atmosferica è usata per tutte le unità all'interno di una cella. Le variabili della superficie e i flussi richiesti dall'atmosfera, sono ottenuti mediando le quantità della sotto-griglia, pesate rispetto alle relative aree frazionali occupate. I processi simulati includono (Figura 2.2):

- Composizione, struttura e fenologia della vegetazione;
- Assorbimento, riflessione e trasmissione della radiazione solare;
- Assorbimento ed emissione della radiazione a onda lunga;
- Flussi di quantità di moto, di calore sensibile (suolo e chioma) e di calore latente (evaporazione del suolo, evaporazione della chioma, traspirazione);

- Trasferimento di calore nel suolo e nella neve, incluso il cambiamento di fase;
- Idrologia della chioma (intercettazione, *throughfall* e gocciolamento);
- Idrologia della neve (accumulo e scioglimento della neve, compattazione, trasferimento di acqua tra gli strati);
- Idrologia del suolo (ruscellamento superficiale, infiltrazione, redistribuzione dell'acqua all'interno dello strato, drenaggio, interscambio con la falda profonda);
- Fisiologia stomatale e fotosintesi;
- Temperature e flussi dei laghi;
- Deposizione e flussi delle polveri;
- Composti volatili organici;
- Bilancio dell'energia urbana e clima;
- Ciclo del carbonio-azoto;
- Dinamica del cambiamento della copertura del suolo;
- Dinamica della vegetazione.

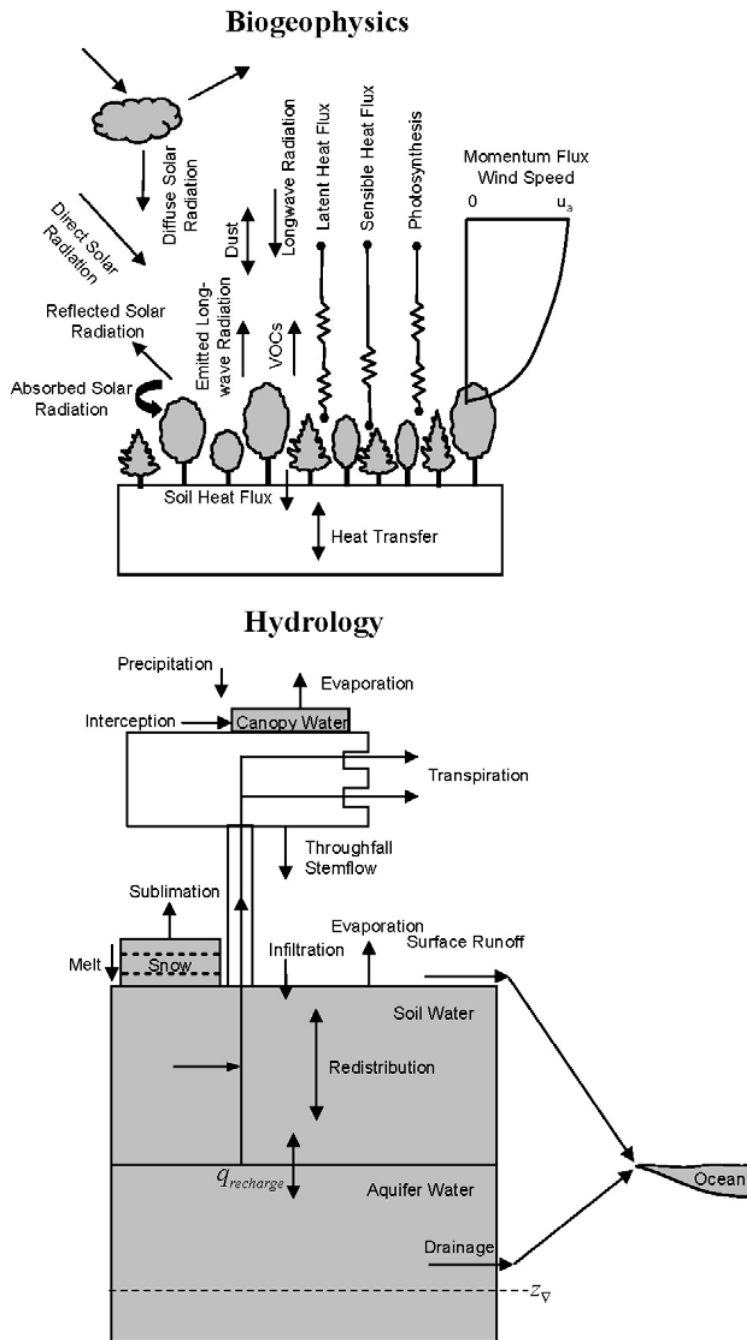


Figura 2.2 Biogeofisica del territorio e processi idrologici simulati dal CLM. La profondità della tavola d'acqua è z_T e il tasso di ricarica dell'acquifero è $q_{recharge}$.

2.2 Requisiti del modello

Il modello CLM per effettuare le simulazioni richiede:

- Accoppiamento atmosferico;
- Inizializzazione;
- Dati superficiali.

2.2.1 Accoppiamento atmosferico

Lo stato attuale dell'atmosfera (Tabella 2.1) ad un dato passo temporale è utilizzato per forzare il CLM. Questo stato atmosferico è fornito dal modello atmosferico nella modalità accoppiata. Il CLM a tal punto inizia un set completo di calcoli per l'energia della superficie, per i costituenti, per la quantità di moto e per i flussi radiativi. I calcoli del modello sono implementati in due passaggi. Il CLM procede con i calcoli dell'energia della superficie, dei costituenti, della quantità di moto e dei flussi radiativi utilizzando gli stati idrologici del suolo e della neve provenienti dal precedente passo temporale. Allora il CLM aggiorna i calcoli dell'idrologia del suolo e della neve basandosi su questi flussi. Questi campi sono inviati all'atmosfera (Tabella 2.2).

Gli albedo inviati all'atmosfera sono quelli per l'angolo zenitale solare al passo temporale successivo, ma con le condizioni della superficie provenienti dal passo temporale corrente.

Nella modalità *offline* (ovvero disaccoppiata da un modello atmosferico), le forzanti atmosferiche richieste dal CLM sono fornite attraverso dei dataset osservati. In questo elaborato si è adottata la modalità *offline*. Il dataset di forzanti standard fornito con il modello comprende 57 anni di osservazioni (1948-2004) ed è descritto in [Qian et al., 2006]. Sono presenti tre flussi: uno relativo alla precipitazione P (mm s^{-1}), uno relativo alla radiazione solare S_{atm} (W m^{-2}), e altri quattro campi [pressione atmosferica P_{atm} (Pa), umidità specifica atmosferica q_{atm} (kg kg^{-1}), temperatura atmosferica T_{atm} (K) e vento atmosferico W_{atm} (m s^{-1})]. Questi tre flussi sono separati perché gestiti in maniera differente a seconda del tipo di campo e di risoluzione temporale alla quale vengono forniti.

Nel dataset utilizzato la precipitazione è fornita ad intervalli di sei ore, e il modello atmosferico adotta un tasso costante all'interno di tale intervallo temporale. La radiazione solare totale è fornita alla stessa risoluzione temporale, mentre in questo caso i dati sono adattati utilizzando una funzione che dipende dall'angolo di zenit solare μ . I restanti quattro campi (pressione, umidità, temperatura e vento), sono forniti ad intervalli di tre ore ed interpolati linearmente al passo temporale del modello.

Tabella 2.1. Input atmosferico al modello CLM.

Reference height	z'_{atm}	m
Zonal wind at z_{atm}	u_{atm}	m s^{-1}
Meridional wind at z_{atm}	v_{atm}	m s^{-1}
Potential temperature	$\overline{\theta}_{atm}$	K
Specific humidity at z_{atm}	q_{atm}	kg kg^{-1}
Pressure at z_{atm}	P_{atm}	Pa
Temperature at z_{atm}	T_{atm}	K
Incident longwave radiation	$L_{atm} \downarrow$	W m^{-2}
Liquid precipitation	q_{rain}	mm s^{-1}
Solid precipitation	q_{sno}	mm s^{-1}
Incident direct beam visible solar radiation	$S_{atm} \downarrow_{vis}^{\mu}$	W m^{-2}
Incident direct beam near-infrared solar radiation	$S_{atm} \downarrow_{nir}^{\mu}$	W m^{-2}
Incident diffuse visible solar radiation	$S_{atm} \downarrow_{vis}$	W m^{-2}
Incident diffuse near-infrared solar radiation	$S_{atm} \downarrow_{nir}$	W m^{-2}
Carbon dioxide (CO ₂) concentration	c_a	ppmv
Aerosol deposition rate	D_{sp}	$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$
Nitrogen deposition rate	NF_{ndep_sminn}	$\text{g(N) m}^{-2} \text{yr}^{-1}$

Tabella 2.2. Output del CLM al modello atmosferico.

Latent heat flux	$\lambda_{vap}E_v + \lambda E_g$	W m ⁻²
Sensible heat flux	$H_v + H_g$	W m ⁻²
Water vapor flux	$E_v + E_g$	mm s ⁻¹
Zonal momentum flux	τ_x	kg m ⁻¹ s ⁻²
Meridional momentum flux	τ_y	kg m ⁻¹ s ⁻²
Emitted longwave radiation	L ↑	W m ⁻²
Direct beam visible albedo	$I \uparrow_{vis}^{\mu}$	-
Direct beam near-infrared albedo	$I \uparrow_{nir}^{\mu}$	-
Diffuse visible albedo	$I \uparrow_{vis}$	-
Diffuse near-infrared albedo	$I \uparrow_{nir}$	-
Absorbed solar radiation	$\frac{\rightarrow}{s}$	W m ⁻²
Radiative temperature	T_{rad}	K
Temperature at 2 meter height	T_{2m}	K
Specific humidity at 2 meter height	q_{2m}	kg kg ⁻¹
Snow water equivalent	W_{sno}	m
Aerodynamic resistance	r_{am}	s m ⁻¹
Friction velocity	u_*	m s ⁻¹
Dust flux	F_j	kg m ⁻² s ⁻¹
Net ecosystem exchange	NEE	kgCO ₂ m ⁻² s ⁻¹

2.2.2 Inizializzazione

L'inizializzazione del CLM dipende dal tipo di simulazione, che può avvenire in modalità *startup* oppure *restart*. La modalità di *startup* adotta condizioni iniziali arbitrarie o fornite dall'utente, mentre nella modalità di *restart* il modello prosegue da una simulazione precedente ed è inizializzato da un file generato al termine di quest'ultima. Nel seguito sono descritte le condizioni arbitrarie che sono state adottate nelle nostre simulazioni.

Le unità di territorio della vegetazione, delle paludi e dei ghiacci hanno quindici livelli verticali, mentre i laghi ne hanno dieci. Per i punti del terreno, i calcoli della temperatura sono eseguiti su tutti gli strati, $N_{levgrnd}=15$, mentre i calcoli dell'idrologia sono eseguiti sui primi dieci strati, $N_{levsoi}=10$, essendo i cinque strati di fondo specificati come roccia impermeabile (*bedrock*).

I punti del terreno sono inizializzati con la temperatura del suolo superficiale T_g e la temperatura dello strato di terreno T_i , con $i=1, \dots, N_{levgrnd}$, di 274 (K); la temperatura della vegetazione T_v di 283 (K); assenza dell'acqua della neve o della chioma ($W_{sno}=0, W_{can}=0$), e il contenuto volumetrico di acqua del suolo $\vartheta=0.3$ ($mm^3 mm^{-3}$) per gli strati $i=1, \dots, N_{levsoi}$ e $\vartheta=0.0$ ($mm^3 mm^{-3}$) per gli strati $i= N_{levsoi} + 1, \dots, N_{levgrnd}$.

Le temperature dei laghi (T_g e T_i) sono inizializzate a 277 (K) e $W_{sno}=0$. Le temperature delle paludi (T_g e T_i) sono inizializzate a 277 (K), $\vartheta=1.0$ ($mm^3 mm^{-3}$) per gli strati $i=1, \dots, N_{levsoi}$ e $\vartheta=0.0$ ($mm^3 mm^{-3}$) per gli strati $i= N_{levsoi} + 1, \dots, N_{levgrnd}$, e $W_{snow}=0$. Tutte le unità del territorio della vegetazione, delle paludi e dei ghiacci, sono inizializzate con un contenuto d'acqua $W_a=W_t=4800$ (mm) (nell'acquifero non confinato e nel terreno non saturo), e con una profondità della falda indicata come $z_{\nabla}=4.8$ (m).

2.2.3 Dati superficiali

I dati superficiali richiesti per ciascuna cella della griglia del territorio sono elencati nella Tabella 2.3 e includono:

- Le porzioni della cella della griglia occupate dai ghiacciai, dai laghi, dalle paludi e dall'urbanizzato (la vegetazione occupa il restante spazio);
- la copertura frazionale di ciascun PFT;
- l'indice di area fogliare, l'indice di area del gambo e le altezze del tetto, dalla chioma e dal fondo, per ogni PFT;
- le caratteristiche del suolo (colore, tessitura e consistenza dei serbatoi di materia organica).

Sono anche richiesti un certo numero di campi per parametri urbani. I campi sono aggregati

alla griglia del modello a partire dai dataset superficiali ad alta risoluzione. Il colore del suolo determina gli albedo del suolo secco e saturo. Il contenuto di sabbia, argilla e di materia organica determina le proprietà termiche ed idrologiche. La massima area saturo frazionale è usata per determinare il ruscellamento superficiale e l'infiltrazione. La percentuale di ciascun PFT è data rispetto alla porzione vegetata della cella della griglia, la somma dei PFT è pari al 100%. La percentuale di laghi, di paludi, di ghiacciai e di urbanizzato alla loro risoluzione di base sono specificate rispetto all'intera griglia della cella. Le procedure di creazione dei dataset superficiali aggiustano le percentuali di PFT per assicurare che la somma di tutti i tipi di copertura del territorio, nella cella della griglia, sia il 100%. Per i laghi, i ghiacciai e le paludi è richiesta una soglia minima pari all'1% dell'area della cella. La soglia minima per le aree urbane è dello 0,1%. Nei dataset superficiali sono anche contenuti il numero di punti di longitudine per la latitudine, la latitudine e la longitudine al centro della cella della griglia, gli orli nord, sud, est ed ovest e l'area di ciascuna cella della griglia. Per una griglia regolare il numero di punti di longitudine dovrebbe essere lo stesso per ciascuna latitudine. La latitudine e la longitudine sono utilizzate per determinare l'angolo di zenit solare. I PFT e le loro abbondanze sono derivate dai dati satellitari MODIS come descritto in . Gli indici di area fogliare dei PFT prescritti sono derivati dai dati satellitari MODIS usando i metodi descritti in [Myneni et al., 2002] e [Lawrence e Chase, 2007]. Gli indici di area del gambo sono derivati dalla fenologia degli indici di area fogliare dei PFT, combinati con i metodi di [Zeng et al., 2002]. Le altezze prescritte del tetto dalla chioma e dal fondo provengono da [Bonan, 1996] e [Bonan et al. 2002]. Se il modello del carbonio-azoto è attivo, esso fornisce gli indici LAI e SAI e le altezze del tetto dalla chioma e dal fondo dinamicamente, e i valori prescritti sono in tal modo ignorati.

Tabella 2.3. Dati superficiali richiesti per il CLM, loro risoluzione spaziale di base e metodo di aggregazione alla griglia del modello.

Campo Superficiale	Risoluzione	Metodo di Aggregazione
Percentuale di ghiacciai	0.5°	Media dell'area
Percentuale di laghi	1°	Media dell'area
Percentuale di paludi	1°	Media dell'area
Percentuale di urbanizzato	0.5°	Media dell'area
Percentuale di sabbia, percentuale di argilla	5'	Unità della mappa con l'area maggiore
Densità della materia organica del suolo	1°	Media dell'area
Colore del suolo	0.5°	Classe di colore con l'area maggiore
Frazione massima di area satura	0.5°	Media dell'area
PFT (percentuale di suolo vegetato)	0.5°	Media dell'area
LAI e SAI mensili	0.5°	Media dell'area
Altezza della chioma (cima, fondo)	0.5°	Media dell'area

2.3 Composizione e struttura dell'ecosistema

Le superfici vegetate comprendono fino a 15 possibili PFT più il suolo nudo (Tabella 2.4). Questi tipi di piante differiscono nelle proprietà ottiche delle foglie e dei gambi che determinano la riflessione, la trasmissione e l'assorbimento della radiazione solare, nei parametri della distribuzione delle radici, che controllano il prelievo di acqua dal terreno, nei parametri aerodinamici, che determinano la resistenza al trasferimento di calore, di umidità e di quantità di moto e nei parametri fotosintetici, che determinano la resistenza stomatica, la fotosintesi e la traspirazione. La composizione e l'abbondanza dei PFT all'interno di una cella della griglia, possono essere invariati oppure evolvere nel tempo, e in questo caso tale evoluzione può essere prescritta o calcolata prognosticamente tramite il modello di dinamica della vegetazione.

La struttura della vegetazione è definita per mezzo degli indici di area fogliare e di gambo (L, S) e per mezzo delle altezze del tetto dalla chioma e dal fondo (Z_{top} e Z_{bot}) (Tabella 2.5).

Per ogni PFT sono prescritti differenti indici L ed S e differenti altezze, ottenuti tramite interpolazione spaziale e temporale di osservazioni satellitari a cadenza mensile [Bonan et al., 2002].

Gli indici di area fogliare LAI e di area del gambo SAI (m^2 / m^2) sono aggiornati giornalmente per mezzo di una interpolazione lineare tra i valori mensili. I valori mensili dell'indice di area fogliare dei PFT sono stati sviluppati dai dati mensili alla risoluzione di 1 km derivati da MODIS, eseguendo la media dell'indice LAI sulla cella della griglia [Myneni et al., 2002], così come descritto da [Lawrence e Chase, 2007]. L'indice di area del gambo SAI è calcolato a partire dall'indice mensile LAI dei PFT utilizzando i metodi di [Zeng et al., 2002].

Tabella 2.4. Tipi funzionali di piante (PFT).

Needleleaf evergreen tree-temperate	NET Temperate
Needleleaf evergreen tree-boreal	NET Boreal
Needleleaf deciduous tree-boreal	NDT Boreal
Broadleaf evergreen tree-tropical	BET Tropical
Broadleaf evergreen tree-temperate	BET Temperate
Broadleaf deciduos tree-tropical	BDT Tropical
Broadleaf deciduos tree-temperate	BDT Temperate
Broadleaf deciduos tree-boreal	BDT Boreal
Broadleaf evergreen shrub-temperate	BES Temperate
Broadleaf deciduos shrub-temperate	BDS Temperate
Broadleaf evergreen shrub-boreal	BDS Boreal
C ₃ arctic grass	-
C ₃ grass	-
C ₄ grass	-
Crop	-

Tabella 2.5. Altezze dei tipi funzionali di piante (PFT).

<i>PFT</i>	z_{top} (m)	z_{bot} (m)
NET temperate	17	8.5
NET boreal	17	8.5
NDT boreal	14	7
BET tropical	35	1
BET temperate	35	1
BDT tropical	18	10
BDT temperate	20	11.5
BDT boreal	20	11.5
BES temperate	0.5	0.1
BDS temperate	0.5	0.1
BDS boreal	0.5	0.1
C3 arctic grass	0.5	0.01
C3 grass	0.5	0.01
C4 grass	0.5	0.01
Crop	0.5	0.01

2.4 Flussi radiativi

La radiazione netta alla superficie è

$$(\overline{S}_v + \overline{S}_g) - (\overline{L}_v + \overline{L}_g) \quad (2.1)$$

dove \vec{S} rappresenta il flusso solare netto assorbito dalla vegetazione (“v”) e dal suolo (“g”), e \vec{L} rappresenta il flusso ad onde lunghe netto (positivo verso l’atmosfera), in (W m^{-2}).

2.5 Flussi di calore sensibile e di calore latente

Questi flussi sono derivati a partire dalla teoria della similarità di Monin-Obukhov, sviluppata per il livello superficiale, e di cui è fornita una descrizione dettagliata nella guida tecnica del modello CLM. In questo elaborato ci si è limitati soltanto a richiamare le formulazioni dei fenomeni ritenute più importanti. Per i calcoli dei flussi, le superfici sono considerate (dal modello) non-vegetate se vale la condizione

$$L + S < 0.05 \quad (2.2)$$

dove con L ed S si è indicato rispettivamente il LAI e il SAI. Per definizione queste superfici includono il suolo nudo, le paludi e i ghiacciai.

Nel caso di una superficie vegetata, il flusso di calore sensibile H e il flusso di vapore d’acqua E , sono divisi nei flussi verso la vegetazione e verso il suolo. Questi dipendono dalle temperature della vegetazione T_v e del suolo T_g , in aggiunta alla temperatura della superficie T_s e all’umidità specifica q_s . A causa dell’accoppiamento tra la temperatura della vegetazione e i flussi, è utilizzata un’iterazione del tipo Newton-Raphson, per risolvere contemporaneamente la temperatura della vegetazione e i flussi di calore sensibile e di vapore d’acqua provenienti dalla vegetazione stessa. Quest’iterazione viene effettuata con la temperatura del suolo del passo temporale precedente.

Si assume che l’aria all’interno della chioma abbia una capacità trascurabile di immagazzinare calore, cosicché il flusso di calore sensibile H tra la superficie e l’atmosfera deve essere bilanciato dalla somma del calore sensibile proveniente dalla vegetazione H_v e da quello proveniente dal suolo H_g

$$H = H_v + H_g \quad (2.3)$$

I vari termini assumono la seguente formulazione:

$$H = -\rho_{atm} C_p \frac{(\theta_{atm} - T_s)}{r_{ah}} \quad (2.4)$$

$$H_v = -\rho_{atm} C_p (T_s - T_v) \frac{L+S}{r_b} \quad (2.5)$$

$$H_g = -\rho_{atm} C_p \frac{(T_s - T_g)}{r'_{ah}} \quad (2.6)$$

dove ρ_{atm} è la densità dell'aria atmosferica (kg m^{-3}), C_p è la capacità di calore specifico dell'aria ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$), θ_{atm} è la temperatura potenziale atmosferica (K), r_{ah} è la resistenza aerodinamica al trasferimento di calore sensibile (s m^{-1}).

Qui T_s rappresenta la temperatura superficiale, L ed S gli indici LAI e SAI, r_b la resistenza della foglia al livello del contorno, r'_{ah} la resistenza aerodinamica al trasferimento di calore tra il suolo e l'aria della chioma.

Allo stesso modo, si ipotizza che l'aria all'interno della chioma abbia una capacità trascurabile di immagazzinare vapore d'acqua, il cui flusso risulta essere

$$E = E_v + E_g \quad (2.7)$$

con

$$E = -\rho_{atm} \frac{(q_{atm} - q_s)}{r_{aw}} \quad (2.8)$$

$$E_v = -\rho_{atm} \frac{q_s - q_{sat}^{T_v}}{r_{total}} \quad (2.9)$$

$$E_g = -\rho_{atm} \frac{\beta_{soi}(q_s - q_g)}{r'_{aw} + r_{litter}} \quad (2.10)$$

dove q_{atm} è l'umidità specifica atmosferica (kg kg^{-1}), r_{aw} la resistenza aerodinamica al trasferimento di vapore d'acqua (s m^{-1}), $q_{sat}^{T_v}$ (kg kg^{-1}) l'umidità specifica di vapore d'acqua alla saturazione alla temperatura della vegetazione, q_g l'umidità specifica alla superficie del terreno, r'_{aw} la resistenza aerodinamica (s m^{-1}) al trasferimento di vapore d'acqua tra il terreno e l'aria della chioma, β_{soi} una funzione empirica dell'acqua del terreno, r_{litter} la resistenza per il livello di lettiera della pianta (s m^{-1}). r_{total} rappresenta la resistenza totale al trasferimento di vapore d'acqua dalla chioma verso l'aria della chioma, ed include i contributi provenienti dal livello della foglia e le resistenze stomatale delle superfici soleggiate e ombreggiate, rispettivamente r_b , r_s^{sun} r_s^{sha} .

Infine il flusso di vapore d'acqua proveniente dalla vegetazione è la somma del flusso di vapore d'acqua da parte dell'area bagnata della foglia e del gambo, E_v^w (l'evaporazione

dell'acqua intercettata dalla chioma), e della traspirazione da parte delle superfici secche della foglia, E_v^t

$$E_v = E_v^w + E_v^t \quad (2.11)$$

2.6 Temperature del terreno e della neve

L'equazione di seguito riportata, rappresenta la seconda legge di conduzione del calore nella forma mono-dimensionale

$$c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right] \quad (2.12)$$

dove c è la capacità volumetrica di calore del/della terreno/neve ($\text{J m}^{-3} \text{K}^{-1}$), t è il tempo (s), T la temperatura (K), z è la direzione verticale (m) definita positiva verso il basso, λ è la conduttività termica ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$).

Questa equazione è risolta numericamente per calcolare le temperature del terreno e della neve, per uno strato di suolo costituito da quindici livelli e uno strato di neve costituito da cinque livelli. Come condizioni al contorno sono prese: h come il flusso di calore proveniente dall'atmosfera soprastante dentro il livello superficiale di terreno/neve, e un flusso di calore nullo sul fondo dello strato di terreno. Il profilo di temperatura è calcolato dapprima senza considerare il cambiamento di fase, e in seguito riaggiustato per il cambiamento di fase.

2.7 Idrologia

Il modello parametrizza l'intercettazione, il *throughfall*, il gocciolamento dalla chioma (*canopy drip*), l'accumulo e lo scioglimento della neve, il trasferimento dell'acqua tra gli strati di neve, l'infiltrazione, l'evaporazione, il ruscellamento superficiale, il drenaggio subsuperficiale, la redistribuzione all'interno dello strato di terreno, la portata e la ricarica sotterranea per simulare i cambiamenti nell'acqua della chioma ΔW_{can} , nell'acqua della neve ΔW_{a} , nell'acqua del terreno $\Delta W_{\text{liq},i}$ e nel ghiaccio del terreno $\Delta W_{\text{ice},i}$ ed infine l'acqua nell'acquifero non confinato. Tutte queste grandezze sono espresse in kg m^{-2} oppure in mm di H_2O .

Il bilancio d'acqua totale del sistema è dato da

$$\Delta W_{can} + \Delta W_{sno} + \sum_{i=1}^{N_{levsoi}} (\Delta w_{liq,i} + \Delta w_{ice,i}) + \Delta W_a = \begin{pmatrix} q_{rain} + q_{sno} - E_v - E_g - q_{over} \\ -q_{drai} - q_{rgwl} - q_{snwcp,ice} \end{pmatrix} \Delta t \quad (2.13)$$

dove q_{rain} è la parte liquida della precipitazione, q_{snow} è la parte solida della precipitazione, E_v è l'evaporazione da parte della vegetazione ed E_g è l'evaporazione del terreno, q_{over} è il ruscellamento superficiale, q_{drai} è il drenaggio subsuperficiale, q_{rgwl} e $q_{snwcp,ice}$ sono il ruscellamento liquido e solido proveniente dai ghiacciai, dalle paludi e dai laghi (tutti in $\text{kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), N_{levsoi} è il numero dei livelli idrologicamente attivi di terreno, Δt è l'intervallo temporale.

I calcoli idrologici sono effettuati soltanto sui livelli di terreno che vanno da 1 a N_{levsoi} . I livelli di terreno che vanno da $N_{levsoi+1}$ a $N_{levgrnd}$ sono considerati idrologicamente inattivi.

2.7.1 Acqua della chioma

La precipitazione o è intercettata dalla chioma, cade direttamente verso la superficie del/della terreno/neve (*throughfall*), oppure gocciola dalla vegetazione (*canopy drip*).

Nella Figura 2.3 le frecce gialle rappresentano il *throughfall*, le frecce rosse lo *stemflow* (ovvero il processo che dirige la precipitazione giù dai rami della pianta e dal gambo), e le frecce in viola indicano il *canopy drip*.

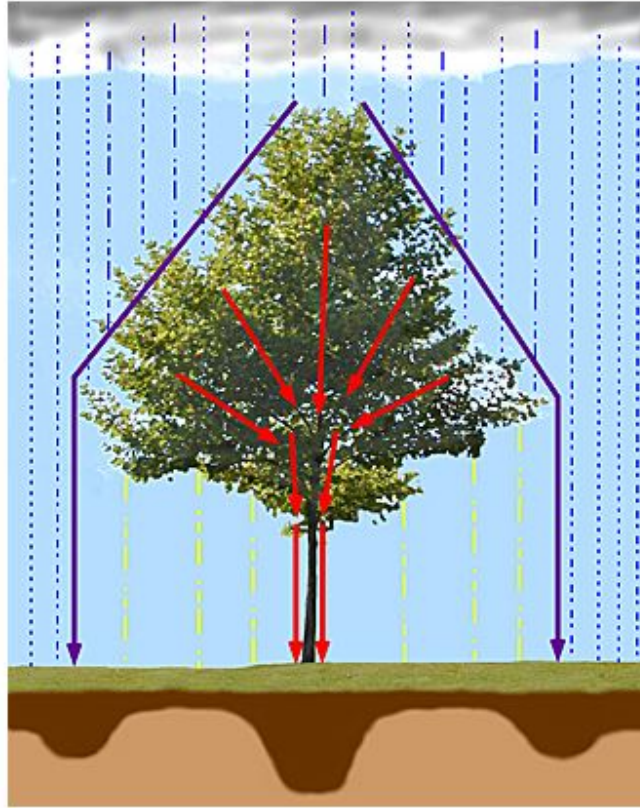


Figura 2.3 Modifica della precipitazione da parte della vegetazione.

L'intercettazione ad opera della vegetazione, q_{intr} ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$), non distingue tra le fasi liquida e solida

$$q_{intr} = \alpha(q_{rain} + q_{snow})\{1 - \exp[-0.5(L + S)]\} \quad (2.14)$$

dove L ed S sono rispettivamente gli indici LAI e SAI, mentre $\alpha=0.25$ scala l'intercettazione dal punto alla cella della griglia.

Il *throughfall* ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$), tuttavia, è diviso nelle fasi liquida e solida, che raggiungono il suolo (o la neve) come

$$q_{thru,liq} = q_{rain}[1 - \alpha\{1 - \exp[-0.5(L + S)]\}] \quad (2.15)$$

$$q_{thru,ice} = q_{snow}[1 - \alpha\{1 - \exp[-0.5(L + S)]\}] \quad (2.16)$$

Allo stesso modo il canopy drip è

$$q_{drip,liq} = \frac{W_{can}^{intr} - W_{can,max}}{\Delta t} \frac{q_{rain}}{q_{rain} + q_{sno}} \geq 0 \quad (2.17)$$

$$q_{drip,ice} = \frac{W_{can}^{intr} - W_{can,max}}{\Delta t} \frac{q_{sno}}{q_{rain} + q_{sno}} \geq 0 \quad (2.18)$$

dove

$$W_{can}^{intr} = W_{can}^n + q_{intr} \Delta t \geq 0 \quad (2.19)$$

rappresenta l'acqua della chioma dopo aver considerato l'intercettazione.

Si è indicato con W_{can}^n l'acqua della chioma proveniente dal passo temporale precedente, e con $W_{can,max}$ (kg m⁻²) la massima quantità d'acqua che la chioma può trattenere

$$W_{can,max} = p(L + S) \quad (2.20)$$

con $p = 0.1$ (kg m⁻²). Il massimo immagazzinamento dell'acqua solida è assunto essere lo stesso dell'acqua liquida.

L'acqua della chioma è aggiornata come

$$W_{can}^{n+1} = W_{can}^n + q_{intr} \Delta t - (q_{drip,liq} + q_{drip,ice}) \Delta t - E_v^w \Delta t \geq 0 \quad (2.21)$$

dove E_v^w è il flusso di vapore acqueo proveniente dalle superfici del gambo e della foglia.

Il tasso totale della precipitazione liquida e solida che raggiunge il suolo è quindi

$$q_{grnd,liq} = q_{thru,liq} + q_{drip,liq} \quad (2.22)$$

$$q_{grnd,ice} = q_{thru,ice} + q_{drip,ice} \quad (2.23)$$

La precipitazione solida, $q_{grnd,ice} \Delta t$, che giunge al suolo o alla superficie della neve, è aggiunta subito allo strato di neve. La parte liquida, $q_{grnd,liq} \Delta t$, è aggiunta dopo che sono stati determinati i flussi superficiali e le temperature del terreno (o della neve se presente).

La frazione bagnata della chioma (gambi più foglie), che è richiesta per l'albedo superficiale e per i calcoli del flusso superficiale, è

$$f_{wet} = \left\{ \begin{array}{ll} \left[\frac{W_{can}}{p(L+S)} \right]^{2/3} \leq 1 & L + S > 0 \\ 0 & L + S = 0 \end{array} \right\} \quad (2.24)$$

mentre la frazione della chioma che è secca e che traspira è data dalla seguente formula.

$$f_{dry} = \left\{ \begin{array}{ll} \frac{(1-f_{wet})L}{L+S} & L + S > 0 \\ 0 & L + S = 0 \end{array} \right\} \quad (2.25)$$

2.7.2 Ruscellamento superficiale ed infiltrazione

Per parametrizzare il ruscellamento, è implementato il semplice modello di ruscellamento (SIMTOP) descritto da [Niu et al., 2005] basato sul TOPMODEL [Beven e Kirkby, 1979]. Un concetto chiave per comprendere questo approccio è quello della frazione di area satura/impermeabile f_{sat} che è determinata dalle caratteristiche topografiche e dallo stato di umidità del terreno di una cella della griglia. Il ruscellamento superficiale consiste in un flusso sul terreno dovuto ai meccanismi di eccesso di saturazione (ruscellamento di Dunne), e all'infiltrazione in eccesso (ruscellamento Hortoniano)

$$q_{over} = f_{sat}q_{liq,0} + (1 - f_{sat})\max(0, q_{liq,0} - q_{infl,max}) \quad (2.26)$$

dove $q_{liq,0}$ è la precipitazione liquida che giunge al suolo più eventuale acqua proveniente dallo scioglimento della neve ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$), e $q_{infl,max}$ è una capacità massima di infiltrazione del terreno ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$).

2.7.3 Acqua del suolo e proprietà idrauliche

L'acqua del suolo è predetta a partire da un modello multi-strato, nel quale il trasporto verticale dell'umidità del suolo è governato dall'infiltrazione, dal ruscellamento superficiale e subsuperficiale, dalla diffusione del gradiente, dalla gravità, dalla traspirazione della chioma per mezzo dell'estrazione della radice e dalle interazioni con l'acqua sotterranea.

Per un flusso verticale monodimensionale nei terreni, la conservazione della massa è data come

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\partial q}{\partial z} - Q \quad (2.27)$$

dove θ è il contenuto volumetrico di acqua nel suolo (mm^3 di acqua mm^{-3} di suolo), t è il tempo (s), z è l'altezza (positiva verso l'alto) sopra qualche dato nello strato di terreno (mm),

q è il flusso d'acqua del terreno ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ oppure mm s^{-1}), positivo verso l'alto, ed infine Q un termine di perdita per l'umidità del suolo ($\text{mm di acqua mm}^{-1} \text{ di suolo s}^{-1}$).

Questa equazione è risolta numericamente dividendo lo strato di terreno in diversi livelli verticali, ed integrando verso il basso su ciascun livello. Si considera q_{infl} come condizione al contorno superiore, per il flusso di infiltrazione all'interno del livello di terreno in cima. Come condizione al contorno inferiore viene specificato un flusso nullo.

Il flusso d'acqua nel terreno dell'equazione (2.27) può essere descritto per mezzo della legge di Darcy

$$q = -k \frac{\partial \Psi_h}{\partial z} \quad (2.28)$$

dove con k si è indicata la conduttività idraulica (mm s^{-1}), e con Ψ_h il potenziale idraulico (mm). La conduttività idraulica k_i (mm s^{-1}) e il potenziale della matrice del suolo Ψ_i (mm) per un livello i , varia con il contenuto volumetrico di acqua del terreno θ_i e con la tessitura del suolo. Come per le proprietà termiche del suolo, anche le proprietà idrauliche del suolo si assume che siano una combinazione pesata delle proprietà minerali, le quali sono determinate in accordo con i contenuti di sabbia e di argilla.

2.7.4 Interazioni tra acqua sotterranea e acqua del suolo

Il drenaggio o il ruscellamento subsuperficiale è basato sullo schema SIMTOP [Niu et al., 2005] con una modifica per tenere in considerazione il drenaggio ridotto nei terreni ghiacciati.

$$q_{drai} = (1 - f_{imp}) q_{drai,max} \exp(-f_{drai} z_v) \quad (2.29)$$

Nella (2.28) compare il termine moltiplicativo $(1 - f_{imp})$ che invece non è presente nella formulazione originale. f_{imp} è la frazione di area impermeabile determinata dal contenuto di ghiaccio nei livelli del terreno che interagiscono con la tavola d'acqua. La determinazione della tavola d'acqua z_v (espressa qui in m), si basa sul lavoro di [Niu et al., 2007]. In questo approccio, è aggiunta una componente sotterranea sotto forma di un acquifero non confinato, che giace al di sotto dello strato di terreno.

2.8 Resistenza stomatale e fotosintesi

La resistenza stomatale della foglia, che è necessaria per il flusso di vapore acqueo, è accoppiata alla fotosintesi in un modo simile a quello adottato da [Collatz et al., 1991; Collatz et al., 1992]. Queste equazioni sono risolte per le foglie esposte al sole e per le foglie all'ombra, utilizzando la media della radiazione attiva assorbita fotosinteticamente (Φ^{sun} e Φ^{sha} , espresse in $W m^{-2}$). In tal modo si ricavano la resistenza stomatale della foglia esposta al sole e della foglia all'ombra (r_s^{sun}, r_s^{sha} in $s m^{-1}$), e la fotosintesi (A^{sun}, A^{sha} in $\mu mol CO_2 m^{-2} s^{-1}$). La fotosintesi della chioma è

$$A^{sun} L^{sun} + A^{sha} L^{sha} \quad (2.30)$$

dove L^{sun} e L^{sha} sono gli indici di area fogliare esposta al sole e all'ombra.

La conduttanza della chioma allora è data da

$$\frac{1}{r_s^{sun}} L^{sun} + \frac{1}{r_s^{sha}} L^{sha} \quad (2.31)$$

2.9 Modello biogeochimico CN

2.9.1 Descrizione del modello

Il CLM include un trattamento pienamente prognostico dei cicli terrestri del carbonio e dell'azoto, a cui ci si riferisce comunemente come *CN*, includendo le interazioni tra questi cicli come mediate da parte dei meccanismi biologici delle piante e degli eterotrofi del terreno. Questo modello biogeochimico del territorio è stato inizialmente sviluppato dall'unione del framework del CLM 3.0 (Community Land Model) [Bonan e Levis, 2006; Dickinson et al. 2006, Oleson et al. 2004] con la dinamica del carbonio e dell'azoto pienamente prognostica del modello biogeochimico terrestre *Biome-BGC (versione 4.1.2)* [Thornton et al. 2002; Thornton e Rosenbloom, 2005]. Il modello risultante è pienamente prognostico rispetto a tutte le variabili di stato del carbonio e dell'azoto nella vegetazione, nella lettiera e nella materia organica del suolo. Considera tutte le quantità prognostiche per l'acqua e l'energia nello strato di vegetazione-neve-terreno. Il periodo stagionale della crescita della nuova vegetazione e della caduta sulla lettiera è anche prognostico, rispondendo alla temperatura del terreno e dell'aria, alla disponibilità di acqua nel terreno, e

alla lunghezza del giorno, in gradi differenti che dipendono dal tipo di fenologia specifico di ciascun PFT.

Il LAI, il SAI e le altezze della vegetazione sono utilizzate dal modello biofisico.

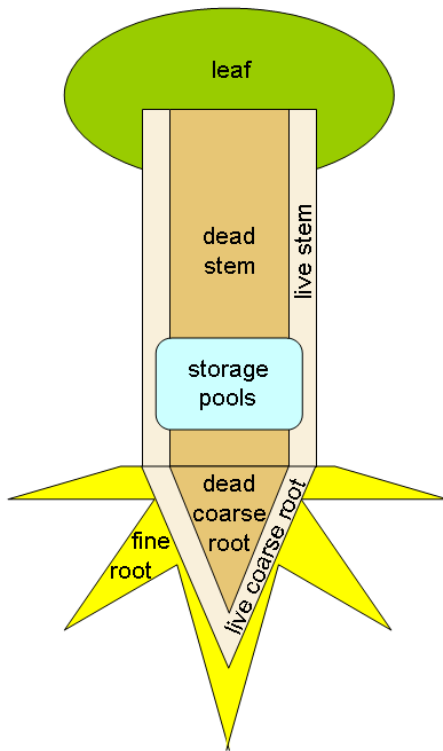
2.9.2 Variabili di stato della vegetazione

Il modello include un trattamento prognostico per le variabili di stato del carbonio e dell'azoto, in diversi tipi di tessuto della vegetazione. Sono tracciate variabili di stato separate per il carbonio e per l'azoto per quanto riguarda i serbatoi della foglia, del gambo vivente, del gambo non vivente, delle radici spesse viventi, delle radici spesse non viventi e delle radici sottili (Figura 2.4).

Ciascuno di questi serbatoi possiede due serbatoi di immagazzinamento che rappresentano, rispettivamente, l'immagazzinamento di breve-termine e di lungo-termine dei carboidrati non-strutturali e dell'azoto labile. Sono presenti inoltre due serbatoi aggiuntivi, uno per l'immagazzinamento delle riserve della respirazione che servono alla crescita, e l'altro usato per incontrare la domanda in eccesso (utile per il mantenimento della respirazione durante i periodi caratterizzati da bassa fotosintesi). Un serbatoio aggiuntivo di azoto traccia l'azoto che si trasferisce, mobilizzato prima dal tessuto della foglia verso l'escissione e la lettiera.

Nell'insieme ci sono 20 variabili di stato per il carbonio della vegetazione, e 19 per l'azoto della vegetazione. L'integrazione e la fotosintesi della chioma sono gli stessi del modello biofisico.

La fotosintesi al livello della chioma (oppure la produzione primaria netta, *GPP*) è ottenuta sommando i tassi della foglia esposta al sole e all'ombra, scalati dagli indici di area fogliare soleggiata ed ombreggiata, con delle riduzioni potenziali dovute alla disponibilità dell' azoto minerale.



CLM vegetation state variables (pools):

C and N pools for each tissue (structural pools):

- Leaf
- Stem (live and dead)
- Coarse root (live and dead)
- Fine root

Each structural pool has two corresponding storage pools:

- Long-term storage (> 1 yr)
- Short-term storage (< 1 yr)

Additional pools:

- Growth respiration storage (C)
- Maintenance respiration reserve (C)
- Retranslocated nitrogen

Total number of pools...

Carbon: $6 + 12 + 2 = 20$

Nitrogen: $6 + 12 + 1 = 19$

Figura 2.4 Serbatoi del carbonio e dell'azoto.

2.9.3 Respirazione autotrofa ed eterotrofa

Il modello tratta separatamente i processi di mantenimento e di crescita della respirazione.

Per la biomassa vivente il mantenimento della respirazione (*MR*) è una funzione della temperatura e della concentrazione di azoto nel tessuto (ad esclusione dei serbatoi per il gambo non-vivente e per le radici spesse). I tassi per i serbatoi sul terreno si basano sulla temperatura dell'aria a 2 metri di altezza, mentre quelli per i serbatoi sotto il terreno dipendono dalla distribuzione frazionata delle radici al variare della profondità e dalle temperature del terreno prognostiche associate. La respirazione per la crescita è calcolata come un fattore di 0.3 volte il carbonio totale destinato alla nuova crescita a un dato passo temporale, basato sui costi di costruzione dei tessuti legnosi e non-legnosi.

Il modello include gli stati del carbonio e dell'azoto per i tre serbatoi relativi alla lettiera, per quelli relativi alla materia organica del suolo e per un serbatoio di detriti legnosi, strutturati in cascata. Le fasi nel processo di decomposizione, che conducono alla mineralizzazione dell'azoto, procedono ai loro tassi potenziali (limitati dall'acqua e dalla temperatura), mentre quelle che conducono all'immobilizzazione dell'azoto minerale possono essere limitate dalla

sua disponibilità. La richiesta totale eterotrofa per l'azoto minerale è espressa come somma dell'immobilizzazione potenziale (calcolata per ogni fase nella cascata). Per ogni passo temporale, questa richiesta eterotrofa è in competizione con la domanda totale di azoto della pianta, proveniente da tutti i PFT che condividono lo spazio su un singolo strato di terreno. Una volta terminata questa competizione, l'immobilizzazione attuale è calcolata come una parte dell'immobilizzazione potenziale. Quest'ultima è applicata nella stessa misura durante tutti i passi dell'immobilizzazione.

2.9.4 Allocazione del carbonio e dell'azoto

Ad ogni passo temporale del modello e per ogni PFT che condivide lo spazio su uno strato di terreno, il carbonio disponibile per l'allocazione alla nuova crescita (C_{AVAIL}) è calcolato come

$$C_{AVAIL} = GPP - MR \quad (2.32)$$

Se $MR \geq GPP$, ad esempio di notte o sotto condizioni di luce bassa o di stress per siccità, allora tutto il prodotto della fotosintesi attuale è diretto verso il soddisfacimento di MR, e $C_{AVAIL} = 0$. Qualsiasi richiesta di MR che rimane è soddisfatta aggiungendo un serbatoio di immagazzinamento speciale (MR_{POOL}), rappresentante la riserva disponibile.

Diversamente ($C_{AVAIL} > 0$) la prima priorità per la nuova allocazione è di ridurre qualsiasi deficit che potrebbe essersi accumulato in MR_{POOL} nei precedenti passi temporali (ad un tasso che potrebbe eliminare il deficit corrente in 30 giorni). Il rimanente carbonio è disponibile per l'allocazione utile alla crescita di nuove piante.

La richiesta totale di azoto della pianta al passo temporale è calcolata dall'allometria del carbonio e dalle concentrazioni di azoto per ciascun tipo di tessuto (specificato dal PFT). Le concentrazioni di azoto al livello del tessuto (ad esempio la concentrazione di azoto nella foglia) sono specificate come costanti che variano tra i PFT. Questa richiesta è compensata dalla distribuzione dell'azoto, trasferito dalle foglie senescenti verso un serbatoio di immagazzinamento, nei passi temporali precedenti. La distribuzione da questo serbatoio avviene ad un tasso proporzionale alla dimensione del serbatoio e alla domanda attuale di azoto. Per calcolare la competizione, basata sulla domanda, tra il prelievo della pianta e l'immobilizzazione microbica, la restante richiesta di azoto è sommata su tutti i PFT. Questo avviene per una risorsa di azoto minerale del suolo potenzialmente limitante al livello dello strato. La richiesta di azoto non soddisfatta da parte della pianta è convertita in un deficit di carbonio eliminato attraverso la riduzione della GPP. In tal modo viene rappresentata la regolazione del tasso fotosintetico in caso di limitazione dell'azoto.

L'effetto indiretto di limitazione dell'azoto sulla cattura della luce per la riduzione dell'allocatione alla nuova crescita, rappresenta un altro significativo meccanismo di regolazione nel modello. Quest'ultimo opera su lunghe scale temporali e ha una forte influenza sugli stati e sui flussi del sistema pianta-terreno a scala globale. Una frazione del carbonio e dell'azoto allocata ad ogni passo temporale è immagazzinata ed esposta come nuova crescita nell'anno successivo. Tale frazione è specificata come un singolo valore per ciascun PFT e il tempo di esposizione del carbonio e dell'azoto immagazzinato è controllato dagli algoritmi della fenologia. Il trasferimento del carbonio e dell'azoto precedentemente allocati dall'immagazzinamento all'esposizione per la nuova crescita, rappresenta il meccanismo per cui la vegetazione sempre decidua è in grado di avviare in anticipo la crescita. Tutti i PFT decidui hanno una crescita di immagazzinamento impostata al 50%. Il meccanismo è meno critico per la vegetazione sempreverde, e qui il valore della crescita di immagazzinamento è impostato a 0% per tutti i PFT che condividono questa strategia.

Il modello non impone nessun vincolo fisso per quanto riguarda gli accumuli massimi o minimi di carbonio e azoto nelle foglie o negli altri tessuti. Le dimensioni del serbatoio di carbonio e di azoto della vegetazione ad uno stato stabile sono determinati dall'equilibrio dinamico tra la nuova crescita, la caduta sulla lettiera, la mortalità e le perdite dovute agli incendi. Nei casi dove la combinazione del clima e la parametrizzazione ecofisiologica della pianta non consentano una crescita netta, i serbatoi di carbonio e azoto della vegetazione sono trasferiti completamente alla lettiera. Per combinazioni di clima e di PFT con un potenziale di crescita molto forte, l'accumulo del carbonio della foglia conduce a un indice di area fogliare che limita la penetrazione della luce e il tasso medio fotosintetico nella frazione della chioma ombrosa. In tal modo ne rallenta la crescita e pone un limite superiore meccanicistico a quella nuova.

2.9.5 Fenologia e struttura della vegetazione

Il periodo stagionale della crescita della nuova vegetazione e della caduta sulla lettiera è prognostico, in risposta alla temperatura del terreno e dell'aria, alla disponibilità di acqua nel suolo e alla lunghezza del giorno. Questo è vero in vari gradi che dipendono dal tipo di fenologia specifica per ciascun PFT. Sono considerati tre tipi di fenologie: sempreverde, decidua stagionale e decidua in stato i stress. L'attuale trattamento della fenologia sempreverde è abbastanza semplice, con la caduta sulla lettiera che avviene ad un tasso costante durante l'anno, dipendendo dalla specifica longevità della foglia. Con l'allocatione alla nuova crescita questo processo dipende anche dalla fotosintesi attuale, che controlla il ciclo stagionale della crescita e dello sviluppo della chioma.

L'algoritmo della fenologia decidua stagionale consente una singola nascita della foglia e un singolo periodo di caduta sulla lettiera all'anno. Questo algoritmo è applicato agli alberi

decidui temperati e boreali, i quali tipicamente presentano una singola stagione di crescita annuale, per cui la caduta sulla lettiera è fortemente controllata dalla lunghezza del giorno autunnale. L'inizio della nascita della foglia è governato da una somma dei gradi giorno critici, e la caduta della foglia sulla lettiera comincia quando la lunghezza del giorno è più corta di un valore critico (fototipo caratteristico). Il periodo per il trasferimento della nuova crescita dall'immagazzinamento e il periodo per la completa caduta della foglia sulla lettiera sono entrambi di 15 giorni.

L'algoritmo della fenologia decidua in condizioni di stress consente diverse stagioni della crescita nell'arco dell'anno, a seconda delle condizioni favorevoli di umidità del suolo e di temperatura, ed è applicato agli alberi decidui tropicali, a tutti i tipi di arbusti ed ai PFT erbacei. Se durante un periodo inattivo il numero dei giorni con la temperatura sotto lo zero supera un valore critico (impostato qui a 15 giorni) l'inizio della nuova crescita dall'immagazzinamento dipende dai gradi giorno accumulati e dai giorni accumulati (pari a 15) con il potenziale di acqua nel terreno sopra una soglia critica (impostata a -2.0 MPa) per il terzo strato di terreno del modello (a circa 4.5 cm sotto la superficie del suolo). L'inizio della caduta della foglia sulla lettiera è innescato dallo stress idrico accumulato del terreno, definito come più di 15 giorni in cui il potenziale di acqua del suolo nel terzo strato è inferiore a -2.0 MPa. Oppure è innescato dallo stress da freddo, definito come più di 15 giorni in cui la temperatura del terreno nel terzo strato è inferiore allo zero. Sia per l'innescamento della caduta sulla lettiera per lo stress idrico che per lo stress da freddo, i periodi con il potenziale di acqua nel suolo o con la temperatura del suolo sopra la soglia critica, diminuiscono le quantità accumulate, cosicché è richiesto un periodo continuo, o di stress da freddo o di stress idrico, per innescare l'avvio della caduta sulla lettiera. Ad ogni passo temporale, il serbatoio di carbonio della foglia prognostico è "traslato" a un indice di area fogliare proiettato alla scala della chioma, basandosi sull'ipotesi di un gradiente verticale nell'area specifica della foglia che è lineare con l'aumentare del LAI. Il modello biofisico richiede una stima dell'altezza della vegetazione (z_{top}) ottenuta per la vegetazione legnosa a partire dal carbonio del gambo (C_{stem}), mentre i tipi di vegetazione non legnosa è funzione del LAI totale della chioma.

2.9.6 Incendi e mortalità

Il modello include due meccanismi di mortalità indipendenti, costituiti da un algoritmo di incendio di tipo prognostico, che dipende dalla disponibilità di combustibile e dalle condizioni di umidità del suolo vicino alla superficie e da una mortalità della pianta dovuta ad altre cause.

La routine per la mortalità da incendio è basata sul modello di [Thonicke et al., 2001], con delle modifiche per adattare il passo temporale annuale originale al passo temporale sub-

quotidiano del CLM. Essa consiste principalmente nel reinterpretare la frazione annuale di area bruciata ad ogni passo temporale, non più una volta all'anno, ma al contrario utilizzando nelle simulazioni una media della probabilità di incendio giornaliera.

Il risultato è che l'area frazionale bruciata, per una data cella della griglia, acquista un ciclo stagionale che corrisponde agli aumenti ed alle diminuzioni nella probabilità di incendio giornaliera, come previsto dal modello originale. L'area frazionale bruciata ad ogni passo temporale, è applicata ai serbatoi di carbonio e azoto (del livello-strato) della lettiera e dei detriti legnosi spessi (*CWD*). Essa è applicata differentemente ai serbatoi di carbonio e di azoto della vegetazione, a seconda della resistenza all'incendio specifica per ogni PFT.

La combustione è assunta completa per la parte colpita della foglia, della radice fine e dei serbatoi della lettiera, mentre per i serbatoi del gambo, della radice legnosa spessa e del *CWD* si assume una combustione incompleta (fissata al 20% della frazione colpita del serbatoio). Le frazioni combuste dei serbatoi del carbonio sono restituite all'atmosfera, come parte del flusso di carbonio netto. I serbatoi di azoto combusti sono trattati invece come perdite verso l'atmosfera. Si assume che le frazioni incombuste dei serbatoi legnosi, della vegetazione colpita, persistano come nuove aggiunte al serbatoio *CWD*. Mentre la frazione incombusta del serbatoio *CWD* colpito resta sul posto.

La mortalità dell'intera pianta è stimata ad ogni passo temporale, ed è trattata semplicemente come una percentuale della massa totale. Tale massa è contenuta in ogni serbatoio della vegetazione, perso verso la lettiera, e nei serbatoi legnosi spessi su base annuale. Qui è utilizzato un valore del 2% all'anno per tutti i PFT, sebbene sia desiderabile un trattamento più meccanicistico, con delle dipendenze basate sulla distribuzione dei PFT, dell'età e della dimensione degli individui.

2.9.7 Fonti di azoto e perdite

Il bilancio di lungo termine tra i guadagni e le perdite di azoto, rappresenta per molti ecosistemi un controllo dominante sulla produttività e sull'immagazzinamento di carbonio. Thornton e Rosenbloom [Thornton e Rosenbloom, 2005] hanno dimostrato l'importanza di questo controllo per il modello Biome-BGC, e queste dinamiche si adattano bene anche al modello CN.

Il modello include la deposizione dell'azoto minerale, combinando la deposizione degli NO_x e degli NH_x dall'atmosfera e la fissazione dell'azoto biologico, come fonti del nuovo azoto minerale che entrano negli ecosistemi terrestri. Si assume che entrambe le fonti entrino direttamente nel serbatoio di azoto minerale del suolo. La deposizione atmosferica è prescritta come un tasso annuale per ciascuna cella della griglia, con l'opzione di fornire un campo variante nel tempo. I valori, se necessario, sono interpolati nel tempo per produrre un campo non discontinuo ad ogni cella della griglia. Questi tassi sono stati ottenuti da una

simulazione CAM transitoria dal 1850-2009 (ad una risoluzione di 1.9x2.5x26L) comprendente la chimica reattiva in troposfera e stratosfera.

Le concentrazioni osservate sono specificate per il metano, per l' N_2O , per le sostanze lesive dell'ozono (*CFC*) e per la CO_2 .

La fissazione dell'azoto biologico (*BNF*, g N/ m² y) è stimata come una funzione della produzione primaria netta annuale (*NPP*, g C/m² y), come

$$BNF = 1.8[1 - \exp(-0.003.NPP)] \quad (2.33)$$

Questa formulazione coglie la dipendenza osservata ad ampia scala del BNF sulla produttività dell'ecosistema e per alti valori di NPP presenta una ridotta sensibilità tra fluttuazioni di NPP e di BNF, rappresentando in questo modo l'insorgere di limitazioni da altri nutrienti che caratterizzano i sistemi molto produttivi. Il modello include quattro percorsi per la perdita di azoto: denitrificazione, volatilizzazione, separazione e le perdite dovute agli incendi.

2.10 Modello dinamico di vegetazione globale CNDV

Nel CLM l'utente può scegliere di lanciare il modello CN come un modello dinamico di vegetazione globale (*DGVM*), qui chiamato *CNDV*. E' importante notare che il modello di biogeochimica standard CN, consente di eseguire i calcoli relativi al carbonio e all'azoto, ma non permette di valutare la biogeografia dinamica. Poiché il CN deve essere attivo affinché si possa lanciare il CNDV, si deduce che nel CLM anche il DGVM include un ciclo per l'azoto.

Il CNDV può simulare soltanto cambiamenti biogeografici della vegetazione naturale. Qui, l'unità di territorio vegetata è separata in vegetazione naturale e antropica, per consentire la coesistenza di entrambi i tipi di vegetazione. Questo funziona solo se l'unità di territorio antropica è fissata. Per implementare il CNDV, è stato introdotto il codice del modello di vegetazione dinamica delle precedenti versioni del CLM (*CLM-dgvm*), al framework orario del CN, soltanto per riuscire a simulare gli aggiornamenti della biogeografia annuale. Questo include i processi annuali di competizione per la luce, lo stabilimento e la sopravvivenza per quanto riguarda la copertura dei PFT (detta *FPC*) e la popolazione (*P*), ma non per i processi relativi ai serbatoi di carbonio, al LAI o all'altezza della chioma. Nel CNDV il calcolo del gap

di mortalità utilizza i concetti di stress annuale di calore e alcune considerazioni sull'efficienza di crescita. Tutti gli altri processi dell'ecosistema (allocazione, fenologia, incendi, etc.) sono tenuti dai moduli del CN. A differenza del precedente CLM-dgvm, nel CNDV gli aggiornamenti della biogeografia annuale sono interpolati ad intervalli orari.

2.10.1 Stabilimento e sopravvivenza

La distribuzione dei PFT è in genere prescritta nel CLM, tranne nel caso in cui il CNDV è attivo. Nel CNDV infatti il modello inizia la simulazione senza nessuna informazione sui PFT per la cella della griglia. Il modello valuta se un PFT può oppure non può stabilirsi o sopravvivere, secondo i limiti bioclimatici dei PFT (

Tabella 2.6). I PFT del tipo “*shrub*” (ovvero gli arbusti) vengono trattati come alberi allo stabilimento.

Quando un PFT può stabilirsi, il CNDV trascura l’introduzione annuale dei giovani alberi e aggiorna la FPC sulla base della consistenza del serbatoio di carbonio a livello delle foglie per il relativo PFT.

Per i nuovi PFT stabiliti, il CNDV assegna un valore pari a 1 gC m^{-2} dell’area dell’unità di territorio per quanto riguarda il carbonio della foglia relativo ai semi. Il FPC dei semi è uguale a 0.05 per le specie erbacee e 0.000844 per gli alberi (valori determinati dalle simulazioni del CLM-dgvm). Il CNDV considera l’aggiunta di nuovi individui alla popolazione P. La copertura FPC cambia annualmente come nel CLM-dgvm, ma qui è interpolata ad un incremento orario. Naturalmente l’energia e la massa sono conservate.

Tabella 2.6. Biogeografia dei tipi funzionali di pianta (PFT) rispetto al clima.

$T_{c,min}$ (°C), temperature dell'aria mensile minima più fredda per la sopravvivenza dei PFT precedentemente stabiliti; $T_{c,max}$ (°C) temperature dell'aria mensile minima più calda per lo stabilimento dei nuovi PFT; GDD_{min} , gradi giorno crescenti annuali minimi sopra i 5°C per lo stabilimento di nuovi PFT.

PFT	Sopravvivenza	Stabilimento	
	$T_{c,min}$ (°C)	$T_{c,max}$ (°C)	GDD_{min}
Tropical broadleaf evergreen tree (BET)	15.5	No limit	0
Tropical broadleaf deciduous tree (BDT)	15.5	No limit	0
Temperate needleleaf evergreen tree (NET)	-2.0	22.0	900
Temperate broadleaf evergreen tree (BET)	3.0	18.8	1200
Temperate broadleaf deciduous tree (BDT)	-17.0	15.5	1200
Boreal needleleaf evergreen tree	-32.5	-2.0	600
Boreal deciduous tree	No limit	-2.0	350
Temperate broadleaf deciduous shrub (BDS)	-17.0	No limit	1200
Boreal broadleaf deciduous shrub (BDS)	No limit	-2.0	350
C_4	15.5	No limit	0
C_3	-17.0	15.5	0
C_3 artic	No limit	-17.0	0

2.10.2 Competizione per la luce

Nell'ordine dei processi annuali del CNDV, la competizione per la luce è invocata prima dello stabilimento e della sopravvivenza. Tuttavia, la competizione per la luce non influenza una simulazione che parte dal suolo nudo fino a quando la vegetazione non occupa completamente l'unità di territorio (almeno un paio d'anni). La competizione per la luce comincia con un calcolo che aggiorna la copertura FPC. A causa del loro vantaggio nell'altezza, gli alberi occuperanno fino al 95% dell'unità di territorio, indipendentemente dalla produttività dell'erba e degli arbusti. L'erba ha la seconda priorità, e infine gli arbusti che hanno accesso allo spazio rimanente. Il risultato è che gli alberi dominano nelle regioni

maggiormente produttive, l'erba nelle regioni meno produttive ed infine gli arbusti nelle regioni non-desertiche meno produttive.

2.10.3 Processi modificati del CN per l'accoppiamento con il CNDV

Per quanto riguarda il gap di mortalità e la mortalità provocata dagli incendi, non viene più utilizzato il tasso di mortalità annuale costante di 0.02. Questo tasso costante è sostituito, per gli alberi e gli arbusti, da un tasso annuale calcolato tenendo conto dell'ambiente e della mortalità da stress. Il modulo del CN converte il tasso annuale ad un tasso orario. Il CNDV utilizza le caratteristiche di individuo medio e la numerosità della popolazione (P) per ciascun PFT nei calcoli della competizione per la luce, dello stabilimento e della sopravvivenza. Sono considerati gli individui rimossi ad ogni ora dalla popolazione P, in risposta alla mortalità per incendi ed altre cause. I serbatoi di carbonio per gli individui e la copertura FPC rimangono invece costanti. Infine, gli aggiornamenti della popolazione P influenzano solamente i processi annuali di competizione per la luce, lo stabilimento e la sopravvivenza.

CAPITOLO 3

ANALISI

In questo capitolo vengono descritte le simulazioni effettuate e l'analisi dei risultati ottenuti nell'area oggetto del nostro studio.

3.1 Articolazione dello studio

Per verificare le potenzialità del CLM si è deciso di effettuare delle simulazioni *single site* in tre zone del Sud Africa caratterizzate da diverse tipologie di bioma. In particolare si sono considerate tre zone classificate come:

- savana
- prateria (*grassland*)
- deserto

La scelta dei tre siti è stata effettuata rispondendo ai seguenti criteri:

- sufficiente rappresentatività del bioma
- posizione del sito distante dagli oceani, dagli specchi d'acqua e dalle aree urbanizzate

La modalità *single site* del CLM permette di effettuare le simulazioni in un punto della Terra, date le sue coordinate di latitudine e di longitudine. Il modello costruisce una griglia centrata nel punto d'interesse alla risoluzione spaziale richiesta nella simulazione. Nel nostro studio la griglia spaziale ha una risoluzione di $0.9^\circ \times 1.25^\circ$ ed è condivisa sia dalla componente terrestre che da quella atmosferica. Questa risoluzione copre un'area nella realtà di circa 10000 kmq.

Per ogni sito sono state valutate due simulazioni:

- simulazione con il modello biogeochimico CN
- simulazione con il modello dinamico di vegetazione globale CNDV

In questo modo si è potuta verificare la diversa risposta del modello nelle due configurazioni con il modello CN e con il modello CNDV, andando a confrontare i risultati delle simulazioni. Per ogni sito si è presentato un breve inquadramento descrittivo del tipo di territorio in esame fornendone la collocazione geografica.

L'analisi del nostro studio si è concentrata nelle seguenti macroaree:

- idrologia (precipitazione, contenuto d'acqua nel suolo, flussi di evaporazione della vegetazione e del terreno, traspirazione della vegetazione);
- produttività della vegetazione (produzione primaria lorda e netta, respirazione autotrofa, indice di area fogliare e indice di area del gambo);
- cicli biogeochimici del carbonio e dell'azoto (dinamica della lettiera, serbatoi del carbonio e dell'azoto al livello dei PFT, mineralizzazione dell'azoto, immobilizzazione, denitrificazione, prelievo dell'azoto da parte della pianta).

Al fine di facilitare la visualizzazione dei risultati ottenuti per ogni simulazione sono state riportate delle tabelle riassuntive contenenti i valori annuali delle variabili considerate nella nostra analisi, anche in ottica di un confronto con studi di letteratura. E' opportuno sottolineare che il CLM restituisce in output un numero elevato di variabili (maggiore di trecento). Ad esempio per quanto concerne l'idrologia sono calcolate le portate di ruscellamento superficiale, di infiltrazione nel suolo e di ricarica della falda sotterranea. Naturalmente la scelta delle variabili di interesse ha tenuto conto degli obiettivi che ci si è proposti in questo studio.

3.2 Configurazione del modello CLM e utilizzo del server Lagrange al CILEA

La configurazione del CLM avviene a partire da quella del modello completo CESM. Trattandosi di un modello climatico accoppiato è necessario innanzitutto che l'utente definisca quali sono le componenti del modello "attive", ovvero le componenti dinamiche che prognostiche. Essendo i modelli attivi piuttosto costosi dal punto di vista computazionale, il CESM include dei modelli definiti come *data model* che velocizzano l'accesso ai dati di input. Le altre tipologie di modello sono *dead* (non-attive) e *stub*. Le componenti non-attive generano dati invalidi dal punto di vista scientifico ed esistono solamente come supporto per i test tecnici del modello. Devono essere lanciate tutte contemporaneamente e non dovrebbero mai essere combinate con le componenti del modello attive o di tipo *data model*. Infine ci sono le componenti *stub* che servono a soddisfare richieste d'interfaccia qualora le componenti non siano necessarie per la configurazione (ad esempio, la componente attiva terrestre forzata con i dati atmosferici non richiede le componenti oceaniche e di criosfera, tali componenti sono rappresentate come *stub*). Per il nostro studio abbiamo utilizzato la componente attiva terrestre forzata con i dati atmosferici. Dopo aver scelto quali componenti utilizzare l'utente può procedere con la configurazione della simulazione del CLM. Tale configurazione è caratterizzata da una numerosa lista di opzioni che consentono di personalizzare e adattare il modello alle proprie esigenze specifiche. Non è tra gli scopi di questo elaborato entrare nel dettaglio tecnico della configurazione del modello CLM. Per eventuali approfondimenti si rimanda alla guida dell'utente "*CESM Research Tools: CLM4.0.10 User's Guide Documentation*" [Kluzek, 2010].

Per il nostro studio abbiamo utilizzato il CLM con la configurazione seguente:

- modello terrestre attivo;
- modello atmosferico di tipo *data model* con le forzanti atmosferiche del dataset QIAN all'anno 2003;
- biogeochimica attiva (modello CN) o dinamica della vegetazione attiva (modello CNDV);
- modalità *single site* (PTS_MODE);
- risoluzione spaziale 0.9° x 1.25° (f09);
- risoluzione temporale standard del modello CLM di 1800 secondi.

Per quanto riguarda le condizioni iniziali il CLM prevede tali condizioni siano relative ad una condizione di equilibrio. Tale condizione è raggiunta attraverso uno *spin-up*, ovvero una

simulazioni con condizioni iniziali arbitrarie per un periodo di tempo sufficientemente l'ungo da garantire l'esaurimento della fase transitoria determinata da tali condizioni iniziali (Figura 3.1 e Figura 3.2), che varia a seconda del tipo di configurazione del CLM e dopo la quale si osserva una stabilizzazione delle serie storiche delle variabili di output a dei valori che rimangono costanti o oscillanti attorno ad una media costante nel tempo. Nella tabella che segue (Tabella 3.1) sono indicati i tempi minimi di *spin-up* del CLM nelle possibili configurazioni. Si nota come i tempi sono maggiori se il modello funziona con i cicli del carbonio e dell'azoto attivi .

Tabella 3.1. Tempi di spin-up del CLM necessari per il raggiungimento di uno stato di equilibrio con il clima.

<i>CLM-SP</i> <i>(Fenologia da satellite)</i>	<i>CLM-CN</i> <i>(Biogeochimica attiva)</i>	<i>CLM-CNDV</i> <i>(Dinamica della vegetazione attiva)</i>
50 anni di simulazione	600 anni di simulazione	800 anni di simulazione

Le simulazioni sono state realizzate utilizzando uno dei server disponibili presso il *CILEA* (*Consorzio Interuniversitario Lombardo per L'Elaborazione Automatica*). In particolare si è utilizzato il server *LAGRANGE* per la compilazione del codice sorgente e per le simulazioni. Le variabili di output del modello CLM hanno frequenza mensile.

Nel nostro caso abbiamo effettuato simulazioni superiori ai 1000 anni per garantire il raggiungimento dell'equilibrio (*spin-up*) sia con il modello CN che con il modello CNDV. Per la lettura e l'elaborazione delle serie storiche delle variabili sono stati realizzati degli *script* in ambiente *MatLab*. Di seguito vengono riportati i grafici del ciclo stagionale annuale delle variabili di interesse per entrambi i tipi di configurazione del modello (CN e CNDV) per tutti e tre i siti scelti nella nostra analisi.

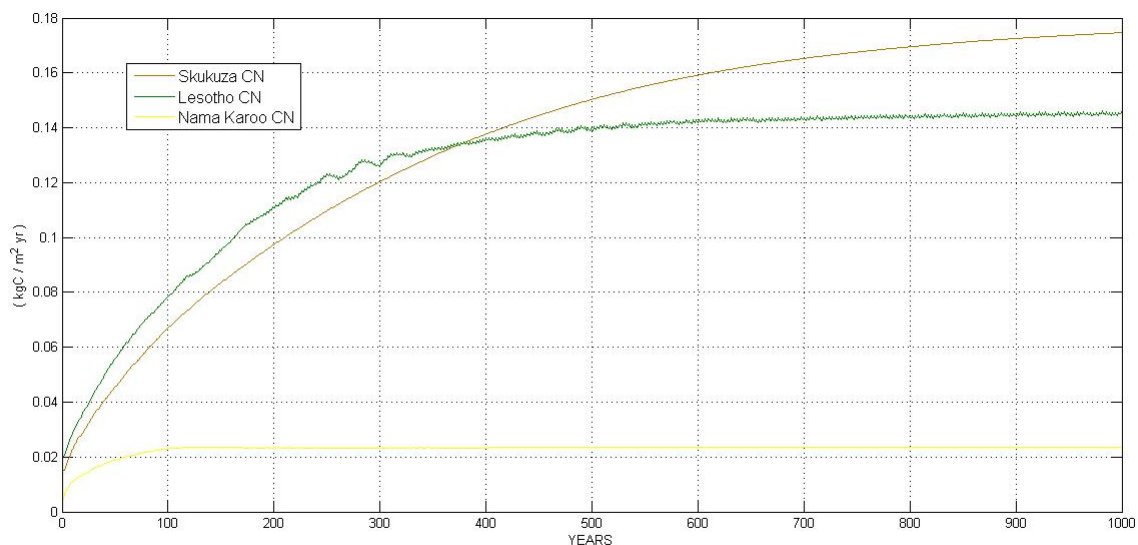


Figura 3.1 Serie storica della variabile di output NPP (Produzione Primaria Netta) del CN per circa 1000 anni di simulazione.

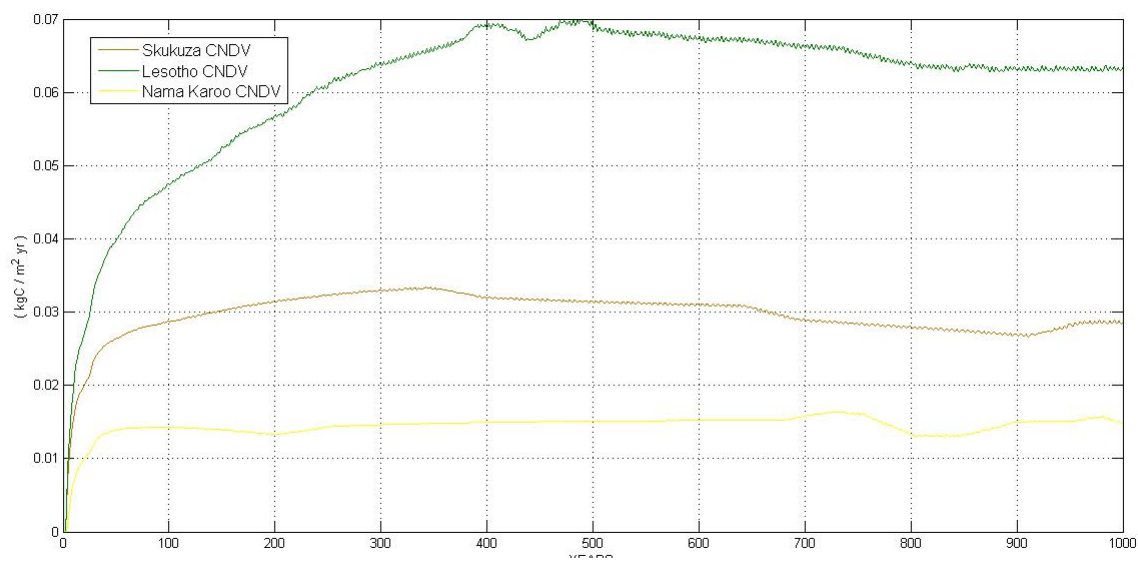


Figura 3.2 Serie storica della variabile di output NPP (Produzione Primaria Netta) del CNDV per circa 1000 anni di simulazione.

3.3 Simulazione nel bioma savana

Le savane occupano circo il 20% della superficie terrestre mondiale e circa il 40% di quella dell’Africa. Esse in termini del loro contributo alla produzione primaria netta sono seconde soltanto alle foreste tropicali. Rappresentano un sostanziale serbatoio di carbonio organico terrestre che nei decenni futuri potrebbe funzionare sia da fonte netta che da riserva di CO₂. Le savane del mondo si trovano tutte in regioni calde caratterizzate da un’elevata distribuzione della precipitazione stagionale. Ciò risulta in una stagione secca calda (oppure in due, nei clima monsonici) della durata dai tre agli otto mesi (Gennaio-Luglio) e in una stagione umida calda per il resto dell’anno (Agosto-Dicembre). La vicinanza all’equatore implica anche un’elevata radiazione solare. Poiché per la maggior parte dell’anno non c’è sufficiente acqua per assorbire quest’energia per mezzo dell’evaporazione, si hanno alte temperature (infatti le savane sono in deficit netto d’acqua per gran parte dell’anno). Il contenuto di materia organica dei suoli (spesso di natura sabbiosa) della savana è generalmente basso a conferma dell’elevato tasso di decomposizione della materia organica. Una vasta parte delle savane in Africa si trovano a quote maggiori dei 1000 m e a latitudini superiori ai 20°C. Il sito selezionato per la simulazione con il CLM infatti ha coordinate (25.02 S, 31.50 E) (Figura 3.3**Errore. L’origine riferimento non è stata trovata.**). Si tratta di una savana di arbusti (shrub) semi-arida (Figura 3.4) situata nel cuore del Parco Nazionale Kruger del Sud Africa. La copertura della chioma è circa il 40% . La distanza dall’Oceano Indiano è pari all’incirca a 300 (km).



Figura 3.3 Localizzazione del sito Skukuza.



Figura 3.4 Vegetazione tipica del bioma savana.

3.3.1 Idrologia

La precipitazione in ingresso al CLM sia per la configurazione con il modello biogeochimico CN sia con il modello dinamico di vegetazione globale CNDV è quella del dataset QIAN riferita all'anno 2003 (

Figura 3.5), caratterizzata dai valori di picco a Febbraio e a Novembre e dai valori minimi a Maggio, Luglio e Agosto. Il livello annuale di precipitazione è pari a 419,6 (mm yr⁻¹).

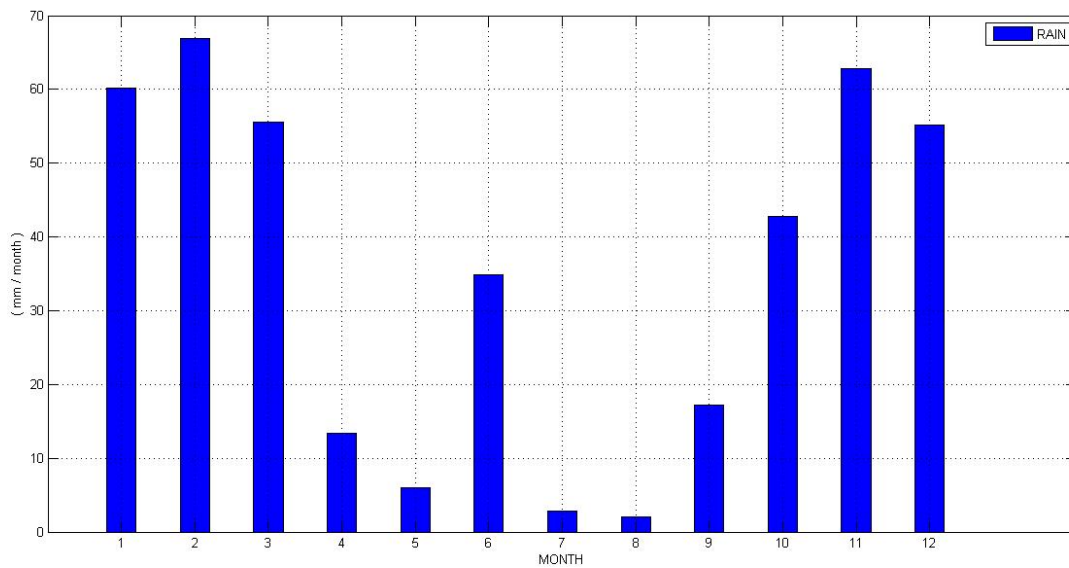


Figura 3.5 Andamento stagionale della precipitazione usata come input per le simulazioni con il modello CN e con il modello CNDV.

Il contenuto volumetrico di acqua nel suolo (mm³ mm⁻³) (

Figura 3.6) non varia notevolmente nel corso dell'anno ed assume un valore medio pari a 11,7%. Il CLM considera per lo strato di terreno 10 livelli idrologicamente attivi più 5 livelli definiti " *bedrock* ". In questi ultimi si è ottenuto ovviamente un valore nullo del contenuto volumetrico di acqua. Per gli altri 10 livelli si è calcolato il contenuto volumetrico d'acqua mensile facendo la media del contenuto volumetrico d'acqua di tutti i livelli. L'andamento stagionale del contenuto volumetrico d'acqua (

Figura 3.7) è identico a quello del modello biogeochimico CN con un valore annuale pari a 11,8%.

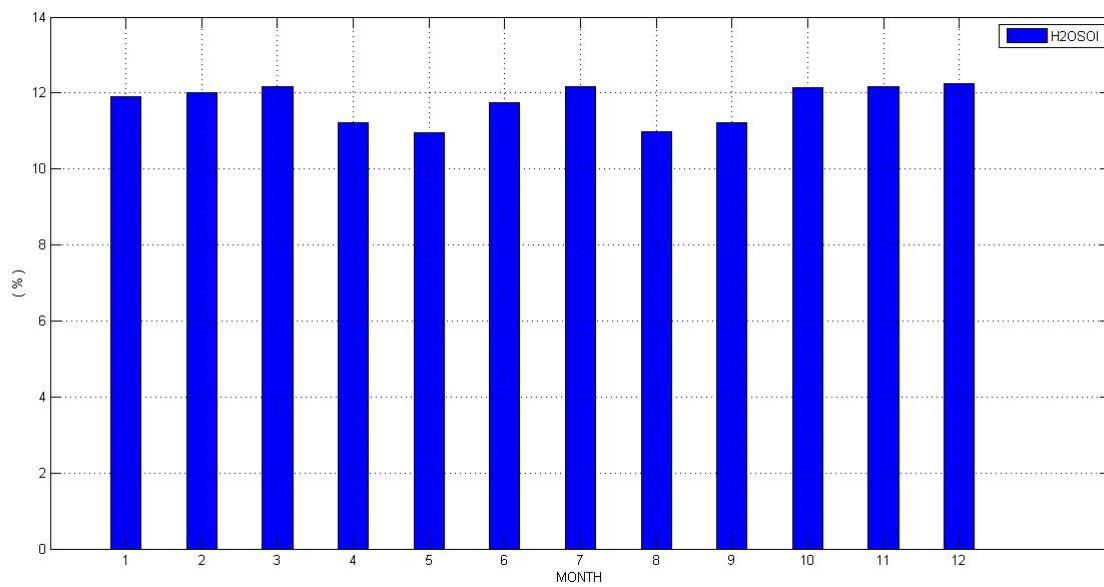


Figura 3.6 Andamento stagionale del contenuto volumetrico d'acqua nel suolo con il modello CN.

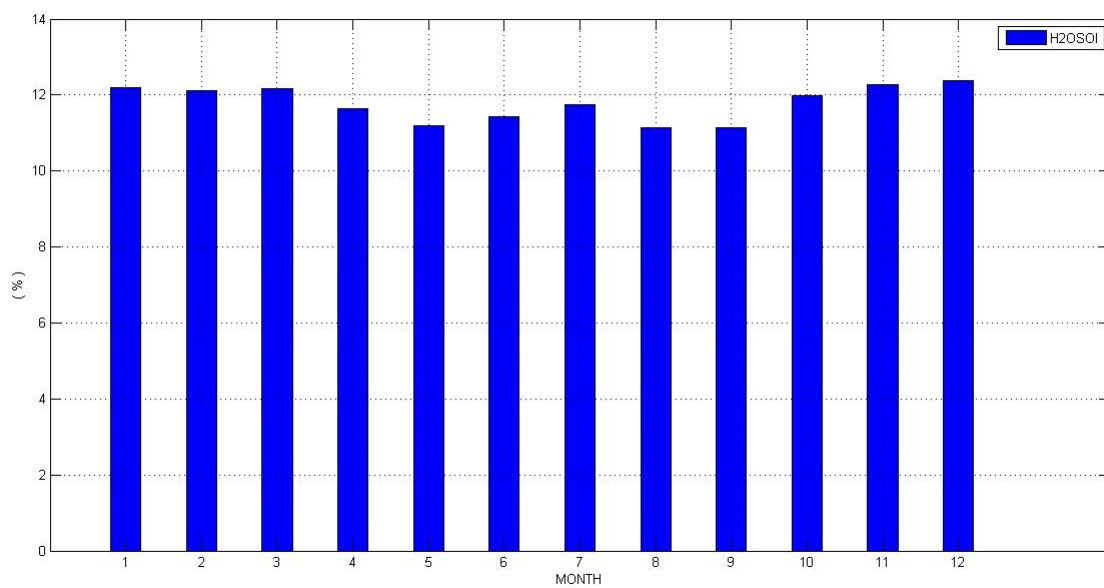


Figura 3.7 Andamento stagionale del contenuto volumetrico d'acqua nel suolo con il modello CNDV.

Per quanto riguarda l'evaporazione (

Figura 3.8) si evidenzia come il contributo del terreno sia ampiamente superiore a quello della vegetazione. I valori annuali sono rispettivamente di 253,7 (mm yr⁻¹) e di circa 30,0 (mm yr⁻¹). La traspirazione della vegetazione è sempre maggiore dell'evaporazione, con un valore annuale pari a 144,5 (mm yr⁻¹).

E' importante ricordare che è proprio il flusso di traspirazione a fornire l'acqua e i nutrienti alla pianta ed è quindi quest'ultimo ad essere legato alla produzione. Infatti la parte di evaporazione che non attraversa la pianta non è produttiva.

Nella simulazione realizzata con il modello CNDV l'evaporazione dalla vegetazione è più piccola rispetto al contributo di traspirazione (Figura 3.9) con i valori annuali rispettivamente pari a circa 3,6 (mm yr⁻¹) e 32,0 (mm yr⁻¹). Si nota come anche questi flussi siano sottostimati di un ordine di grandezza se confrontati con i precedenti valori delle simulazioni con il modello biogeochimico. Il contributo di evaporazione del suolo (Figura 3.9) è risultato essere di 393,5 (mm yr⁻¹) più elevato rispetto a quello del modello CN, che è 253,7 (mm yr⁻¹).

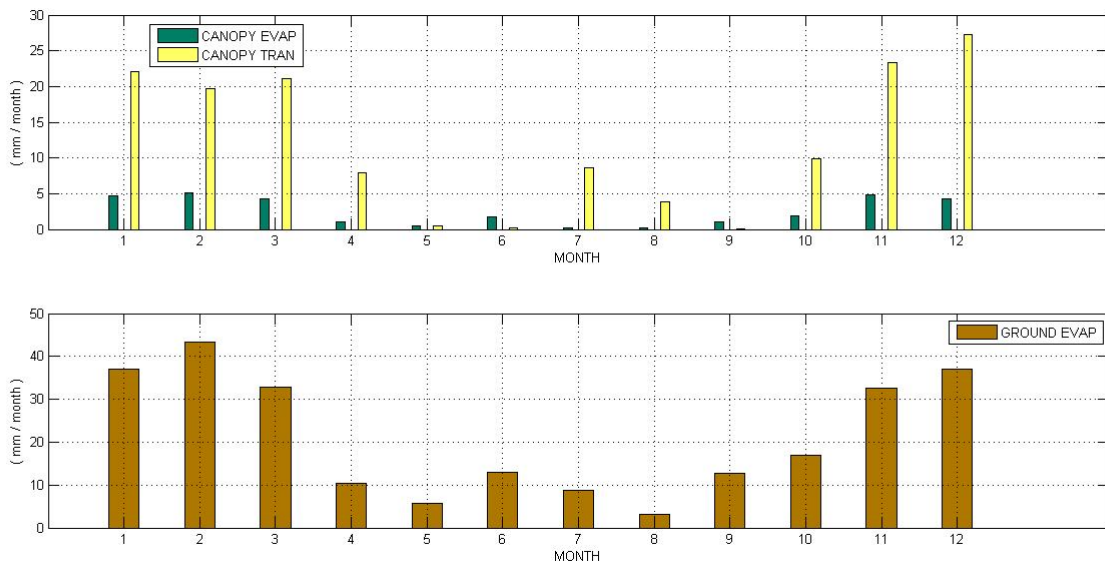


Figura 3.8 Andamento stagionale dell'evaporazione e della traspirazione della chioma e dell'evaporazione del terreno con il modello CN.

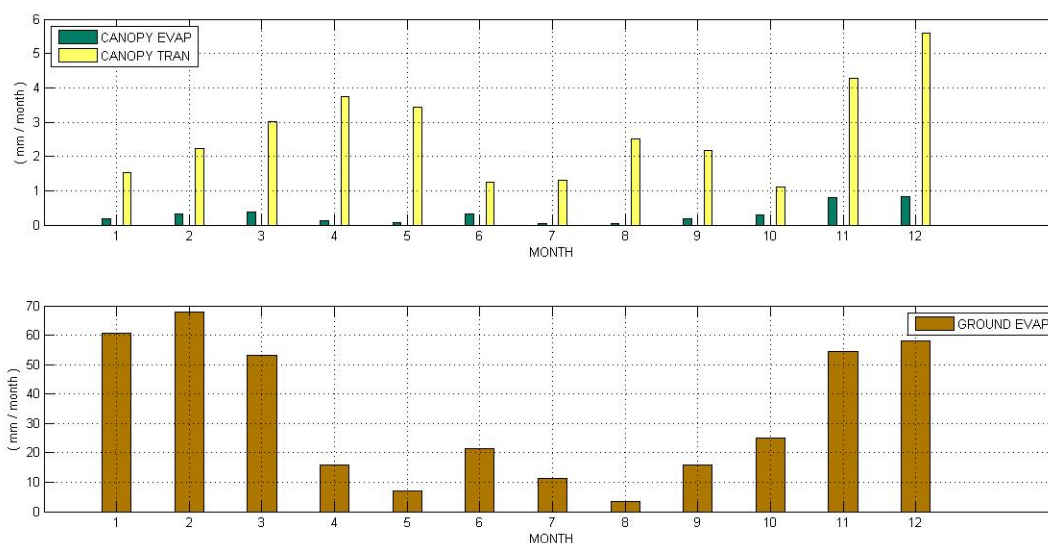


Figura 3.9 Andamento stagionale dell'evaporazione e della traspirazione della chioma e dell'evaporazione del terreno con il modello CNDV.

Nella tabella sottostante (

SKUKUZA	CN	Lieth and Whittaker (1975)	Scholes and Walker (1993)
Precipitazione (mm yr ⁻¹)	419,6	419,6	585,8
Evaporazione vegetazione (mm yr ⁻¹)	30,0	3,6	34,6
Evaporazione suolo (mm yr ⁻¹)	253,7	393,5	275,4
Traspirazione vegetazione (mm yr ⁻¹)	144,5	32,0	215,3

Tabella 3.2) sono riportati i valori delle variabili idrologiche considerate in questo studio per le simulazioni CN e CNDV. Sono indicati i valori annuali del ciclo stagionale. Viene riportato il confronto con lo studio effettuato nella savanna al sito di ricerca Nylsvley da [Scholes e Walker, 1999]. I risultati ottenuti hanno mostrato un'ottima stima dei valori idrologici simulati dal modello biogeochimico CN. Il modello di dinamica della vegetazione CNDV ha sottostimato invece i flussi relativi alla vegetazione e ha leggermente sovrastimato il flusso relativo al terreno (cogliendone comunque l'ordine di grandezza).

SKUKUZA	CN	Lieth and Whittaker	Scholes and Walker (1993)
----------------	-----------	----------------------------	----------------------------------

		(1975)	
Precipitazione (mm yr ⁻¹)	419,6	419,6	585,8
Evaporazione vegetazione (mm yr ⁻¹)	30,0	3,6	34,6
Evaporazione suolo (mm yr ⁻¹)	253,7	393,5	275,4
Traspirazione vegetazione (mm yr ⁻¹)	144,5	32,0	215,3

Tabella 3.2. Valori annuali delle variabili idrologiche ottenuti con il modello CLM per Skukuza. Nell'ultima colonna è indicato il valore di riferimento in letteratura.

3.3.2 Produttività della vegetazione

Osservando il grafico della produttività (

Figura 3.10) si nota come il modello CN risponda coerentemente all'input di precipitazione, con i valori di produttività più elevati che si registrano a Gennaio, Febbraio, Marzo, Luglio, Novembre e Dicembre e i valori più bassi a Maggio, Giugno e Settembre. La produttività primaria lorda annuale risulta essere all'incirca 380,0 (gC m⁻² yr⁻¹) e la produzione primaria netta circa 176,1 (gC m⁻² yr⁻¹). Il tasso medio mensile della GPP è di 31,7 (gC m⁻² month⁻¹) e quello del NPP è di 14,7 (gC m⁻² month⁻¹). Data la stessa forzante di precipitazione (

Figura 3.5) del dataset QIAN all'anno 2003, il modello CNDV risponde in maniera diversa rispetto alle simulazioni effettuate con il CN. Osservando il ciclo stagionale della produttività (Figura 3.11) innanzitutto non si riscontra un buon adattamento con l'input di precipitazione e soprattutto l'ordine di grandezza delle variabili GPP, NPP e AR è inferiore di circa una volta (un fattore 10) rispetto a quello ottenuto con il CN. Si è passati infatti da una produzione primaria netta annuale con il CN di 176,1 (gC m⁻² yr⁻¹) a circa 29,4 (gC m⁻² yr⁻¹) con il CNDV. Il valore massimo di produttività mensile è cambiato da 32,8 (gC m⁻² month⁻¹) del CN a circa 4,0 (gC m⁻² month⁻¹) con il CNDV ed il tasso mensile di produttività è diminuito a 2,5 (gC m⁻² month⁻¹) contro i precedenti 14,7 (gC m⁻² month⁻¹).

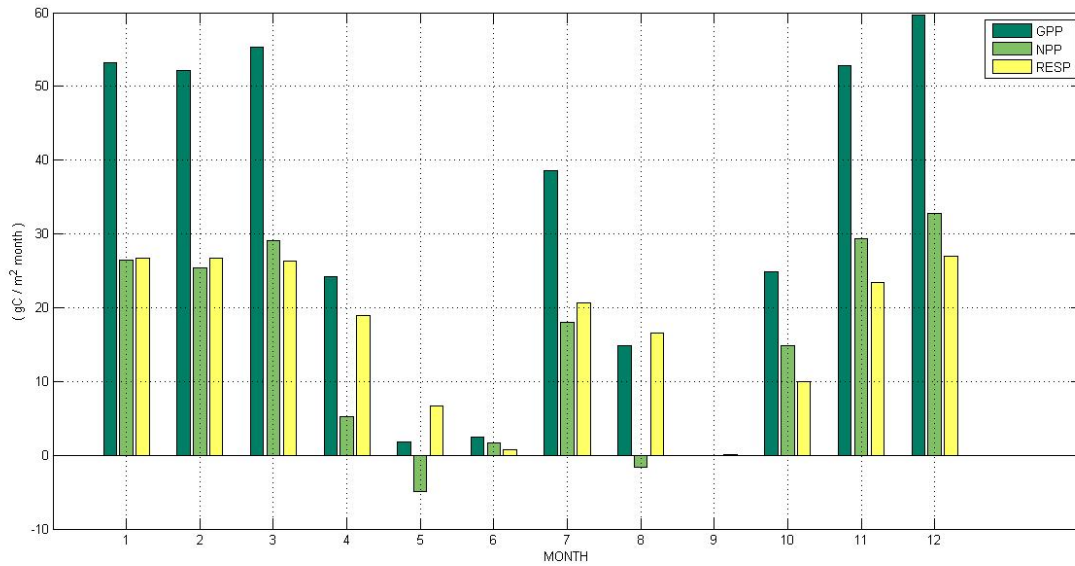


Figura 3.10 Andamento stagionale della produzione primaria lorda (GPP), della produzione primaria netta (NPP) e della respirazione autotrofa (AR) con il modello CN.

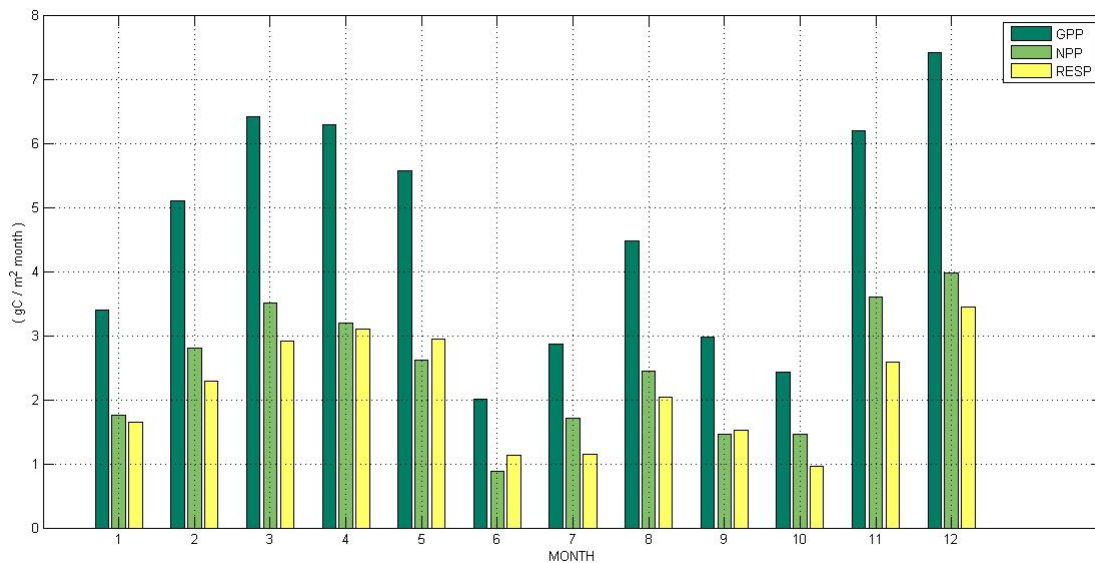


Figura 3.11 Andamento stagionale della produzione primaria lorda (GPP), della produzione primaria netta (NPP) e della respirazione autotrofa (AR) con il modello CNDV.

Il LAI (Figura 3.12) assume invece un valore di 0,6 (m^2 leaf area m^{-2} ground area) per i mesi da Gennaio a Marzo e per Novembre e Dicembre. Il valore massimo si registra a Luglio e il valore minimo (zero) a Settembre. Il valore annuale (medio) è pari a 0,5 (m^2 leaf area m^{-2} ground area). Come la produttività anche gli indici LAI e SAI sono diminuiti nella

simulazione con il CNDV (Figura 3.13). Il valore annuale del LAI si è abbassato da 0,5 (m² leaf area m⁻² ground area) fino al valore di 0,08 (m² leaf area m⁻² ground area).

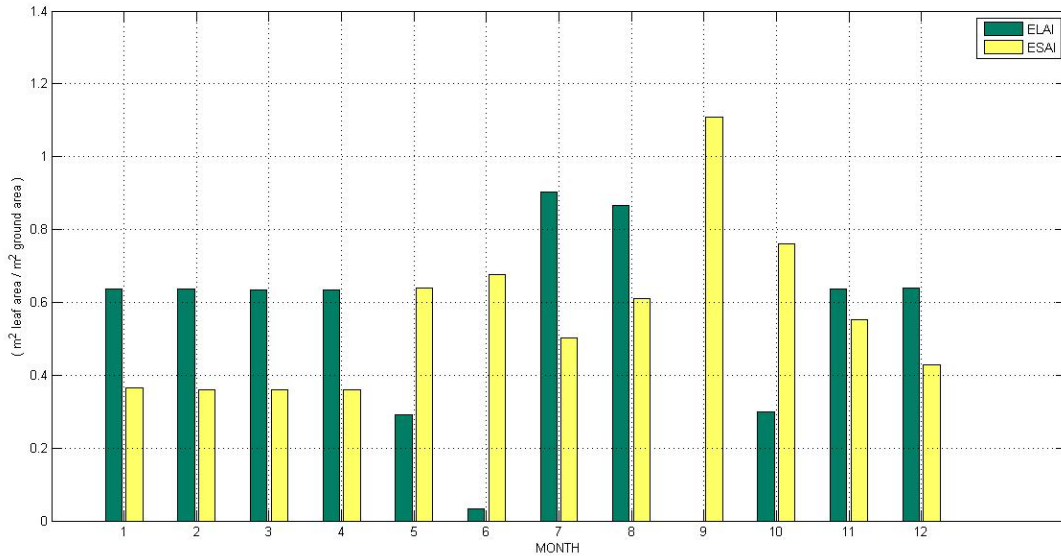


Figura 3.12 Andamento stagionale dell'indice di area fogliare (LAI) e dell'indice di area del gambo (SAI) con il modello CN.

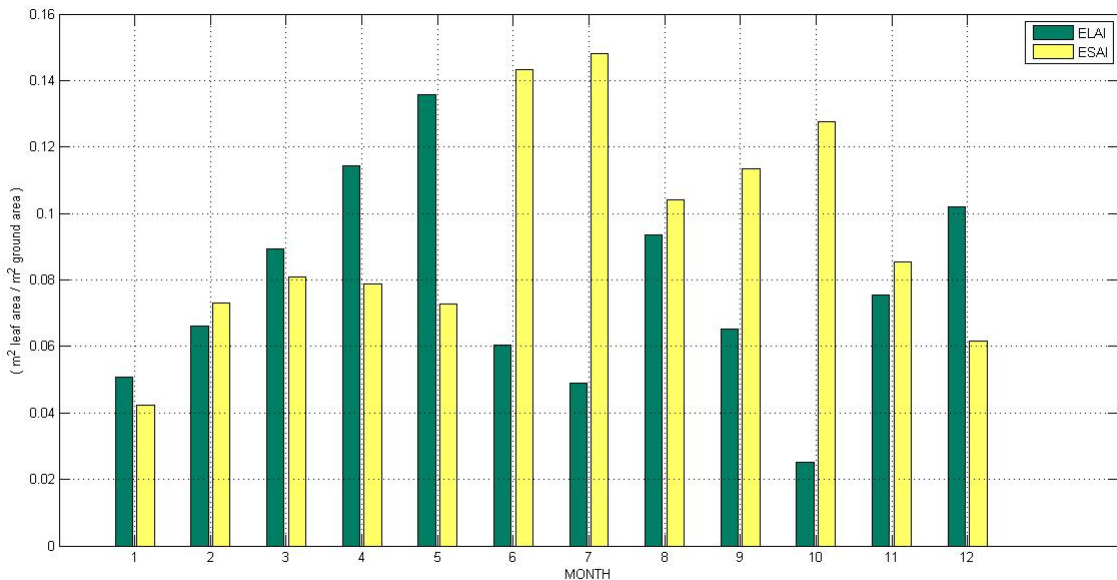


Figura 3.13 Andamento stagionale dell'indice di area fogliare (LAI) e dell'indice di area del gambo (SAI) con il modello CNDV.

Nella tabella che segue (Tabella 3.3) sono riportati i risultati ottenuti per le simulazioni CN e CNDV e i dati disponibili in letteratura [Lieth e Whittaker, 1975; Scholes e Walker, 1993].

SKUKUZA	CN	CNDV	Lieth and Whittaker (1975)	Scholes and Walker (1993)
Produzione primaria netta NPP (gC m ⁻² yr ⁻¹)	176,1	29,4	100-600	381
Indice di area fogliare LAI (m ² leaf area m ⁻² ground area)	0,5	0,08	4-12	-

Tabella 3.3. Valori annuali delle variabili relative alla produttività ottenuti con il modello CLM per la simulazione effettuata a Skukuza. Nelle ultime due colonne sono riportati i valori di riferimento in letteratura.

Si nota come il modello CN colga il range di produttività e sottostima invece il LAI. Il modello CNDV ha invece ampiamente sottostimato di due ordini di grandezza sia la produttività sia l'indice di area fogliare. Occorre comunque notare che il valore di precipitazione considerato a Nylsvley è superiore a quello di Skukuza. Questo giustifica la produttività più bassa registrata a Skukuza.

3.3.3 Cicli biogeochimici del carbonio e dell'azoto

Il grafico della caduta sulla lettiera (Figura 3.14) mostra le foglie, la corteccia, i ramoscelli e altre forme di materia organica non-vivente che (con i loro costituenti nutritivi) raggiungono lo strato più superficiale del terreno. Per il sito di Skukuza tale trasporto è risultato significativo per soli due mesi dell'anno: Aprile e Agosto con il valore di circa 61,5 (gC m⁻² month⁻¹) e 106,1 (gC m⁻² month⁻¹) rispettivamente. Il valore annuale è risultato essere 171,5 (gC m⁻² yr⁻¹). Nel CNDV la caduta sulla lettiera (Figura 3.15) avviene un mese in ritardo (Giugno e Settembre) rispetto a quanto osservato nel caso con il solo modello CN attivo. Anche qui il valore annuale (17,7 mm yr⁻¹) è inferiore di un fattore 10 rispetto al valore del CN (171,5 mm yr⁻¹).

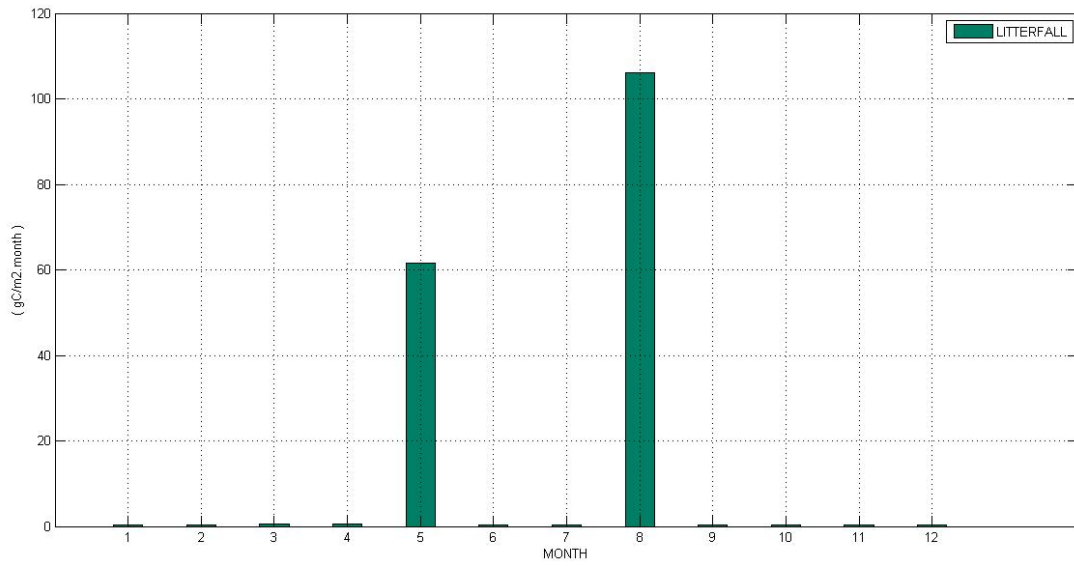


Figura 3.14 Andamento stagionale della caduta sulla lettiera con il modello CN.

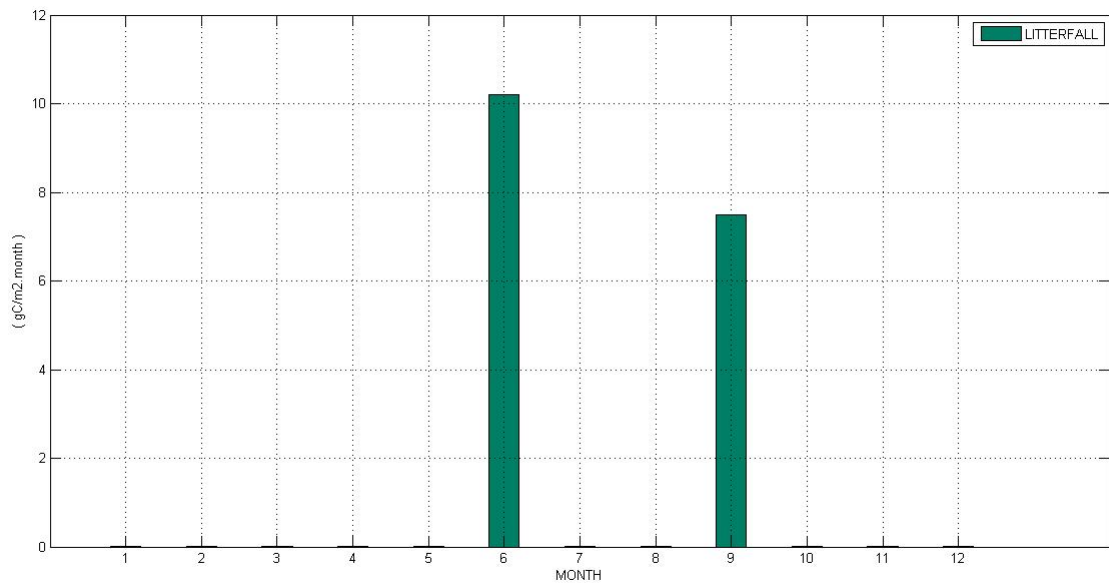


Figura 3.15 Andamento stagionale della caduta sulla lettiera con il modello CNDV.

Il ciclo del carbonio gioca un ruolo centrale nel ciclo degli altri elementi, soprattutto dell'azoto, del fosforo e nel mantenimento della fertilità e della struttura nel suolo. I flussi di carbonio finiscono con essere una misura surrogata dell'energia poiché la maggior parte dell'energia utile in un ecosistema viene trasferita come energia chimica immagazzinata nei carboidrati. L'assimilazione del carbonio da parte delle piante avviene attraverso il processo

di fotosintesi. I grafici che vanno dalla (Figura 3.16) alla (Figura 3.21) rappresentano le quantità dei serbatoi di carbonio simulate dal CLM per i differenti livelli nella cella della griglia e per le due configurazioni del modello utilizzate. In particolare il CLM valuta il carbonio presente al livello dei PFT (Figura 3.16 e Figura 3.17), il carbonio della materia organica nel suolo, il carbonio al livello della lettiera (Figura 3.18 e Figura 3.19) e il carbonio al livello della foglia (Figura 3.20 e Figura 3.21). Il contributo maggiore proviene proprio dalla materia organica nel suolo: il valore annuale è pari a circa 3375 (gC m^{-2}) per il CN e a circa 336,7 (gC m^{-2}). Essendo l'andamento annuale di quest'ultimo pressoché costante si è ritenuto poco significativo riportare il grafico. Il carbonio annuale al livello dei PFT è invece di circa 212,6 (gC m^{-2}) per il CN e di circa 13,5 (gC m^{-2}) per il CNDV. Al livello della lettiera si è registrato un valore di circa 65,2 (gC m^{-2}). Molto più basse sono risultate le quantità di carbonio al livello della foglia (Figura 3.20 e Figura 3.21), di circa 17 (gC m^{-2}) e 2,6 (gC m^{-2}) rispettivamente per il CN e il CNDV. Negli stessi grafici (dalla Figura 3.16 alla Figura 3.21) sono stati riportati anche i serbatoi per le relative quantità di azoto simulate dal CLM. Appare evidente come i serbatoi di azoto siano inferiori a quelli di carbonio di circa un fattore 10, con un andamento stagionale che sembra riprodurre quello dei serbatoi di carbonio. In generale, con il modello CNDV per quanto riguarda i serbatoi relativi al carbonio e all'azoto ai diversi livelli si osserva sempre una sottostima nei risultati delle simulazioni di circa un fattore 10, rispetto ai valori ottenuti senza attivare la dinamica della vegetazione.

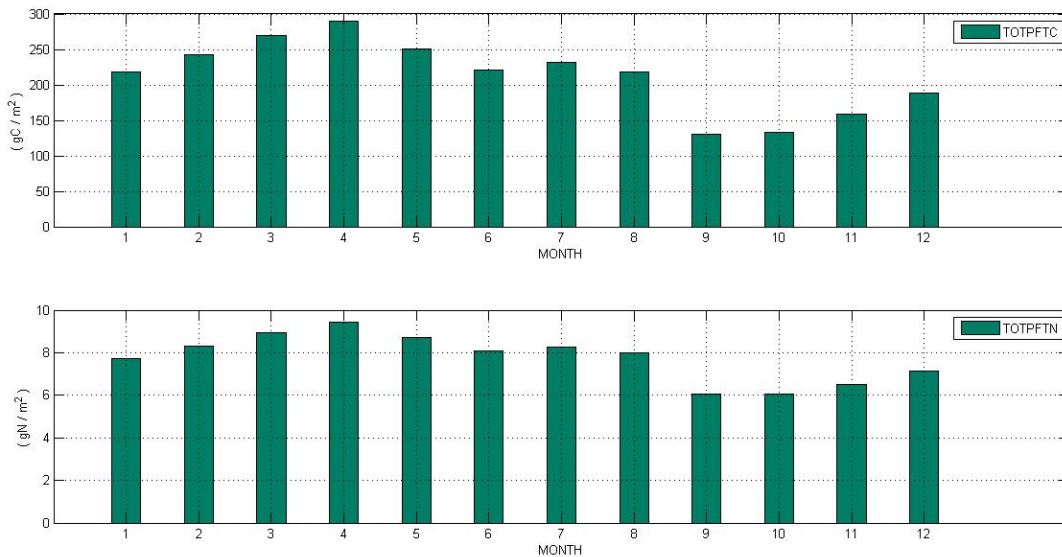


Figura 3.16 Andamento stagionale del carbonio e dell'azoto totale al livello dei PFT con il modello CN.

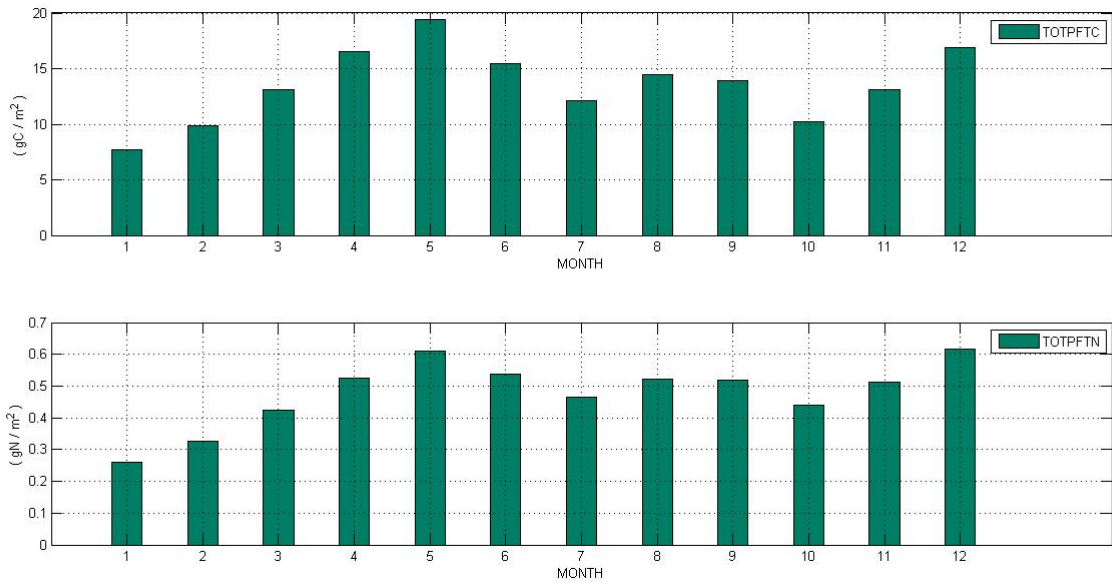


Figura 3.17 Andamento stagionale del carbonio e dell'azoto totale al livello dei PFT con il modello CNDV.

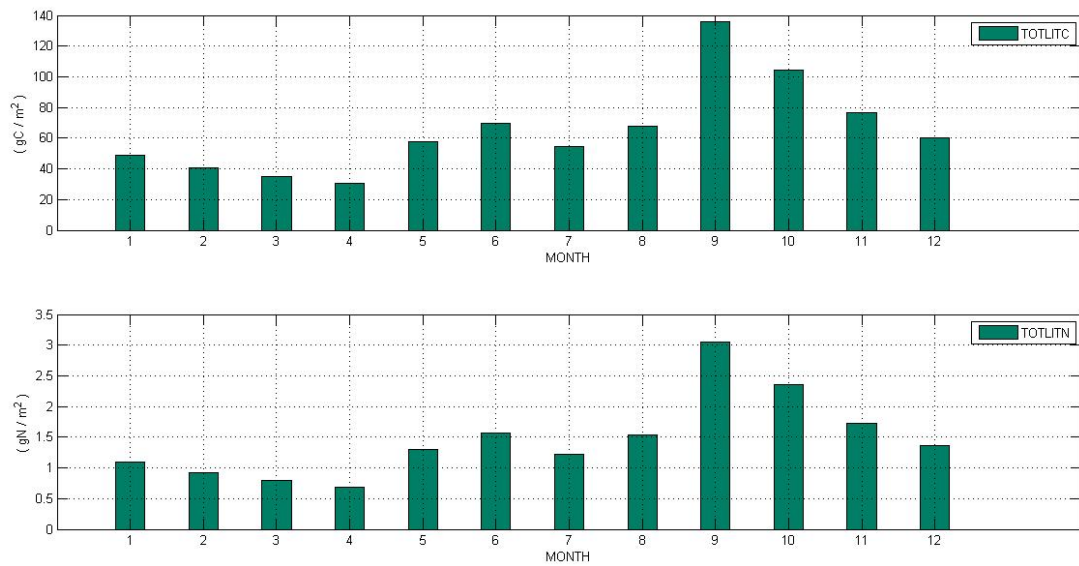


Figura 3.18 Andamento stagionale del carbonio e dell'azoto totale nella lettiera con il modello CN.

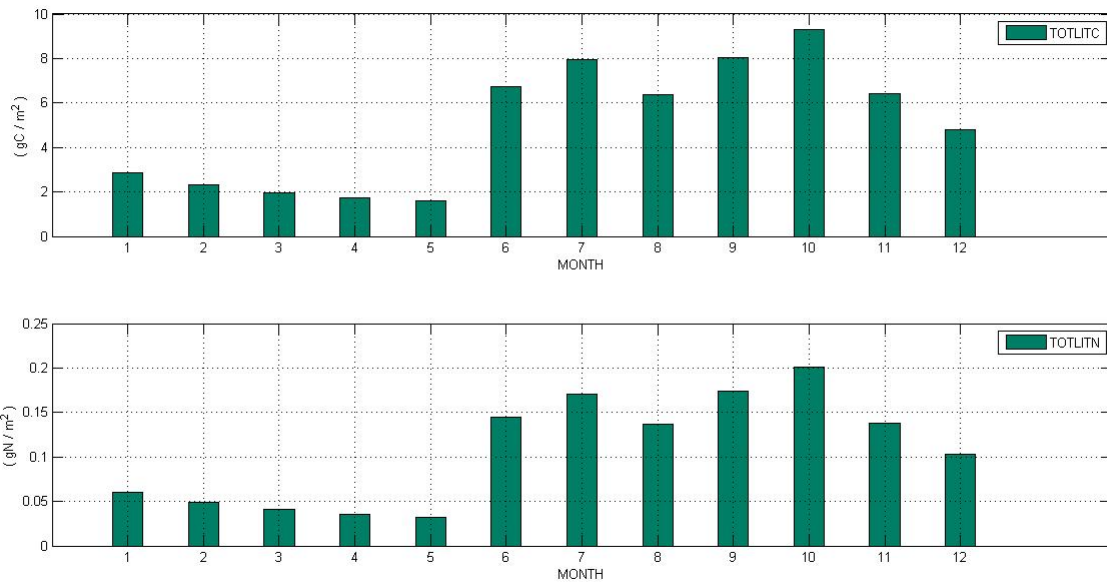


Figura 3.19 Andamento stagionale del carbonio e dell'azoto totale nella lettiera con il modello CNDV.

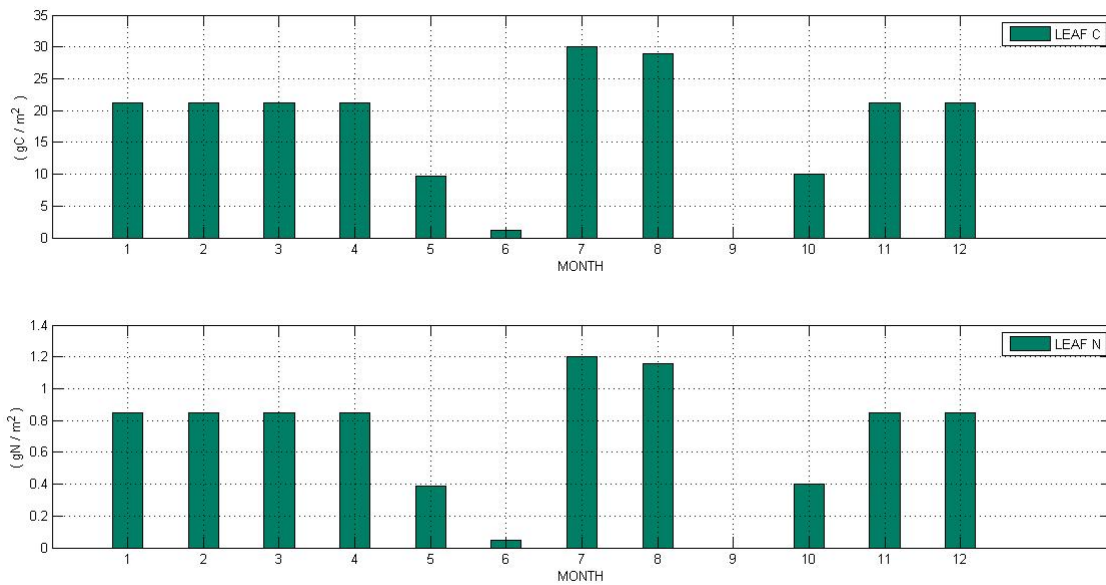


Figura 3.20 Andamento stagionale del carbonio e dell'azoto al livello della foglia con il modello CN.

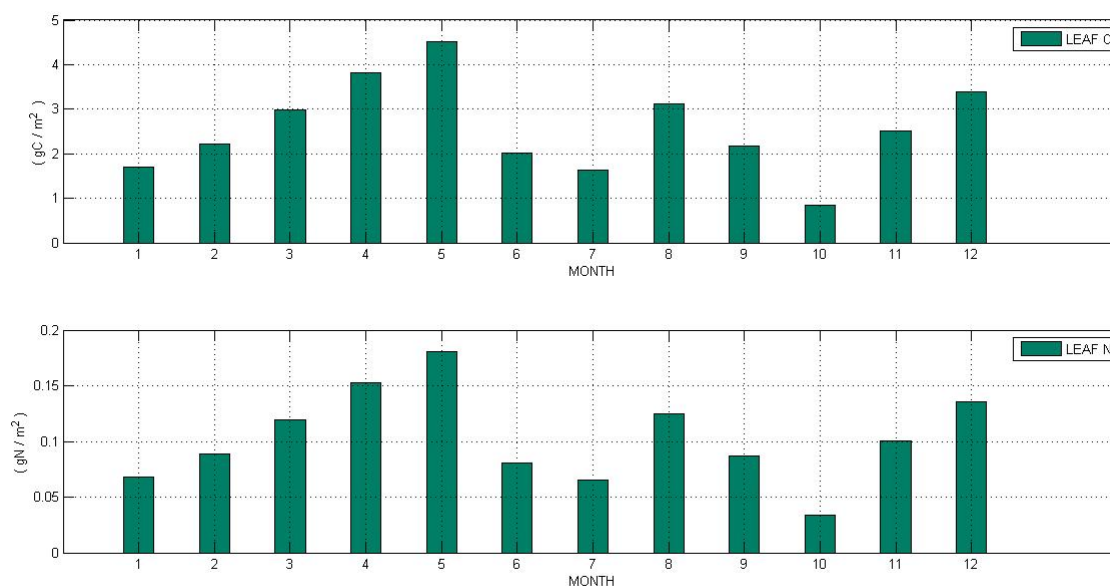


Figura 3.21 Andamento stagionale del carbonio e dell'azoto al livello della foglia con il modello CNDV.

Il ciclo dell'azoto di un ecosistema terrestre è complicato a causa delle differenti forme nelle quali l'azoto può presentarsi e a causa della molteplicità dei percorsi tra di esse. Nella maggior parte degli ecosistemi terrestri il serbatoio più grande di azoto è quello organico nel suolo. Il valore ottenuto per il CN è di circa 336,7 (gN m⁻²) e per il CNDV è di circa 38,1 (gN m⁻²). Con il modello CN il valore del serbatoio di azoto per il livello dei PFT è di circa 7,8 (gN m⁻²) e di 1,5 (gN m⁻²) per la lettiera. Con il modello CNDV il valore del serbatoio di azoto per il livello dei PFT è di circa 0,5 (gN m⁻²) e di 0,1 (gN m⁻²) per la lettiera. Il CLM considera inoltre i fenomeni di mineralizzazione lorda e netta dell'azoto minerale nel suolo (Figura 3.22 e Figura 3.23), di immobilizzazione e di denitrificazione (Figura 3.24 e Figura 3.25), di deposizione atmosferica dell'azoto nel suolo e il prelievo di azoto da parte della pianta (Figura 3.26 e Figura 3.27). Nelle simulazioni del CN la mineralizzazione lorda annuale è pari a 8,5 (gN m⁻² yr⁻¹) e quella netta a 3,9 (gN m⁻² yr⁻¹). Il valore annuale dell'immobilizzazione risulta essere di 4,6 (gN m⁻² yr⁻¹) e di circa 1,05 (gN m⁻² yr⁻¹) per la denitrificazione. Il prelievo di azoto nel suolo ad opera della pianta è risultato essere di quasi 4,0 (gN m⁻² yr⁻¹). L'azoto minerale contenuto nel suolo è di 0,006 (gN m⁻²) mentre quello depositato dall'atmosfera è di 0,4 (gN m⁻² yr⁻¹).

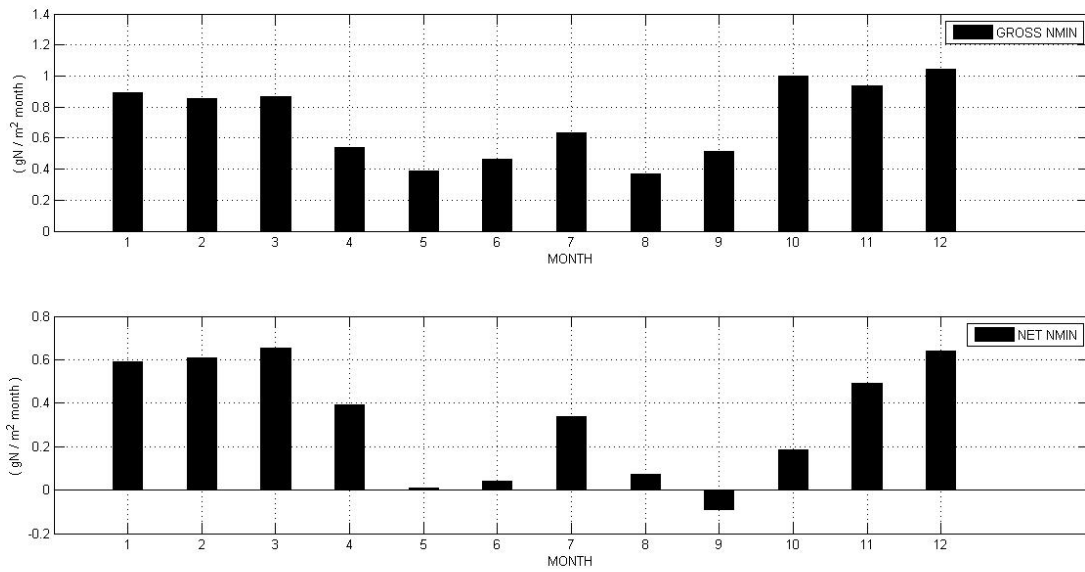


Figura 3.22 Andamento stagionale del tasso di mineralizzazione lorda e netta con il modello CN.

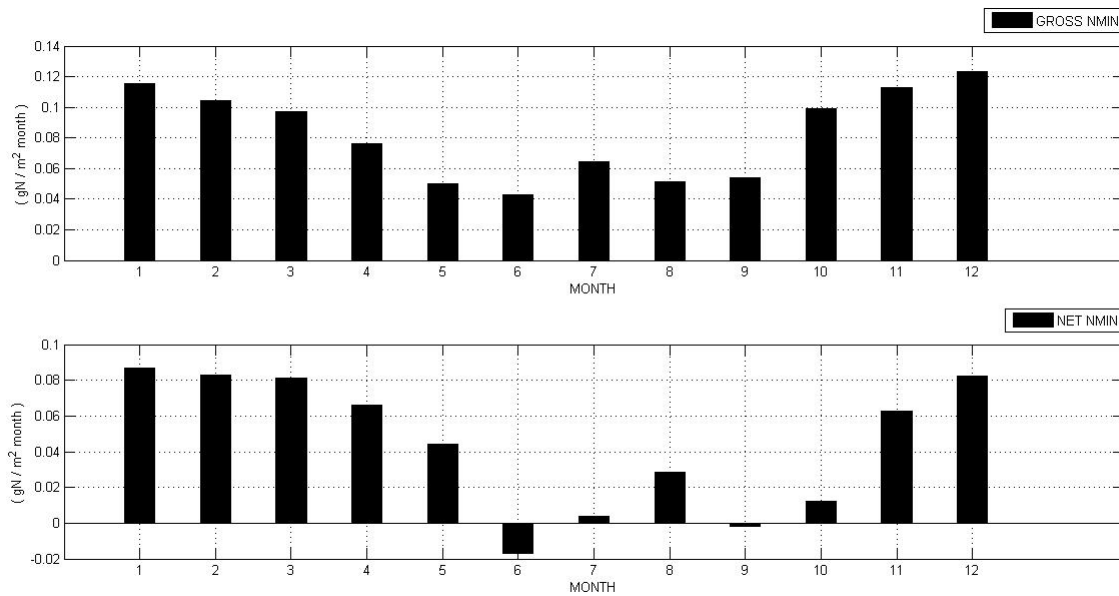


Figura 3.23 Andamento stagionale della mineralizzazione lorda e netta con il modello CNDV.

Nelle simulazioni del CNDV gli andamenti relativi ai fenomeni di mineralizzazione lorda e netta (Figura 3.23), di immobilizzazione e di denitrificazione (Figura 3.25) sono simili agli

andamenti del modello CN ma anche in questo caso la sottostima dell'ordine di grandezza è evidente.

La deposizione di azoto dall'atmosfera è la stessa prevista dal modello CN ed è uguale a circa 0,4 (gN m⁻² yr⁻¹). Il prelievo di azoto minerale nel terreno da parte della pianta è invece pari a 0,8 (gN m⁻² yr⁻¹) più piccolo se confrontato con circa 4,0 (gN m⁻² yr⁻¹) del modello CN. Il valore di mineralizzazione nel suolo è 0,001 (gN m⁻²) rispetto a 0,006 (gN m⁻²) ottenuto in precedenza.

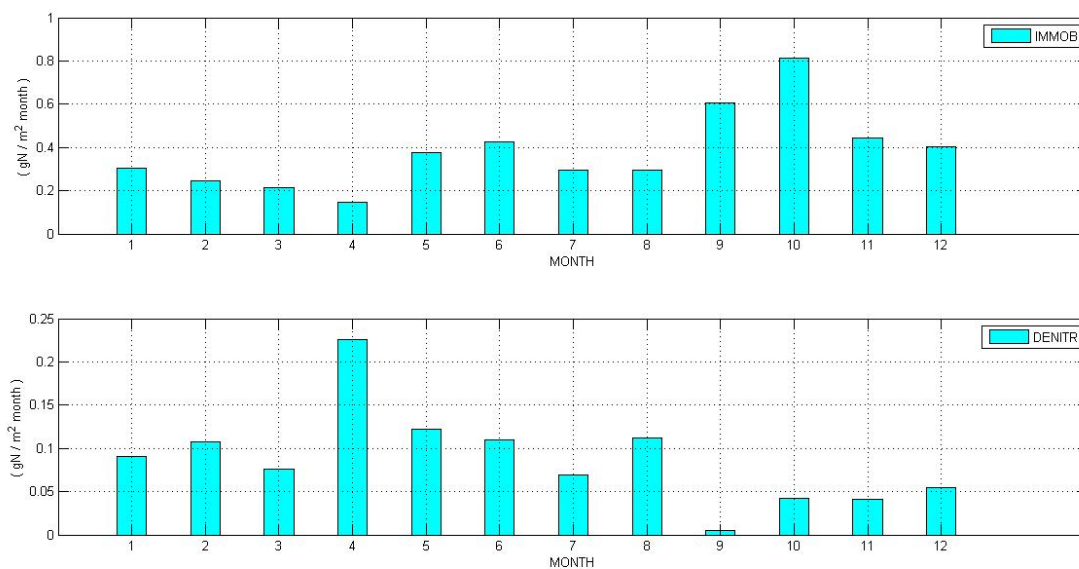


Figura 3.24 Andamento stagionale dell'immobilizzazione e della denitrificazione con il modello CN.

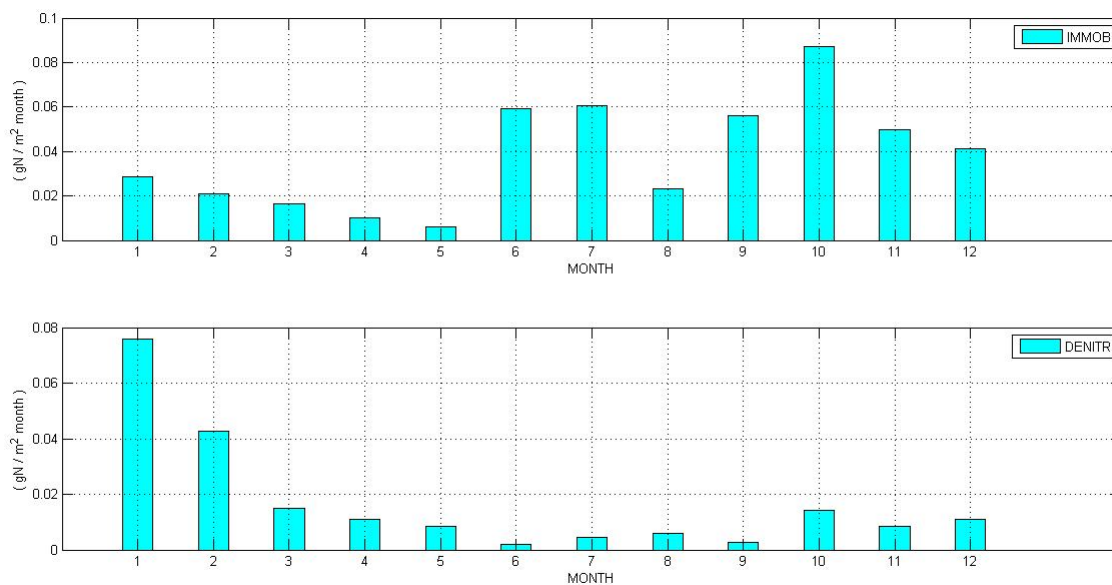


Figura 3.25 Andamento stagionale dell'immobilizzazione e della denitrificazione con il modello CNDV.

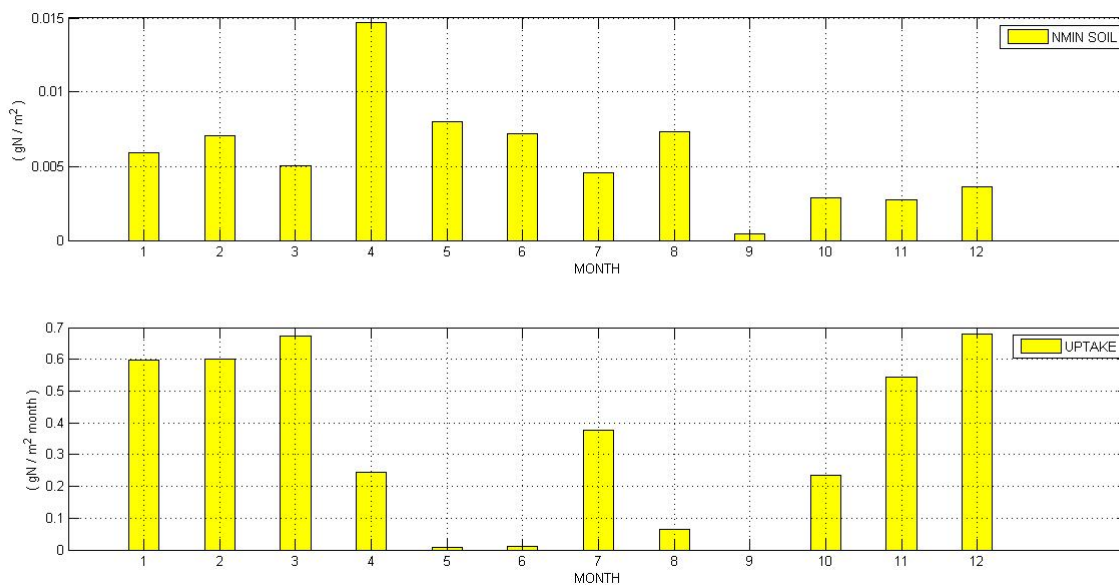


Figura 3.26 Andamento stagionale della mineralizzazione di azoto nel suolo e del prelievo da parte della pianta di azoto minerale dal suolo con il modello CN.

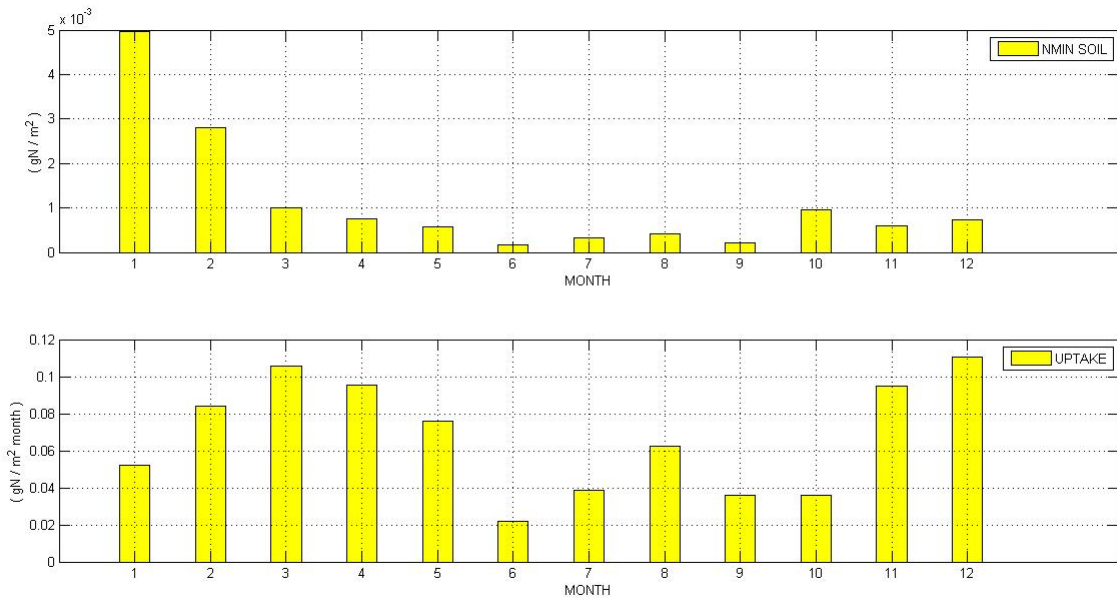


Figura 3.27 Andamento stagionale della mineralizzazione di azoto nel suolo e del prelievo da parte della pianta di azoto minerale dal suolo con il modello CNDV.

Si sono riportate infine le quantità di carbonio e di azoto perse nel corso degli incendi (Figura 3.28).

Per il sito di Skukuza il modello CLM ha evidenziato degli incendi nei mesi di Agosto, Settembre e Ottobre, nel corso quindi della stagione umida calda. Per il carbonio si è registrato un valore di circa 0,1 (gC m⁻² yr⁻¹) e per l'azoto un valore di circa 0,04 (gN m⁻² yr⁻¹) al livello dei PFT.

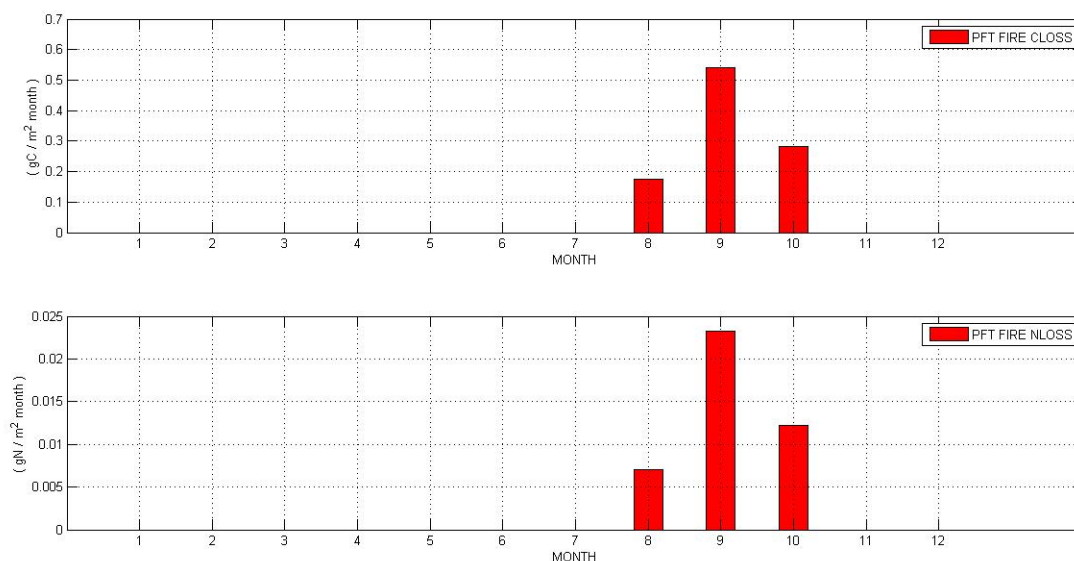


Figura 3.28 Andamento stagionale del carbonio e dell’azoto persi negli incendi al livello dei PFT con il modello CN.

Per concludere si nota come per la simulazione CNDV non si è riportata la quantità di carbonio e di azoto persa nel corso degli incendi poiché si è riscontrato che quest’ ultima è nulla. Questo risultato sembra essere dovuto al fatto che nelle simulazioni con il modello dinamico di vegetazione globale CNDV, essendo la produttività primaria inferiore si ha di conseguenza anche una quantità più piccola di combustibile. Tale quantità evidentemente si è rivelata insufficiente per la formazione sistematica di incendi.

Tabella 3.4. Valori annuali delle variabili relative ai cicli biogeochimici di carbonio (C) e azoto (N) ottenuti con il modello CLM per la simulazione effettuata a Skukuza. Nell’ ultima colonna sono riportati i valori di riferimento in letteratura.

SKUKUZA	CN	CNDV	Scholes and Walker (1993)
Caduta sulla lettiera (gC m ⁻² yr ⁻¹)	171,5	17,7	139
Serbatoio di C materia organica del suolo	3375	336,7	6784

(gC m ⁻²)			
Serbatoio di N materia organica del suolo (gN m ⁻²)	336,7	38,1	306
Serbatoio di C al livello PFT (gC m ⁻²)	212,6	13,5	175,76
Serbatoio di N al livello PFT (gN m ⁻²)	7,8	0,5	7,92
Serbatoio di C al livello lettiera (gC m ⁻²)	65,2	5	475-723
Serbatoio di N al livello lettiera (gN m ⁻²)	1,5	0,1	7
Serbatoio di C al livello foglia (gC m ⁻²)	17,2	2,6	100
Serbatoio di N al livello foglia (gN m ⁻²)	0,7	0,1	2
C perso negli incendi al livello PFT (gC m ⁻² yr ⁻¹)	0,9	0	10
N perso negli incendi al livello PFT (gN m ⁻² yr ⁻¹)	0,04	0	0,5
Mineralizzazione di N netta (gN m ⁻² yr ⁻¹)	3,9	0,5	3,5
Immobilizzazione (gN m ⁻² yr ⁻¹)	4,6	0,4	1-10
Denitrificazione (gN m ⁻² yr ⁻¹)	1,05	0,2	0,4
Deposizione N atmosferico (gN m ⁻² yr ⁻¹)	0,4	0,4	0,1-0,5
Prelievo di N minerale operato dalla pianta (gN m ⁻² yr ⁻¹)	4,0	0,8	4,0-5,8

Dalla (Tabella 3.4) emerge chiaramente come le variabili relative ai cicli biogeochimici assumono valori diversi a seconda della configurazione utilizzata. In particolare, quasi tutti i serbatoi di carbonio e di azoto sono risultati maggiori per il modello CN e il confronto con i dati disponibili in letteratura ha evidenziato che, per il sito Skukuza, il modello dinamico di vegetazione ha sottostimato notevolmente tali serbatoi. Ad eccezione per la deposizione atmosferica di azoto e per la denitrificazione, la sottostima da parte del CNDV si è riscontrata anche per i fenomeni di mineralizzazione netta, per l'immobilizzazione e per il prelievo da parte della pianta. Per quanto riguarda il modello biogeochimico CN, il confronto con i dati

disponibili ha mostrato che il CLM è riuscito a cogliere non solo gli ordini di grandezza di molte variabili ma in alcuni casi la stima del valore simulato si è rivelata coerente con il valore osservato. Soltanto i serbatoi relativi al livello della lettiera e della foglia hanno fatto registrare valori inferiori a quelli di riferimento.

Come già accennato precedentemente, non bisogna trascurare alcuni fattori importanti come la quantità di precipitazione annuale a Skukuza (419,6 mm yr⁻¹) che è differente rispetto a quella della zona del sito Nylsvley (585,8 mm yr⁻¹). La quantità di acqua disponibile durante l'anno influenza il funzionamento dell'ecosistema, controllando la durata per cui possono avvenire fenomeni quali la produttività e la mineralizzazione. Inoltre la posizione geografica di Nylsvley (24° 39' S, 28° 42' E) non coincide perfettamente con quella di Skukuza (25° 1' S, 31° 30' E). Infine il sito Skukuza è caratterizzato dalla presenza di due tipi di savana: una classificata come savana di latifoglie (*broad-leafed savanna*) e l'altra come savana di conifere (*fine-leafed savanna*). Questa seconda tipologia di savana è più produttiva della prima al livello della produttività relativa ai PFT. Per ovvie ragioni i valori di produttività simulati dal CLM vanno considerati rappresentativi di un'area che è molto estesa (100 km per 100 km) e che può contenere al suo interno entrambi i tipi di savana sopra citati. Queste considerazioni potrebbero giustificare la differenza nei valori di produzione primaria netta tra Skukuza e Nylsvley.

3.4 Simulazione nel bioma prateria

Il bioma grassland (prateria) occupa principalmente l'alta pianura centrale del Sud Africa e le aree interne di KwaZuluNatal e di Eastern Cape. La topografia è soprattutto piana e l'altitudine varia fino a 2850 (m) sul livello del mare. Le grassland (Figura 3.30) sono dominate da un singolo strato erboso. Il grado di copertura dipende dalla precipitazione e dal

pascolo. Gli alberi sono assenti eccetto in pochi habitat localizzati. Il gelo, gli incendi e il pascolo conservano il dominio delle specie erbose prevenendo lo stabilimento di alberi. Il sito scelto per la simulazione con il CLM si trova nella regione del Lesotho e dista circa 270 (km) dall'Oceano Indiano. Le coordinate scelte per il punto su cui centrare la griglia corrispondono a (29.50 S, 28.50 E).

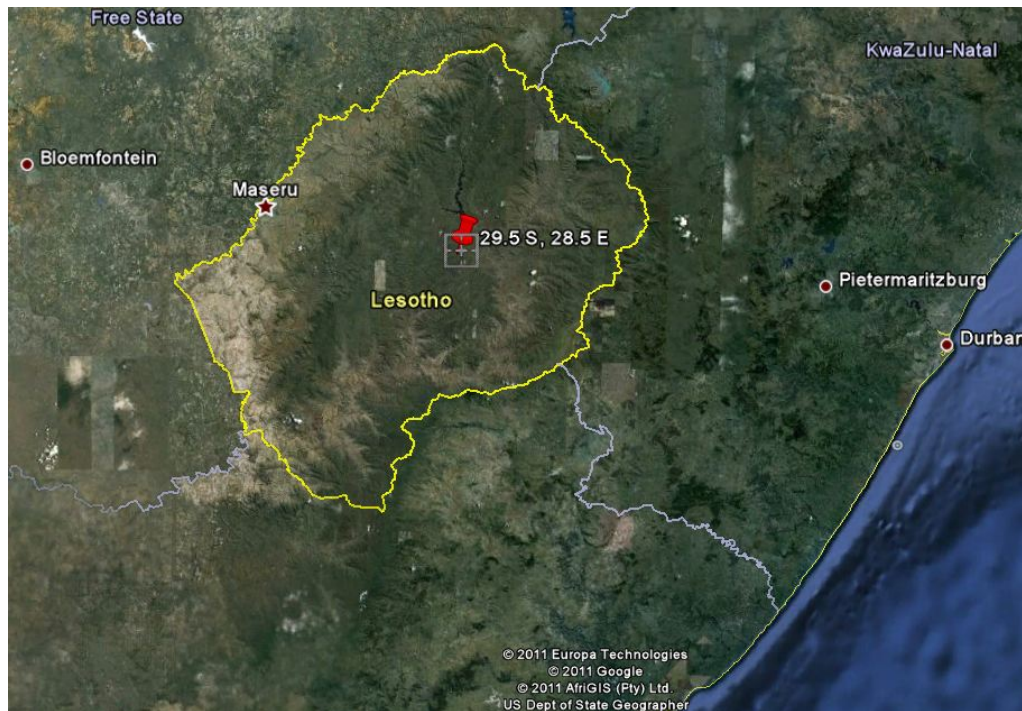


Figura 3.29 Localizzazione del sito nella zona del Lesotho (grassland).



Figura 3.30 Vegetazione tipica del bioma grassland.

3.4.1 Idrologia

La precipitazione per le simulazioni nell'area del Lesotho è ancora quella dell'anno 2003 del dataset QIAN (Figura 3.31) ed è pari a circa 535,44 (mm yr⁻¹).

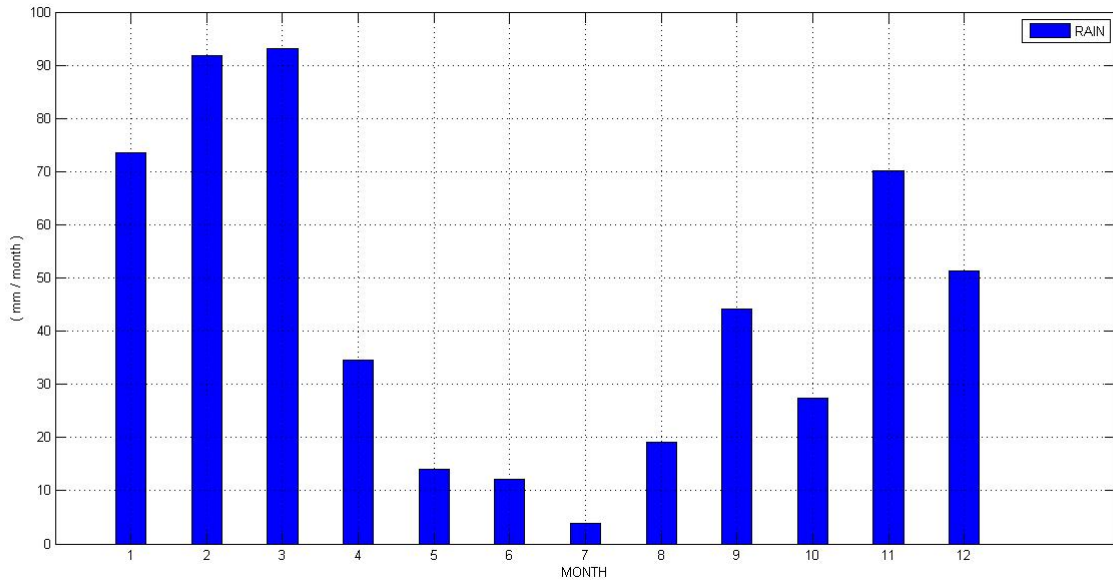


Figura 3.31 Andamento stagionale della precipitazione usata come input per le simulazioni con il modello CN e con il modello CNDV.

Il valore annuale del contenuto volumetrico d'acqua nel suolo è di circa il 10,7% per entrambe le configurazioni (CN e CNDV). L'andamento stagionale è pressoché identico (Figura 3.32 e Figura 3.33). I flussi di traspirazione (Figura 3.34 e Figura 3.35) sia nel CN che CNDV sono superiori a quelli di evaporazione della chioma. Il contributo di evaporazione del suolo (Figura 3.34 e Figura 3.35) è sempre maggiore dei flussi relativi alla vegetazione.

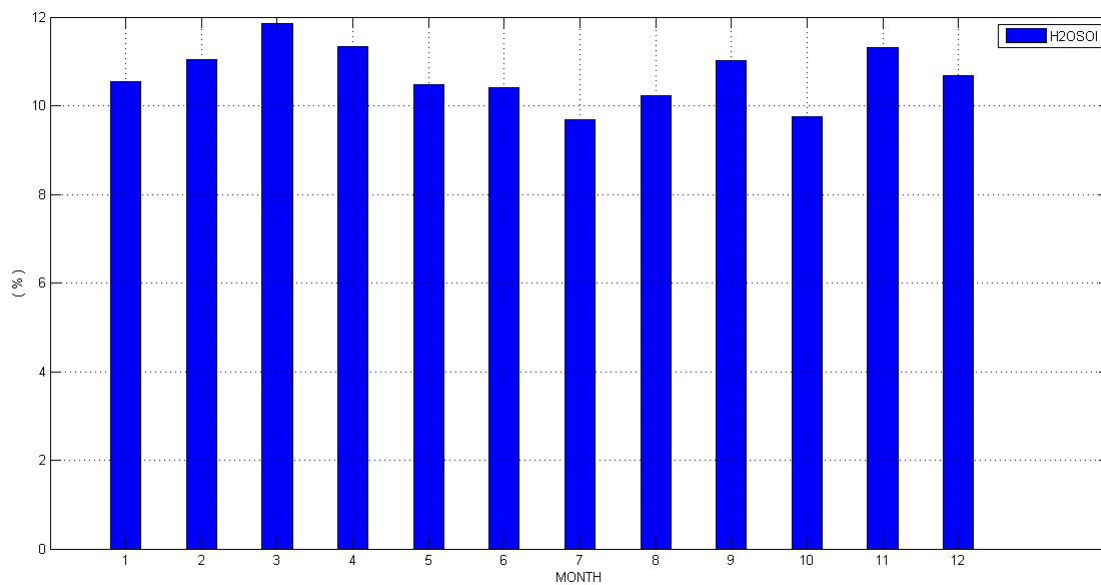


Figura 3.32 Andamento stagionale del contenuto volumetrico d'acqua nel suolo con il modello CN.

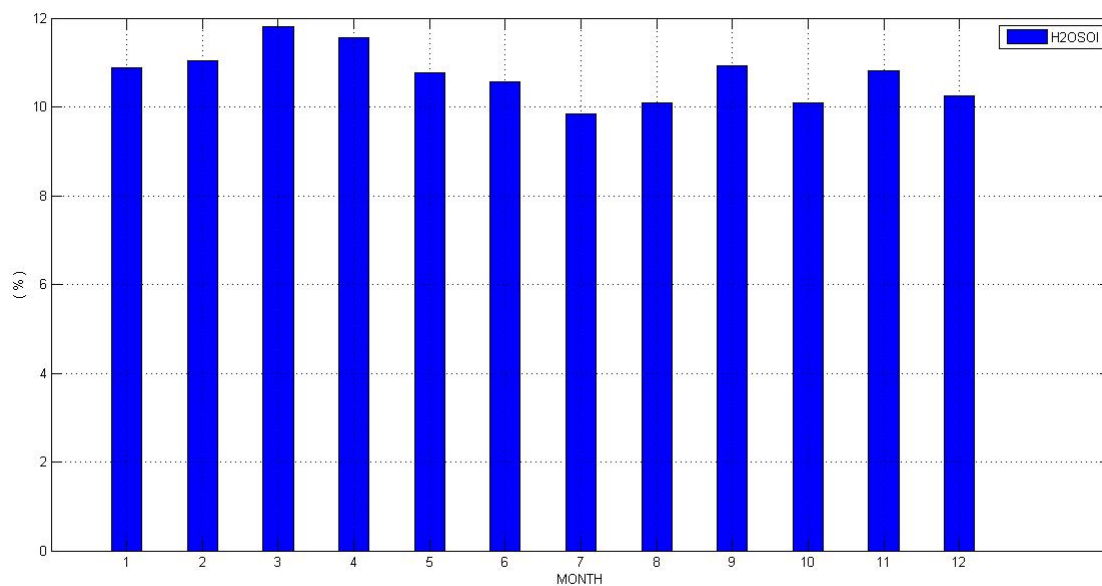


Figura 3.33 Andamento stagionale del contenuto volumetrico d'acqua nel suolo con il modello CNDV .

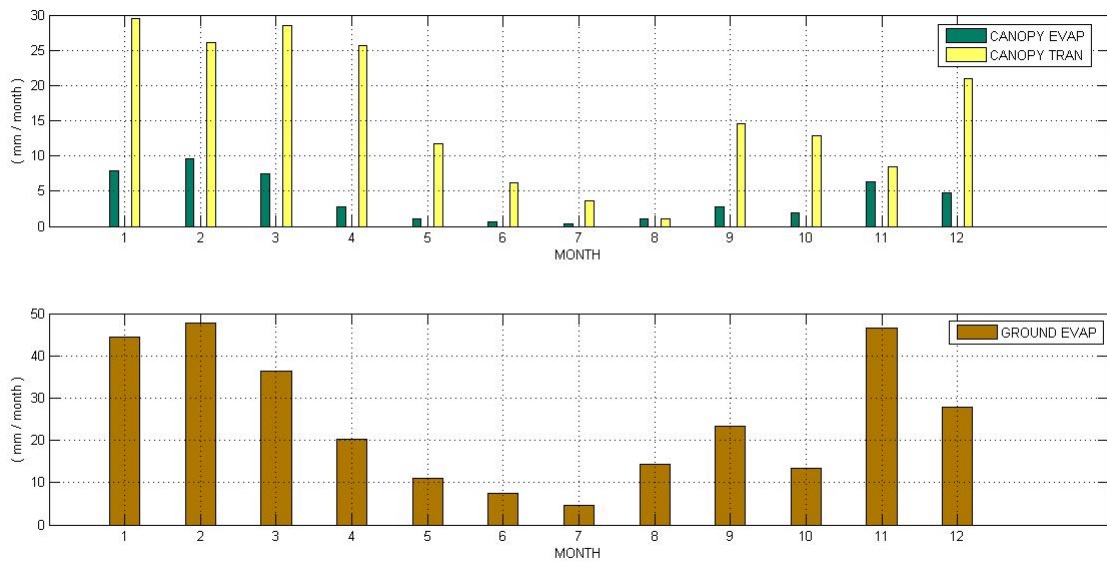


Figura 3.34 Andamento stagionale dell'evaporazione e della traspirazione della chioma e dell'evaporazione del terreno con il modello CN.

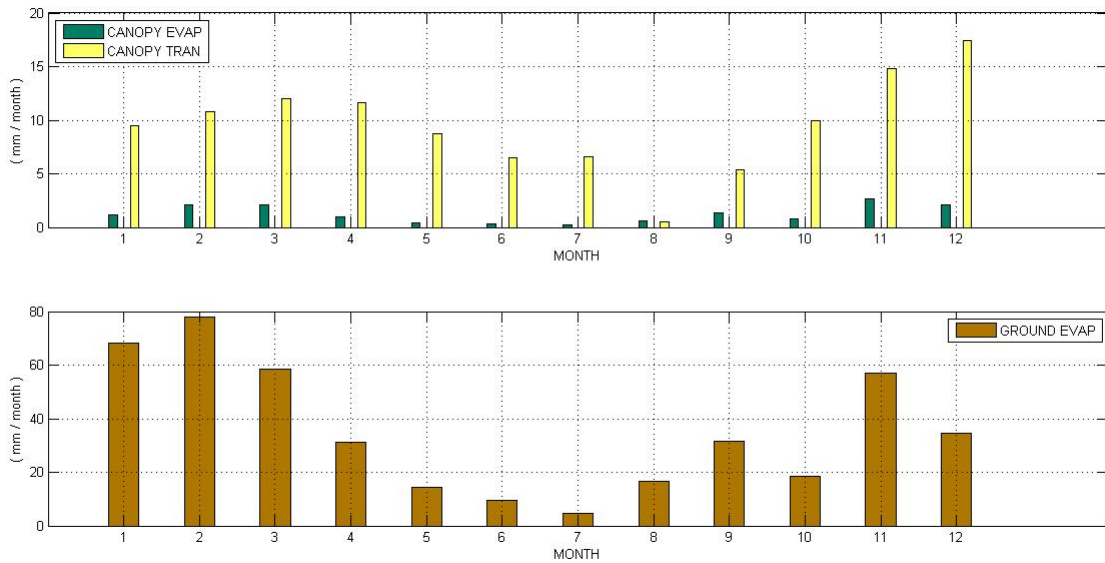


Figura 3.35 Andamento stagionale dell'evaporazione e della traspirazione della chioma e dell'evaporazione del terreno con il modello CNDV.

Tabella 3.5. Valori annuali delle variabili idrologiche ottenuti con il modello CLM per la simulazione effettuata a Lesotho.

LESOTHO	CN	CNDV
Precipitazione (mm yr ⁻¹)	535,44	535,44
Evaporazione vegetazione (mm yr ⁻¹)	46,0	14,7
Evaporazione suolo (mm yr ⁻¹)	297,0	422,6
Traspirazione vegetazione (mm yr ⁻¹)	189,0	113,7

Per questa simulazione gli ordini di grandezza delle variabili idrologiche sono gli stessi sia con il modello CN che con il modello CNDV. I valori simulati con il modello biogeochimico per la vegetazione sono risultati superiori rispetto al modello dinamico di vegetazione. Si è invece registrato un valore più elevato con il CNDV per quanto riguarda il suolo.

3.4.2 Produttività della vegetazione

Nella simulazione con il CN il valore annuale della produzione primaria netta NPP è risultato essere di circa 120 ($\text{gC m}^{-2} \text{yr}^{-1}$) (Figura 3.36) contro i circa 54,9 ($\text{gC m}^{-2} \text{yr}^{-1}$) ottenuti per la simulazione con il CNDV (Figura 3.37).

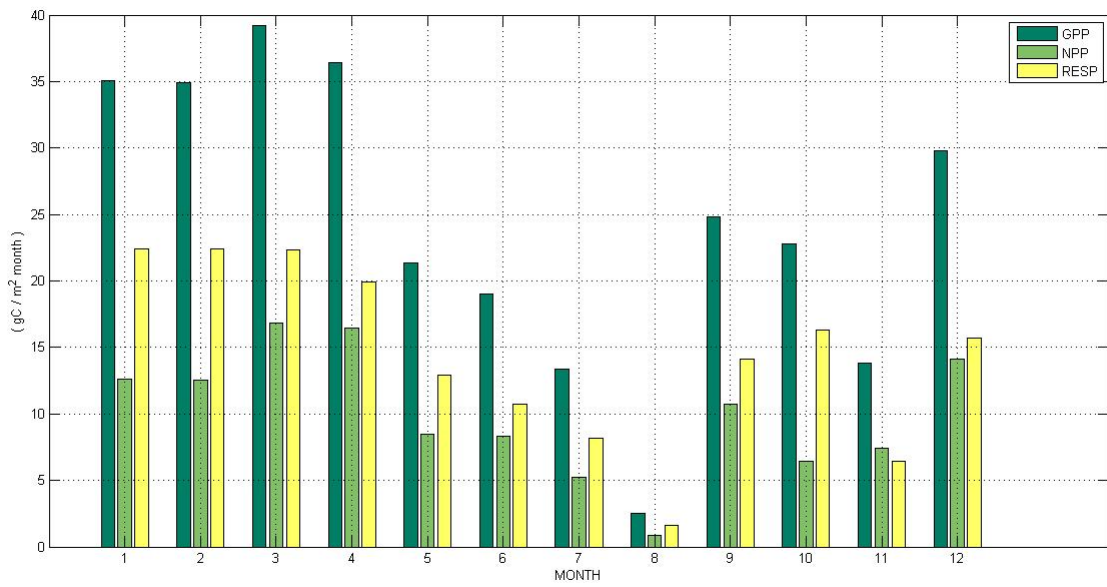


Figura 3.36 Andamento stagionale della produzione primaria lorda (GPP), della produzione primaria netta (NPP) e della respirazione autotrofa (AR) con il modello CN.

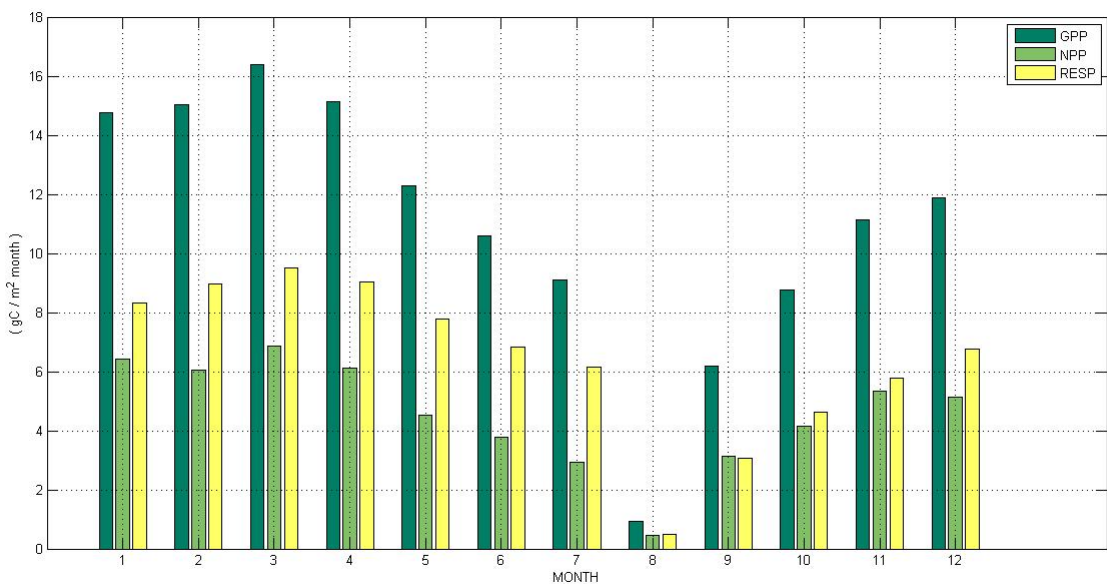


Figura 3.37 Andamento stagionale della produzione primaria lorda (GPP), della produzione primaria netta (NPP) e della respirazione autotrofa (AR) con il modello CNDV.

Il LAI è circa 0,8 (m^2 leaf area m^{-2} ground area) nella configurazione del modello biogeochimico (Figura 3.38) e circa 0,4 (m^2 leaf area m^{-2} ground area) nella configurazione del modello dinamico dei vegetazione (Figura 3.39).

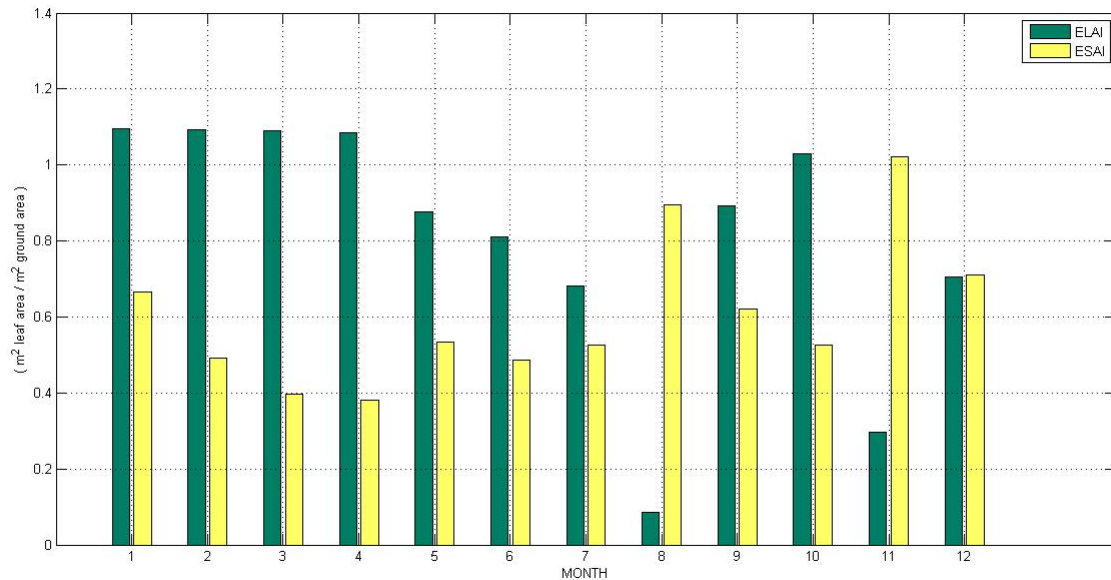


Figura 3.38 Andamento stagionale dell'indice di area fogliare (LAI) e dell'indice di area del gambo (SAI) con il modello CN.

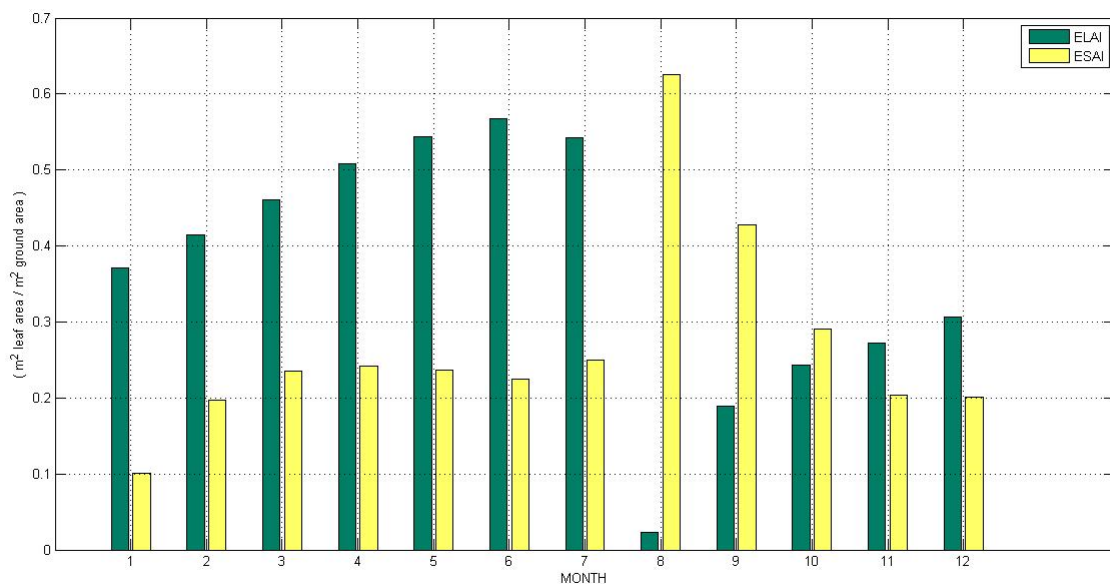


Figura 3.39 Andamento stagionale dell'indice di area fogliare (LAI) e dell'indice di area del gambo (SAI) con il modello CNDV.

Tabella 3.6. Valori annuali delle variabili relative alla produttività ottenuti con il modello CLM per la simulazione effettuata a Lesotho. Nell' ultima colonna sono riportati i valori di riferimento in letteratura.

LESOTHO	CN	CNDV	Scholes and Walker (1999)
Produzione primaria netta NPP (gC m ⁻² yr ⁻¹)	120,0	54,9	80-800
Indice di area fogliare LAI (m ² leaf area m ⁻² ground area)	0,8	0,4	1-5

Il modello CN coglie il range di produttività osservato e l'indice di area fogliare. Il modello CNDV non centra il range di produttività ma stima invece correttamente il suo ordine di grandezza. Il LAI simulato è sottostimato.

3.4.3 Cicli biogeochimici del carbonio e dell'azoto

Il fenomeno della caduta sulla lettiera (Figura 3.40 e Figura 3.41) è risultato maggiore per il CN con valore annuale pari a 139,8 (gC m⁻² yr⁻¹). Nel CNDV si è ottenuto 50,8 (gC m⁻² yr⁻¹). Come riscontrato anche nelle simulazioni a Skukuza i serbatoi di carbonio e di azoto (dalla Figura 3.40 alla Figura 3.47) presentano lo stesso andamento del ciclo stagionale sia nelle simulazioni con il CN che in quelle con il CNDV.

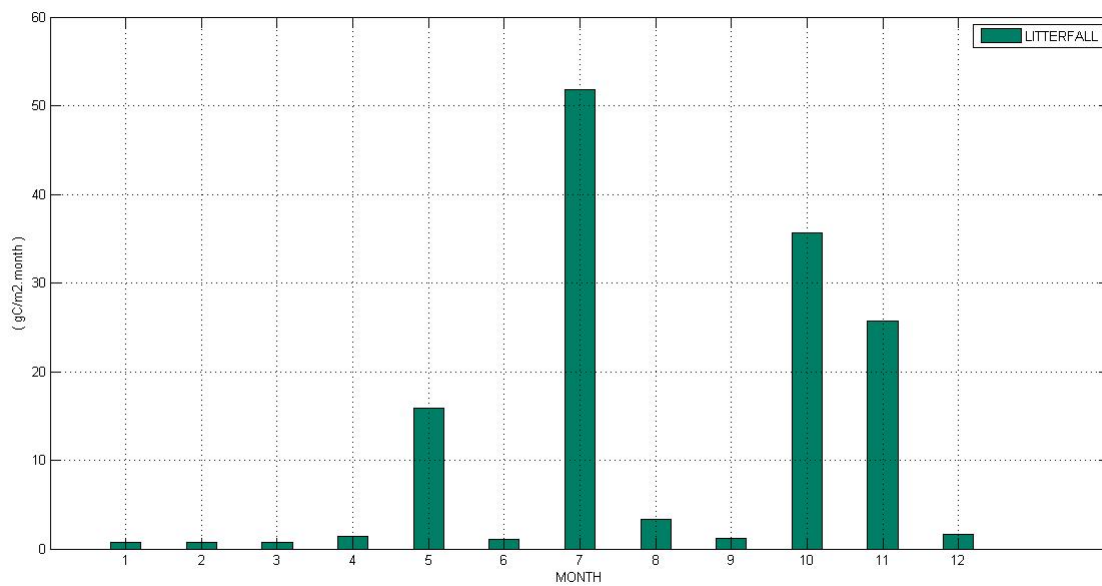


Figura 3.40 Andamento stagionale della caduta sulla lettiera con il modello CN.

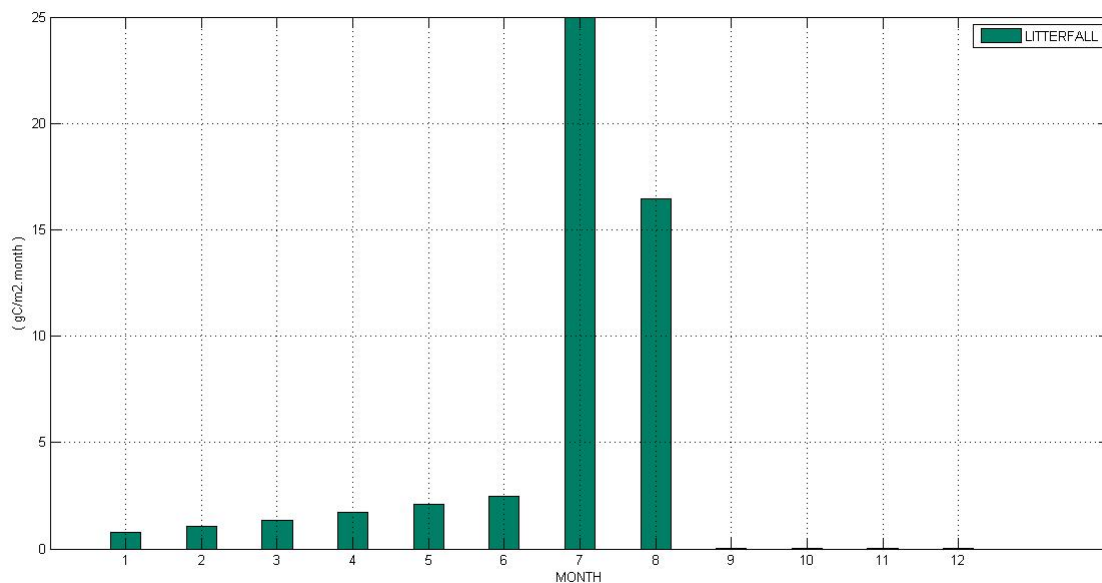


Figura 3.41 Andamento stagionale della caduta sulla lettiera con il modello CNDV.

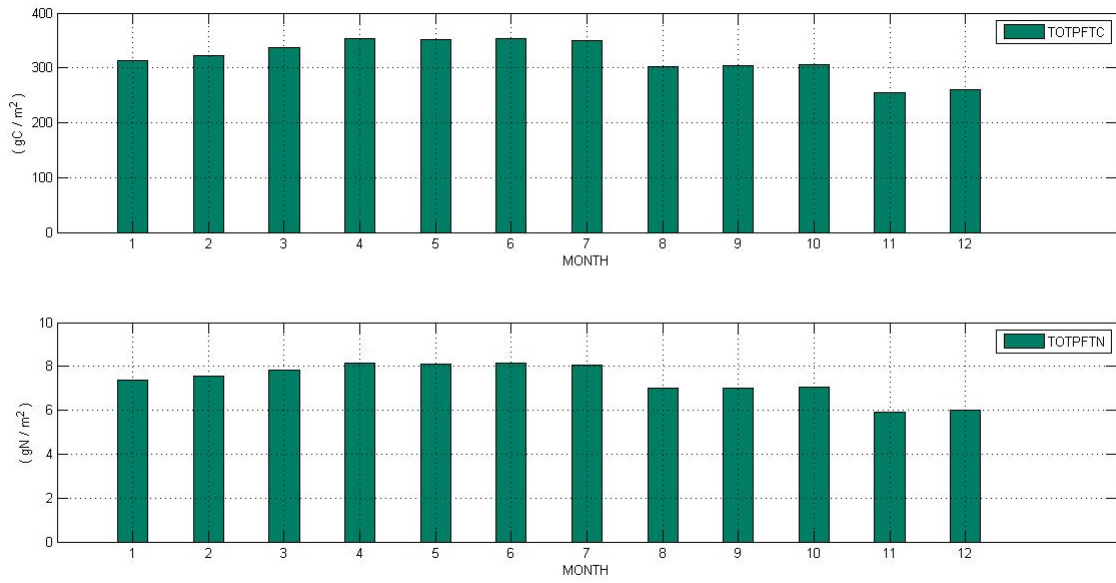


Figura 3.42 Andamento stagionale del carbonio e dell'azoto totale al livello dei PFT con il modello CN.

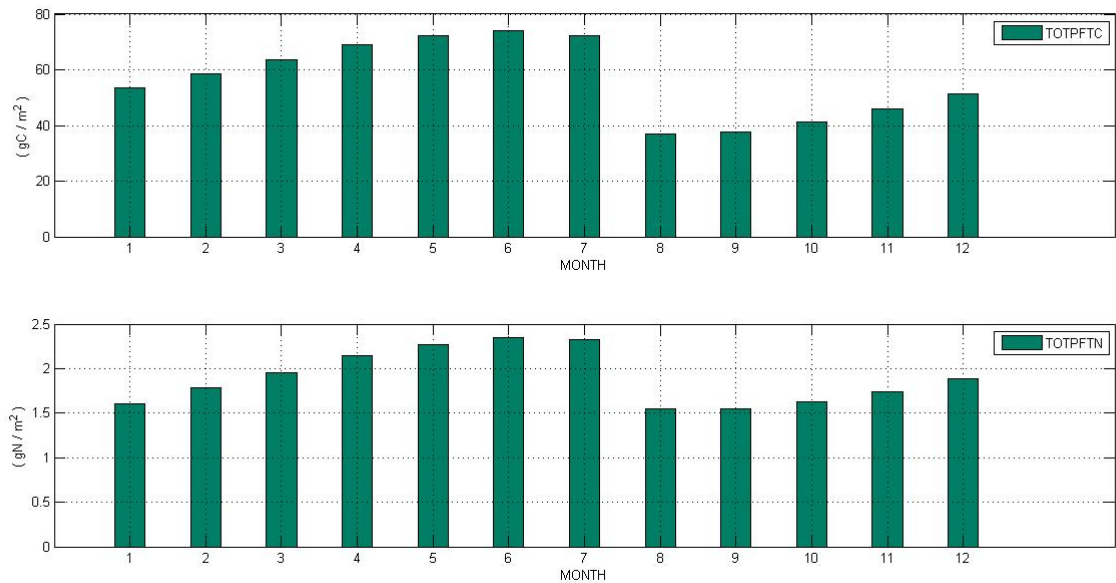


Figura 3.43 Andamento stagionale del carbonio e dell'azoto totale al livello dei PFT con il modello CNDV.

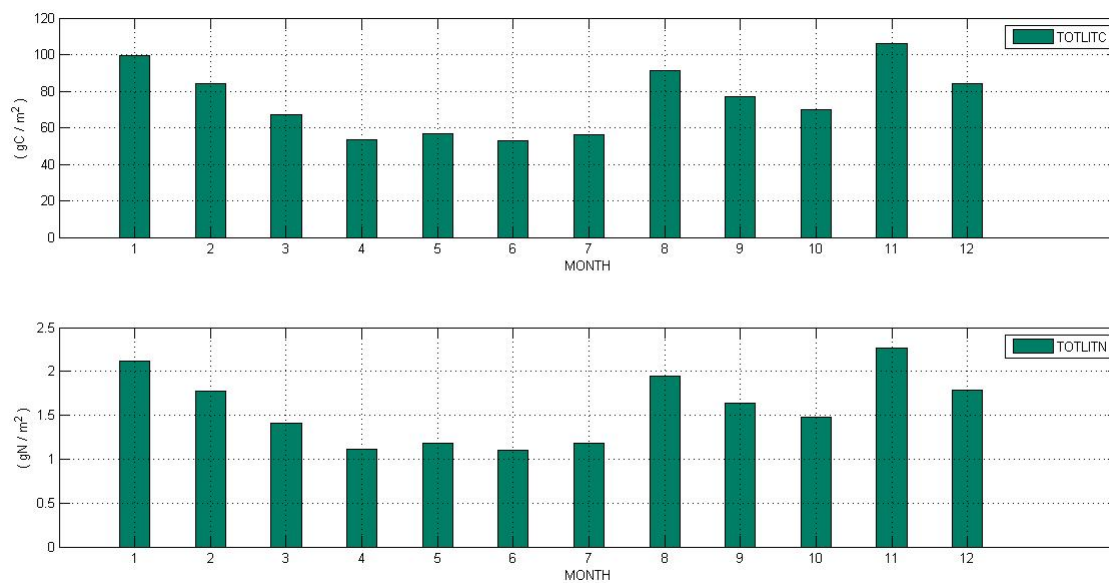


Figura 3.44 Andamento stagionale del carbonio e dell'azoto totale nella lettiera con il modello CN.

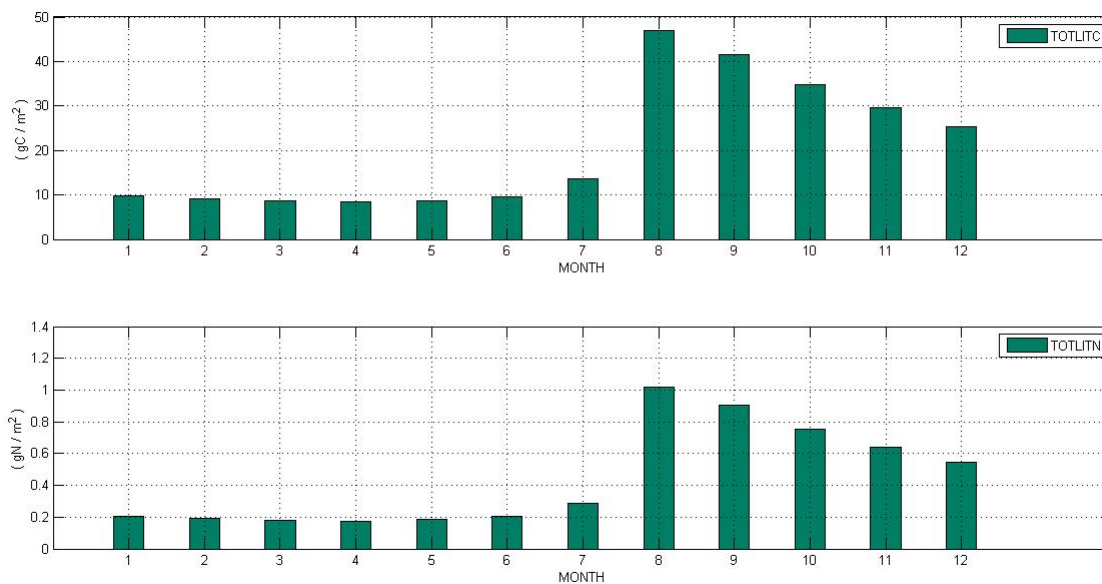


Figura 3.45 Andamento stagionale del carbonio e dell'azoto totale nella lettiera con il modello CNDV.

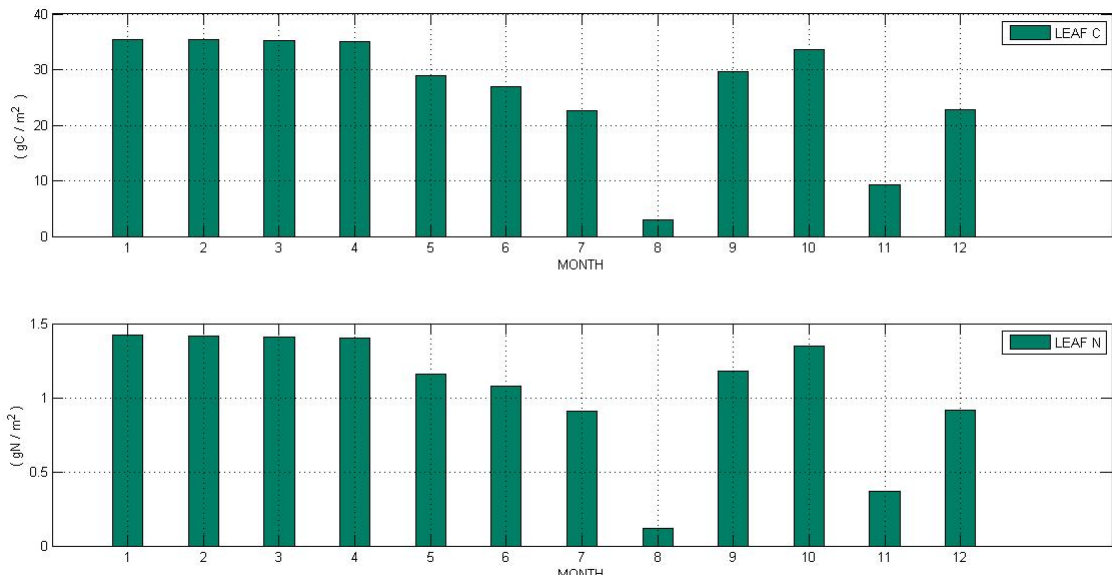


Figura 3.46 Andamento stagionale del carbonio e dell'azoto al livello della foglia con il modello CN.

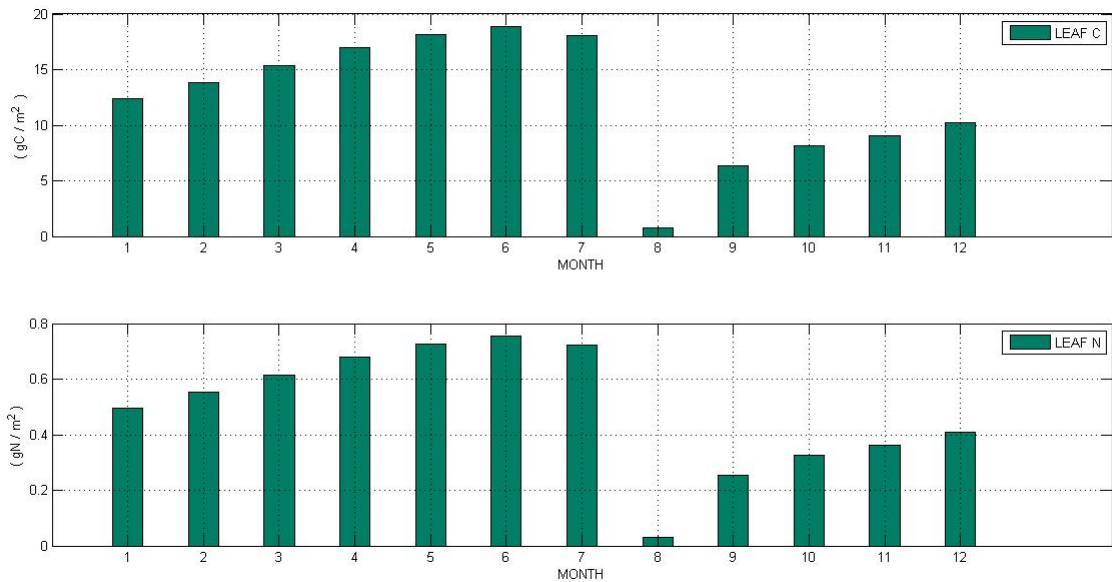


Figura 3.47 Andamento stagionale del carbonio e dell'azoto al livello della foglia con il modello CNDV.

Dal confronto dei dati delle simulazioni tra la configurazione CN e CNDV (dalla Figura 3.48 alla Figura 3.53) è emerso che le differenze maggiori si sono registrate per la mineralizzazione di azoto lorda e per l'immobilizzazione. Invece per i fenomeni di mineralizzazione di azoto netta, di denitrificazione e per il prelievo di azoto dal suolo da parte della pianta si è riscontrata una discreta coerenza nei dati ottenuti.

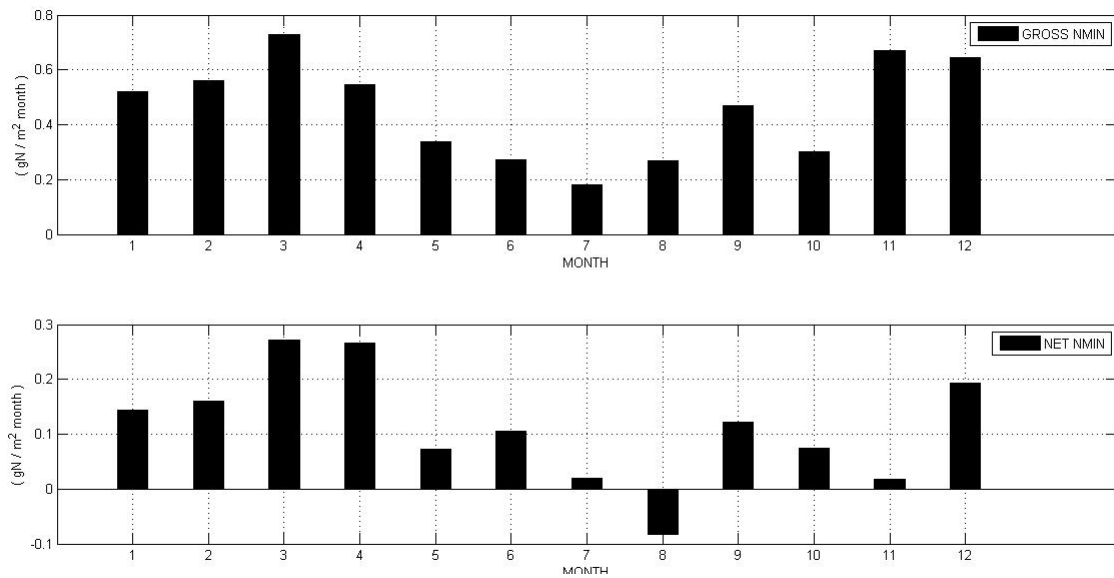


Figura 3.48 Andamento stagionale della mineralizzazione lorda e netta con il modello CN.

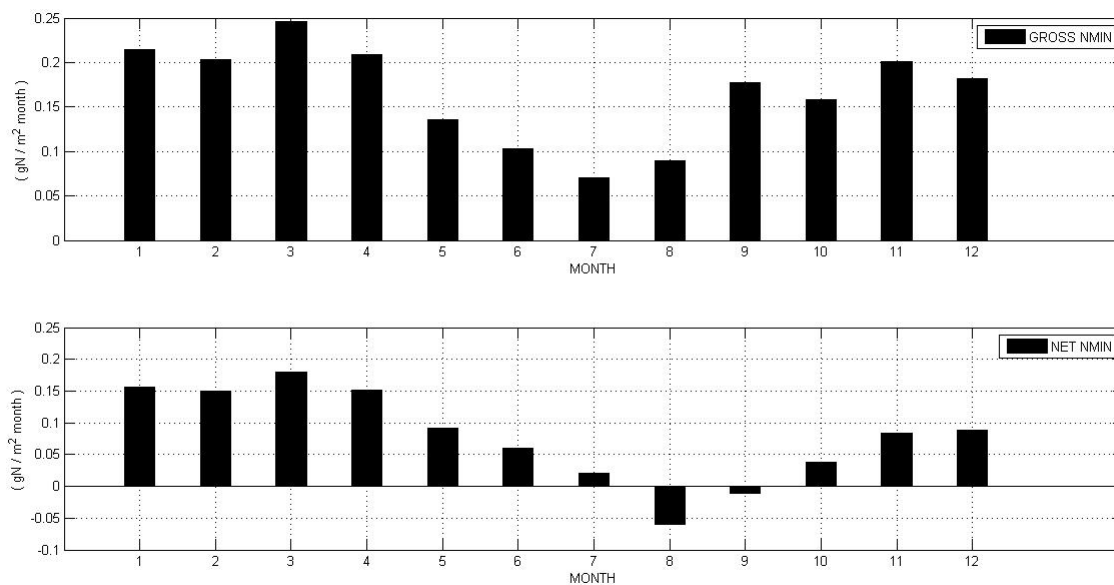


Figura 3.49 Andamento stagionale della mineralizzazione lorda e netta con il modello CNDV.

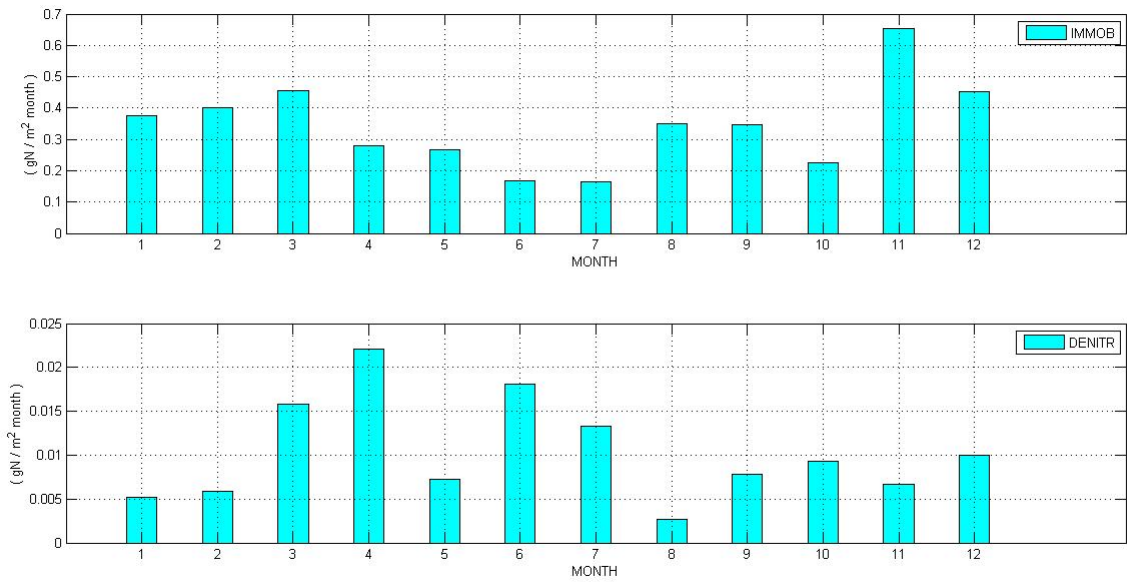


Figura 3.50 Andamento stagionale dell'immobilizzazione e della denitrificazione con il modello CN.

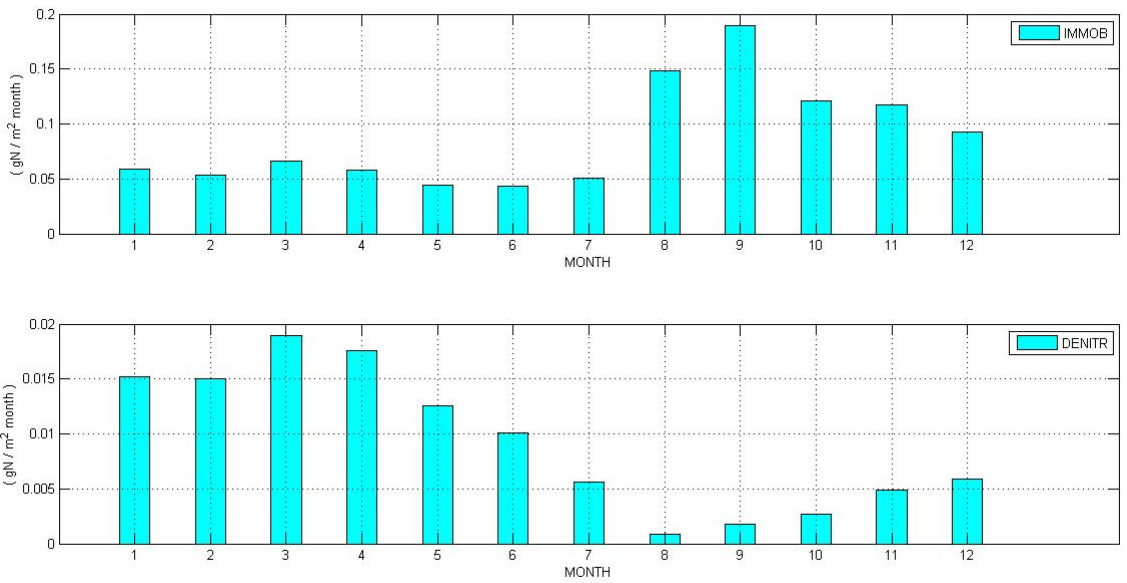


Figura 3.51 Andamento stagionale dell'immobilizzazione e della denitrificazione con il modello CNDV.

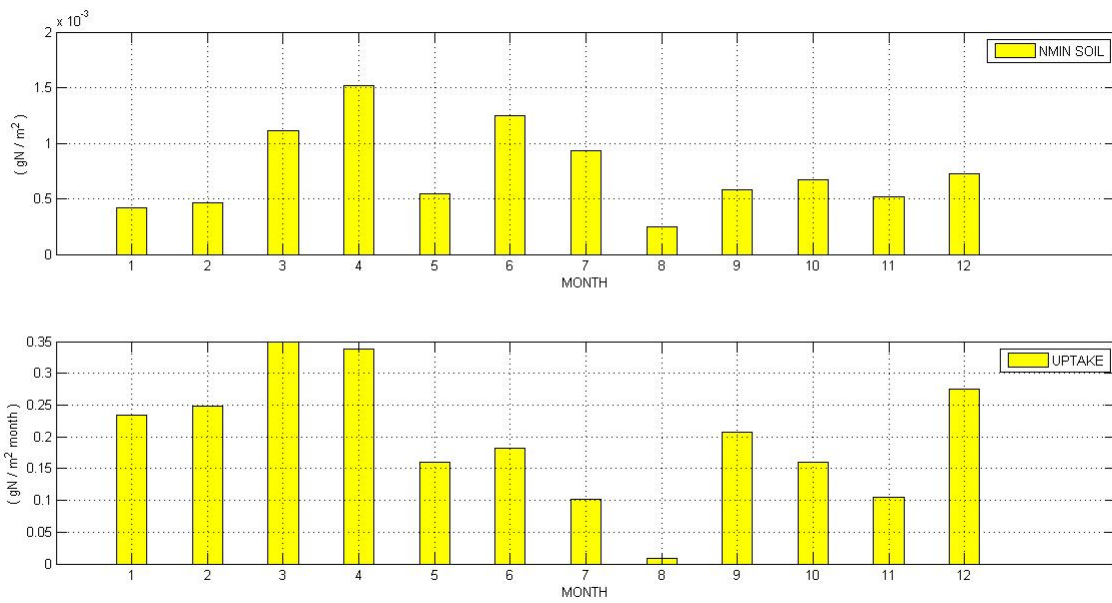


Figura 3.52 Andamento stagionale della mineralizzazione di azoto nel suolo e del prelievo da parte della pianta di azoto minerale dal suolo con il modello CN.

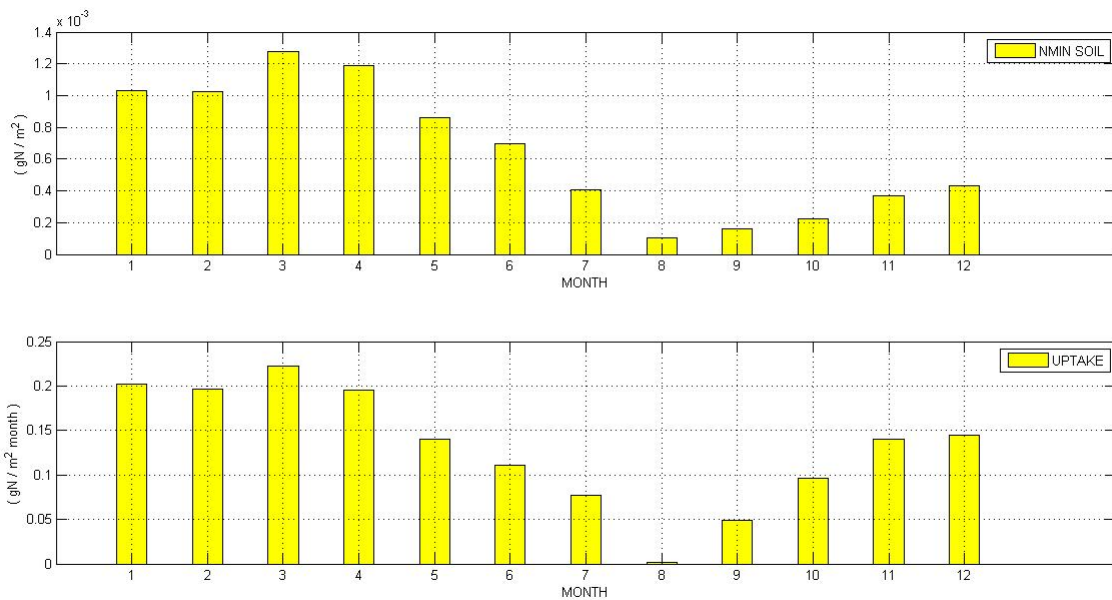


Figura 3.53 Andamento stagionale della mineralizzazione di azoto nel suolo e del prelievo da parte della pianta di azoto minerale dal suolo con il modello CNDV.

Con il modello CN si è prevista una perdita di carbonio e di azoto dovuta agli incendi pari a 18,6 (gC m⁻² yr⁻¹) e a 0,5 (gN m⁻² yr⁻¹) rispettivamente. I tassi mensili più alti si sono registrati nei mesi di Luglio, Ottobre e Dicembre (Figura 3.54).

Nelle simulazioni CNDV invece non si è riscontrata la presenza di incendi sistematici.

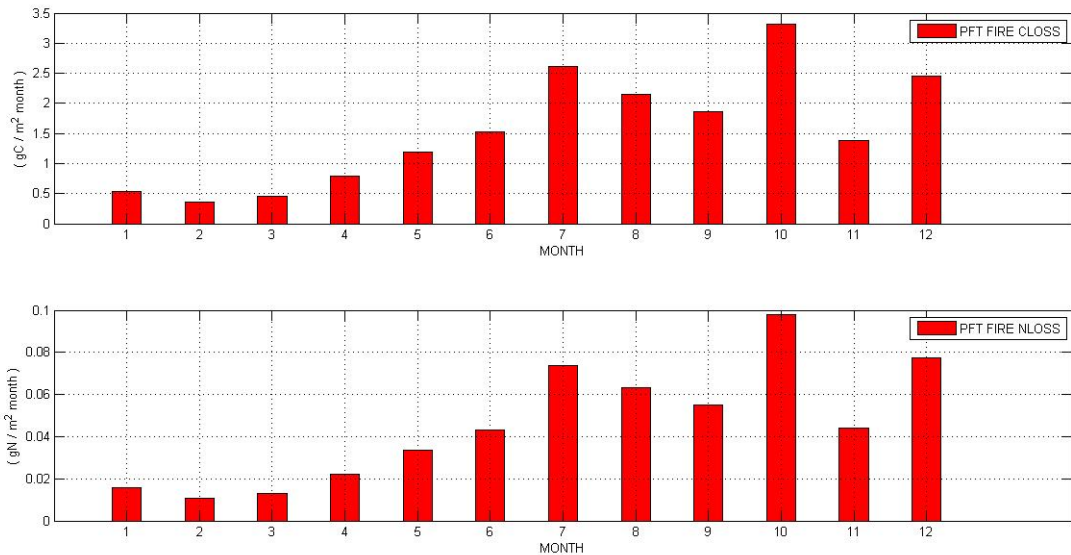


Figura 3.54 Andamento stagionale del carbonio e dell'azoto persi negli incendi al livello dei PFT con il modello CN.

Di seguito (Tabella 3.7) sono riportati i valori ottenuti per la simulazione a Lesotho. A differenza di quanto riscontrato nel bioma savana a Skukuza, dove il serbatoio di azoto al livello della foglia era l'unico coerente sia nel CN che nel CNDV, nel bioma prateria anche il serbatoio di azoto a livello dei PFT e quello di carbonio a livello della lettiera e della foglia hanno presentato gli stessi ordini di grandezza. Sono risultati comparabili i fenomeni di denitrificazione e di prelievo di azoto da parte della pianta. Infine i valori della deposizione atmosferica non hanno fatto registrare notevoli differenze.

Tabella 3.7. Valori annuali delle variabili relative ai cicli biogeochimici di carbonio (C) e azoto (N) ottenuti con il modello CLM per la simulazione effettuata a Lesotho.

LESOTHO	CN	CNDV
Caduta sulla lettiera (gC m ⁻² yr ⁻¹)	139,8	50,8
Serbatoio di C materia organica del suolo (gC m ⁻²)	2227,0	948,3
Serbatoio di N materia organica del suolo (gN m ⁻²)	221,9	94,7
Serbatoio di C al livello PFT (gC m ⁻²)	317,3	56,4
Serbatoio di N al livello PFT (gN m ⁻²)	7,3	1,9
Serbatoio di C al livello lettiera (gC m ⁻²)	74,8	20,5
Serbatoio di N al livello lettiera (gN m ⁻²)	1,6	0,4
Serbatoio di C al livello foglia (gC m ⁻²)	26,5	12,3
Serbatoio di N al livello foglia (gN m ⁻²)	1,06	0,49
C perso negli incendi al livello PFT (gC m ⁻² yr ⁻¹)	18,6	0
N perso negli incendi al livello PFT (gN m ⁻² yr ⁻¹)	0,5	0
Mineralizzazione di N netta (gN m ⁻² yr ⁻¹)	1,4	0,9
Immobilizzazione (gN m ⁻² yr ⁻¹)	4,1	1,0
Denitrificazione (gN m ⁻² yr ⁻¹)	0,12	0,11
Deposizione N atmosferico (gN m ⁻² yr ⁻¹)	0,5	0,5
Prelievo di N minerale operato dalla pianta (gN m ⁻² yr ⁻¹)	2,4	1,6

3.5 Simulazione nel bioma deserto

Questo tipo di bioma è caratterizzato da condizioni ambientali rigide e da una vegetazione dominata da piante annuali (spesso specie erbose). Le pianure desertiche possono essere coperte da uno strato di specie erbose annuali di piccola altezza ma per la maggior parte dell'anno le pianure possono apparire nude. Il punto scelto per la simulazione si trova a nord del Parco Nazionale Karoo ad una distanza di circa 150 km da quest'ultimo. Le coordinate sono (31.00 S, 23.00 E). La distanza dall'Oceano Atlantico è circa 500 (km).

Naturalmente le condizioni sotto le quali si ritrova il deserto vero e proprio sono le più estreme, con precipitazioni estive accompagnate anche da elevati livelli di aridità. Il sito considerato per il nostro studio ovviamente non ricade in quelle condizioni. In particolare la zona considerata è classificata come *Bioma Nama Karoo* (Figura 3.56) che è situato nella pianura centrale della parte occidentale del Sud Africa alle altitudini comprese tra 500 e 2000 (m). La maggior parte del Bioma Nama Karoo occorre tra i 1000 e i 1400 m e si tratta del secondo più grande bioma del Sud Africa (dopo il bioma savana).

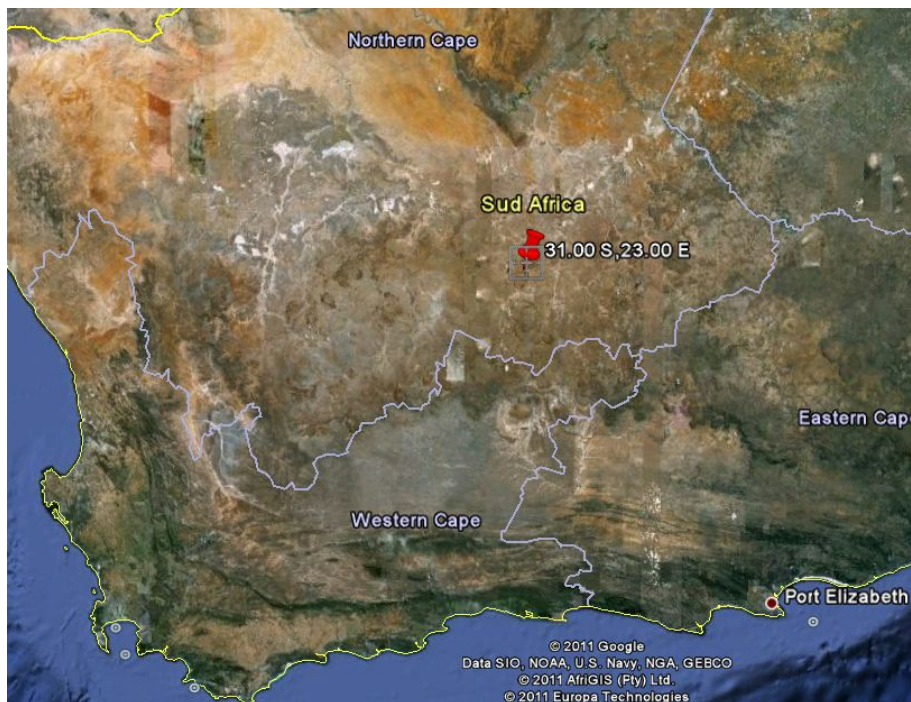


Figura 3.55 Localizzazione del sito nella zona desertica del Nama Karoo.



Figura 3.56 Vegetazione tipica del bioma Nama Karoo.

3.5.1 Idrologia

La forzante atmosferica della precipitazione per queste simulazioni è quella standard QIAN riferita all'anno 2003 (Figura 3.57). Il valore annuale è di 169,44 (mm yr⁻¹), decisamente inferiore a quello dei siti a Skukuza (419,6 mm yr⁻¹) e a Lesotho (535,44 mm yr⁻¹). Il contenuto volumetrico d'acqua nel suolo è pari a circa 8,0% leggermente inferiore ai valori ottenuti a Skukuza e a Lesotho.

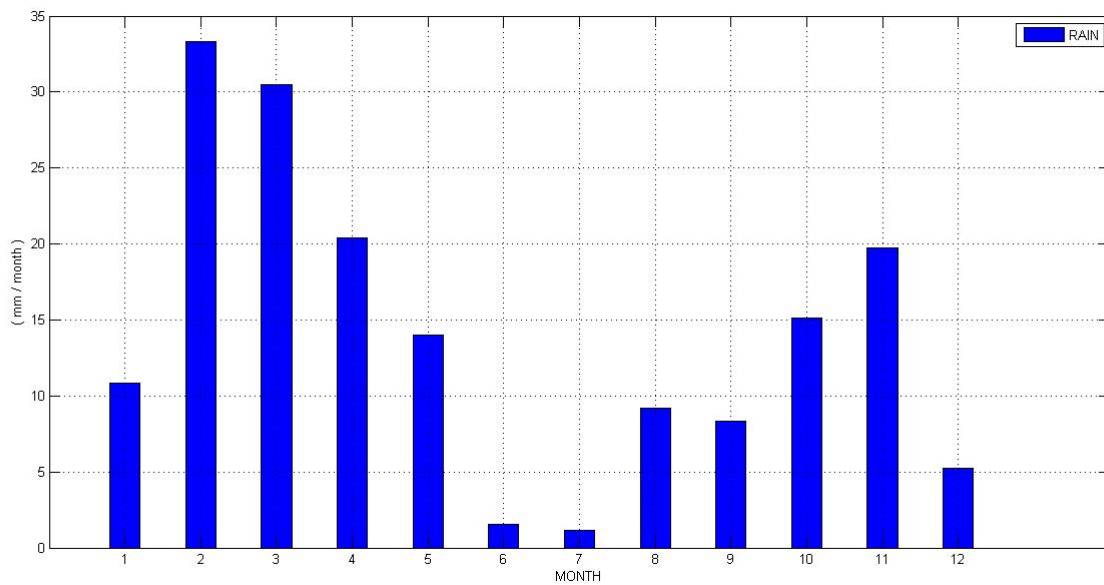


Figura 3.57 Andamento stagionale della precipitazione usata come input per le simulazioni con il modello CN e con il modello CNDV.

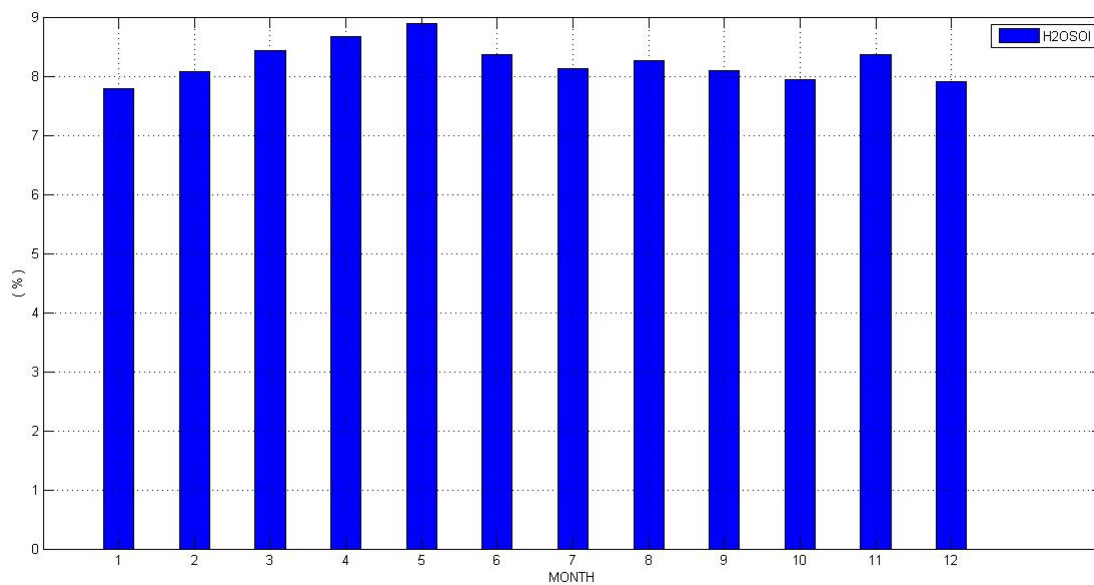


Figura 3.58 Andamento stagionale del contenuto volumetrico d'acqua nel suolo con il modello CN .

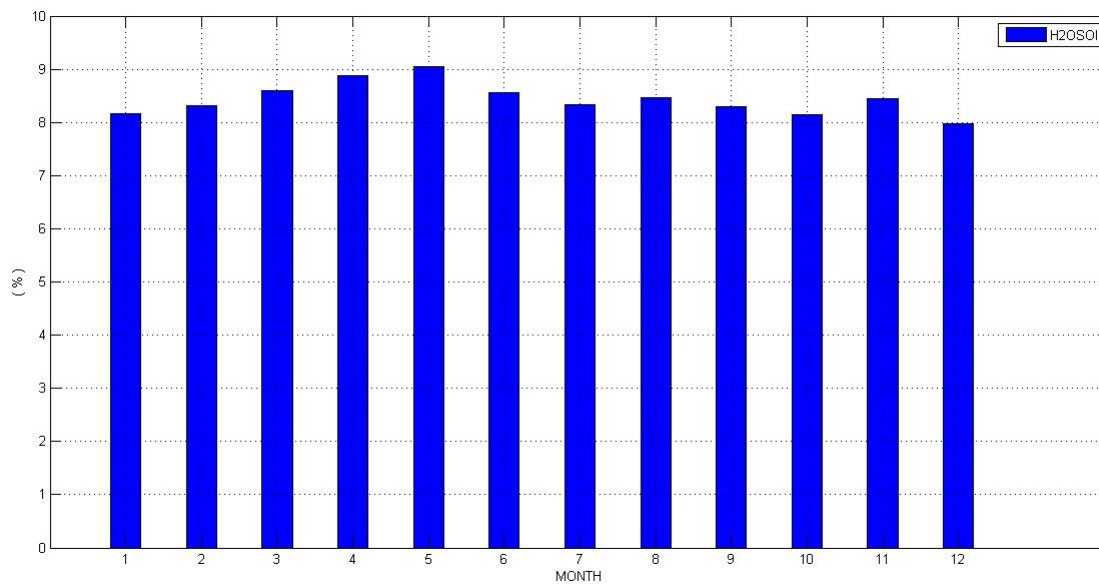


Figura 3.59 Andamento stagionale del contenuto volumetrico d'acqua nel suolo con il modello CNDV .

Osservando i valori di evaporazione del suolo e della traspirazione della vegetazione (Figura 3.60 e Figura 3.61) si nota come siano coerenti per entrambi i tipi di simulazioni. Il valore annuale dell'evaporazione del suolo per il CN è di circa 148,9 (mm yr⁻¹) e di 159,2 (mm yr⁻¹) per il CNDV. La traspirazione è risultata essere di 20,0 (mm yr⁻¹) nel CN e di 16,6 (mm yr⁻¹) nel CNDV. Per il flusso di evaporazione della chioma si sono invece ottenuti i valori 3,4 (mm yr⁻¹) (CN) e 0,4 (mm yr⁻¹) (CNDV).

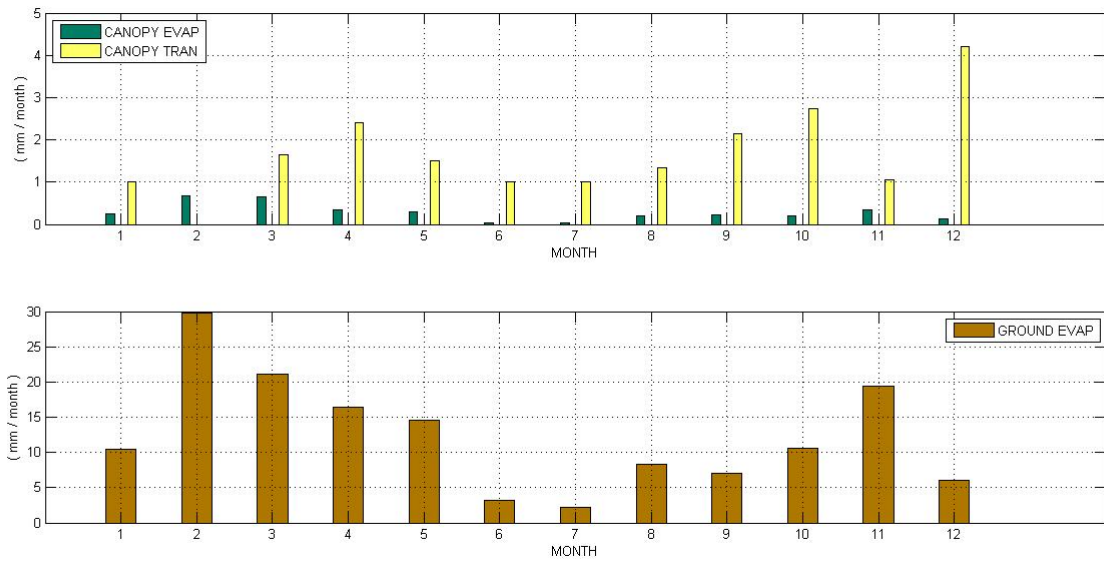


Figura 3.60 Andamento stagionale dell'evaporazione e della traspirazione della chioma e dell'evaporazione del terreno con il modello CN.

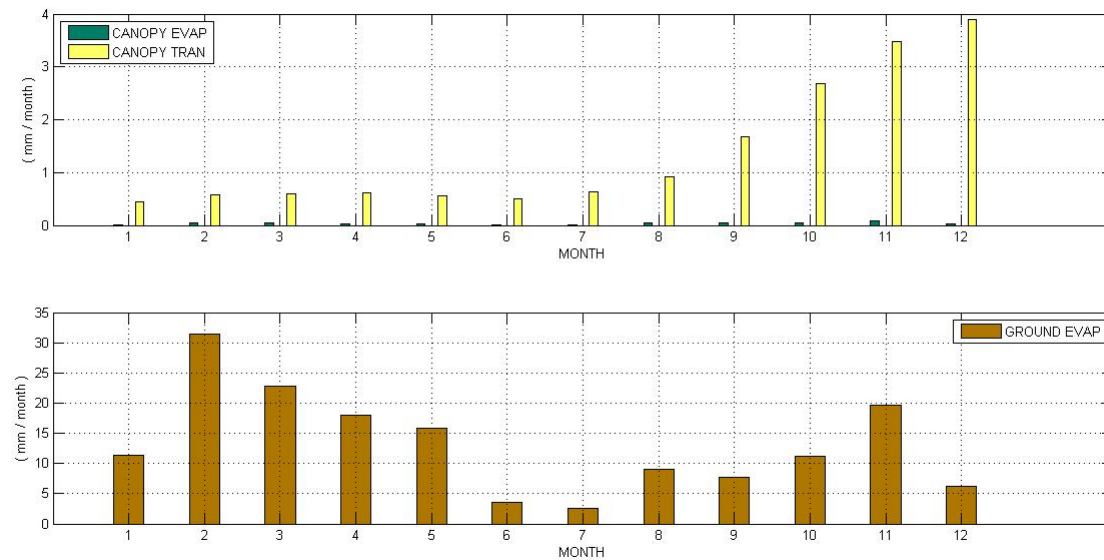


Figura 3.61 Andamento stagionale dell'evaporazione e della traspirazione della chioma e dell'evaporazione del terreno con il modello CNDV.

Tabella 3.8. Valori annuali delle variabili idrologiche ottenuti con il modello CLM per la simulazione effettuata a Nama Karoo.

NAMA KAROO	CN	CNDV
Precipitazione (mm yr ⁻¹)	169,44	169,44
Evaporazione vegetazione (mm yr ⁻¹)	3,4	0,4
Evaporazione suolo (mm yr ⁻¹)	148,9	159,2
Traspirazione vegetazione (mm yr ⁻¹)	20,0	16,6

Dai dati della simulazione emerge una discreta coerenza tra i due modelli. Solo l'evaporazione del suolo è risultata differente tra il CN e il CNDV mentre le altre variabili sono decisamente comparabili.

3.5.2 Produttività della vegetazione

La produttività annuale della vegetazione non ha presentato notevoli differenze nella regione desertica del Nama Karoo. I valori annuali di GPP sono di circa $57,5 \text{ (gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1})$ e $25,9 \text{ (gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1})$ e la NPP è $22,2 \text{ (gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1})$ e $12,7 \text{ (gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1})$.

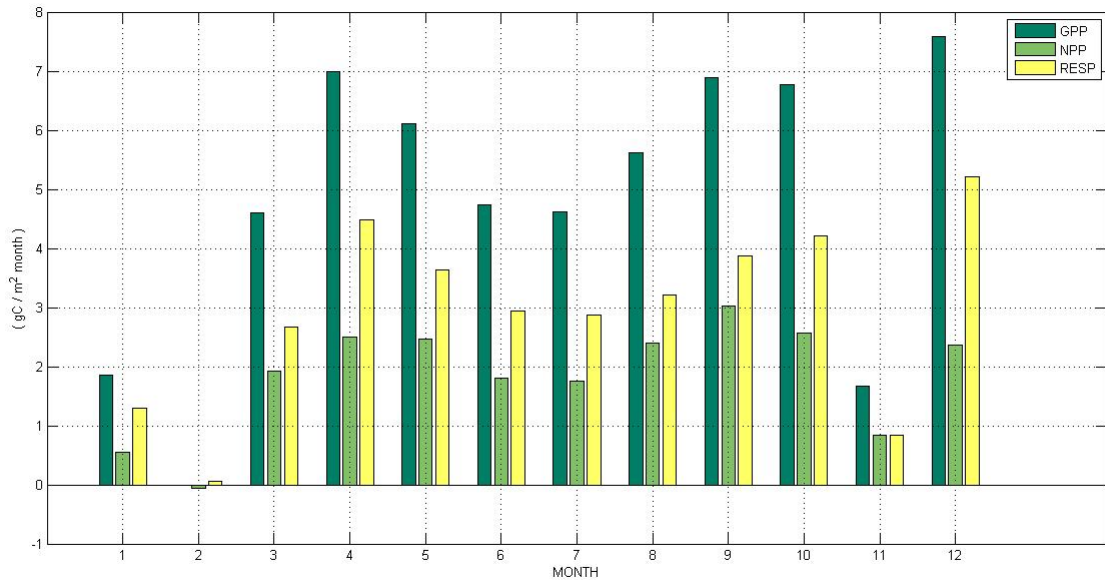


Figura 3.62 Andamento stagionale della produzione primaria lorda (GPP), della produzione primaria netta (NPP) e della respirazione autotrofa (AR) con il modello CN.

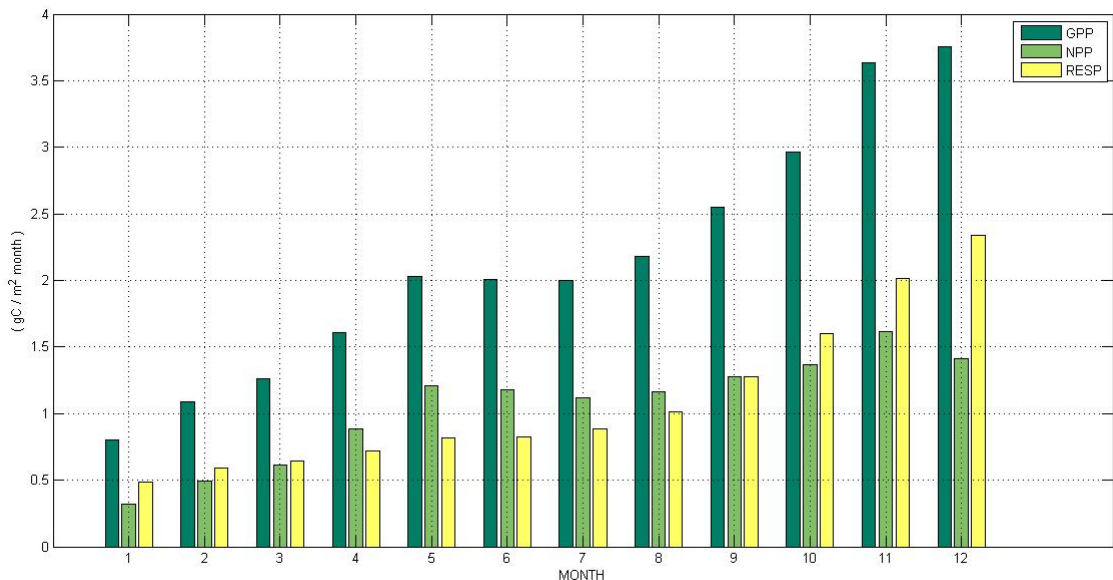


Figura 3.63 Andamento stagionale della produzione primaria lorda (GPP), della produzione primaria netta (NPP) e della respirazione autotrofa (AR) con il modello CNDV.

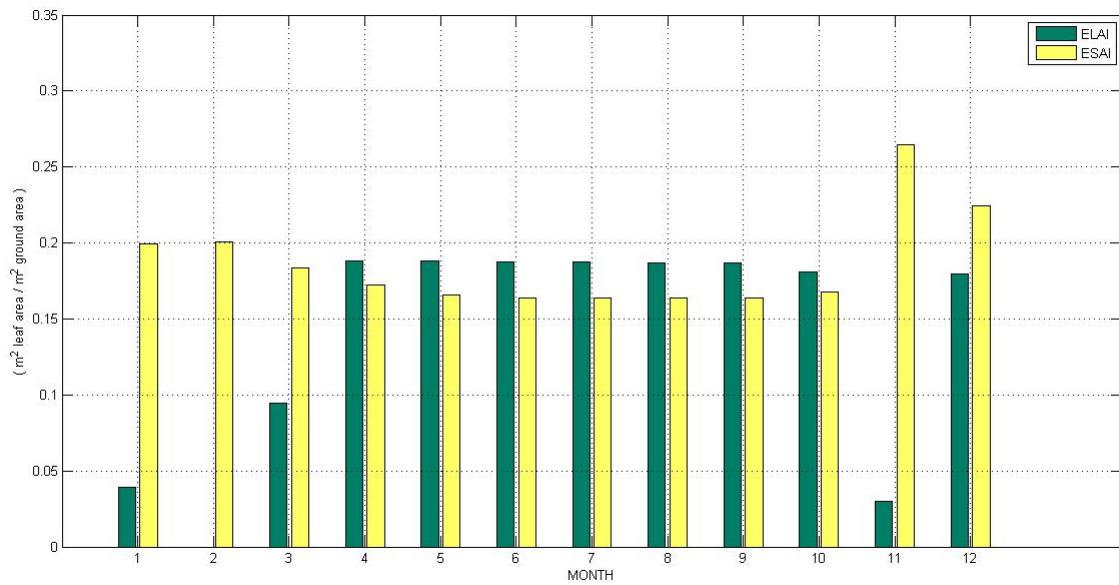


Figura 3.64 Andamento stagionale dell'indice di area fogliare (LAI) e dell'indice di area del gambo (SAI) con il modello CN.

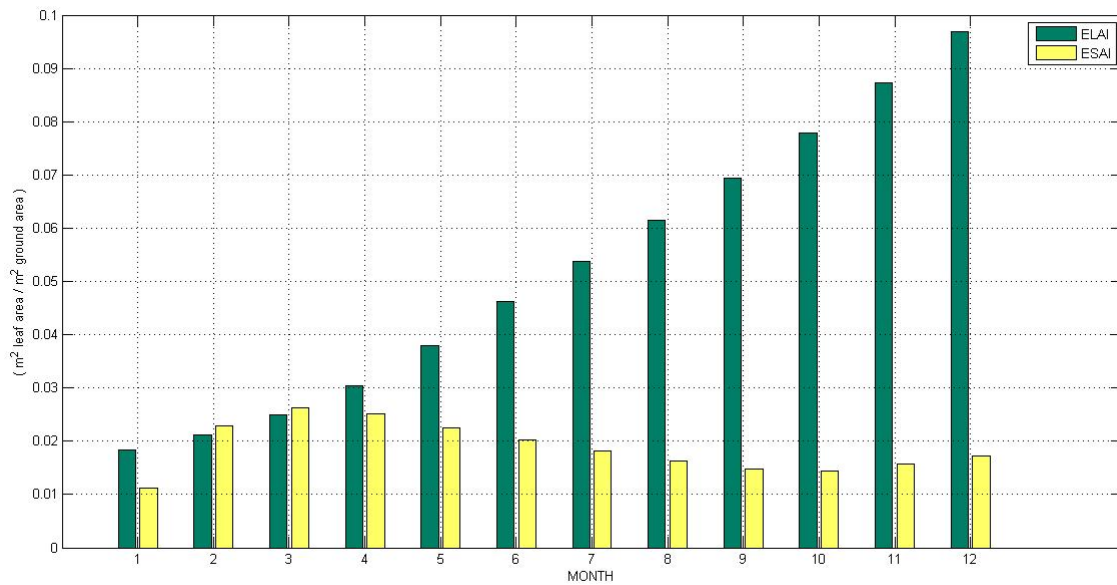


Figura 3.65 Andamento stagionale dell'indice di area fogliare (LAI) e dell'indice di area del gambo (SAI) con il modello CNDV.

Il LAI registrato nella simulazione CN assume un valore di 0,1 (m² leaf area m⁻² ground area) e di 0,05 (m² leaf area m⁻² ground area) nella simulazione CNDV. Dal grafico del ciclo stagionale per il CNDV (Figura 3.65) emerge un trend crescente dell'indice di area fogliare.

Tabella 3.9. Valori annuali delle variabili relative alla produttività ottenuti con il modello CLM per la simulazione effettuata a Nama Karoo. Nell' ultima colonna sono riportati i valori di riferimento in letteratura.

NAMA KAROO	CN	CNDV	Scholes and Walker (1999)
Produzione primaria netta NPP ($\text{gC m}^{-2} \text{yr}^{-1}$)	22,2	12,7	4-100
Indice di area fogliare LAI ($\text{m}^2 \text{ leaf area m}^{-2} \text{ ground area}$)	0,1	0,05	-

Il confronto con i dati in letteratura ha evidenziato come sia il CN che il CNDV riescono a cogliere il range di produttività per il sito a Nama Karoo. Il risultato tra i due modelli inoltre è molto simile anche per l'indice di area fogliare.

3.5.3 Cicli biogeochimici del carbonio e dell'azoto

La caduta sulla lettiera si verifica soprattutto nei mesi di Gennaio, Ottobre e Novembre ed è risultata pari a circa 27,5 ($\text{gC m}^{-2} \text{yr}^{-1}$) per il modello CN. E' evidente come l'andamento stagionale e il valore annuale, pari a 2,5 ($\text{gC m}^{-2} \text{yr}^{-1}$), ottenuti per il modello CNDV siano notevolmente diversi da quelli del modello biogeochimico.

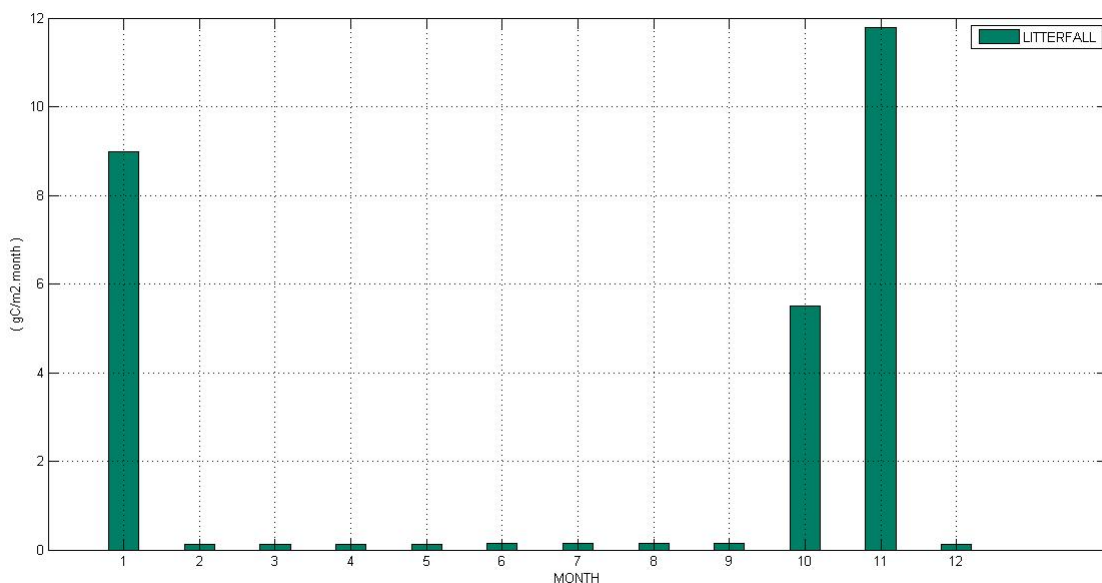


Figura 3.66 Andamento stagionale della caduta sulla lettiera con il modello CN.

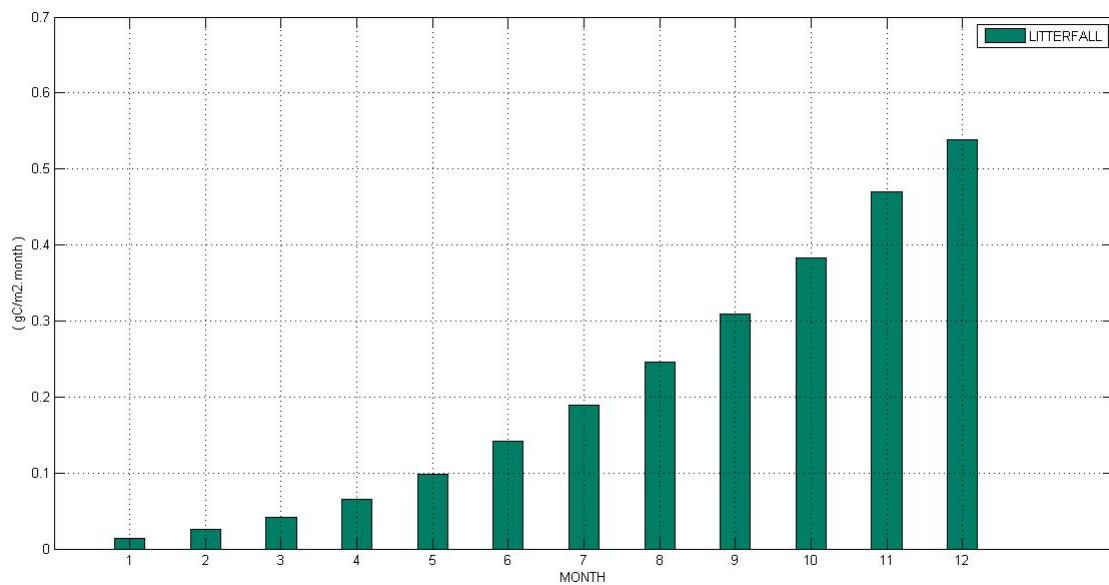


Figura 3.67 Andamento stagionale della caduta sulla lettiera con il modello CNDV.

L'andamento stagionale della caduta sulla lettiera (Figura 3.67) simulato con il CNDV appare poco realistico (spuria). L'accumulo crescente di materiale sulla lettiera infatti non può crescere nel corso dell'anno. In tal modo non sarebbero rispettate le stagioni e le fasi di crescita e senescenza. Poco realistiche sono risultati anche i serbatoi di carbonio e azoto a livello dei PFT (Figura 3.69) e a livello della foglia (Figura 3.73) simulati con il modello dinamico di vegetazione.

Per quanto riguarda i serbatoi di carbonio e di azoto (dalla Figura 3.68 alla Figura 3.73) ai vari livelli si segnala la coerenza degli andamenti stagionali con una sistematica differenza di un ordine di grandezza tra i valori del CN e quelli del CNDV. Per i livelli dei PFT (Figura 3.69) e della foglia (Figura 3.73) simulati con il modello dinamico di vegetazione si è notata inoltre la presenza di un andamento crescente nel corso della stagione.

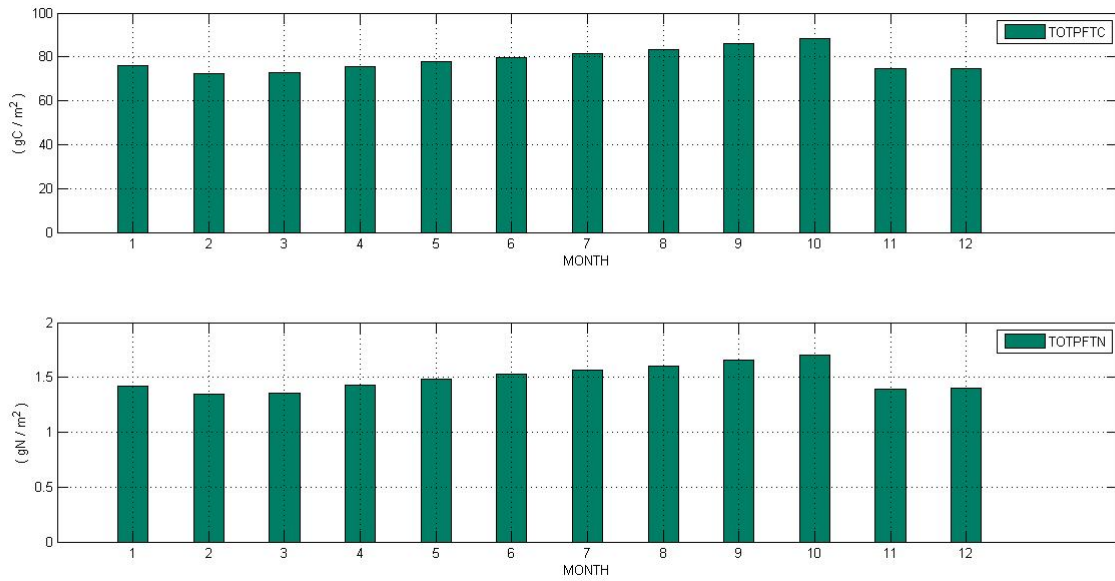


Figura 3.68 Andamento stagionale del carbonio e dell'azoto totale al livello dei PFT con il modello CN.

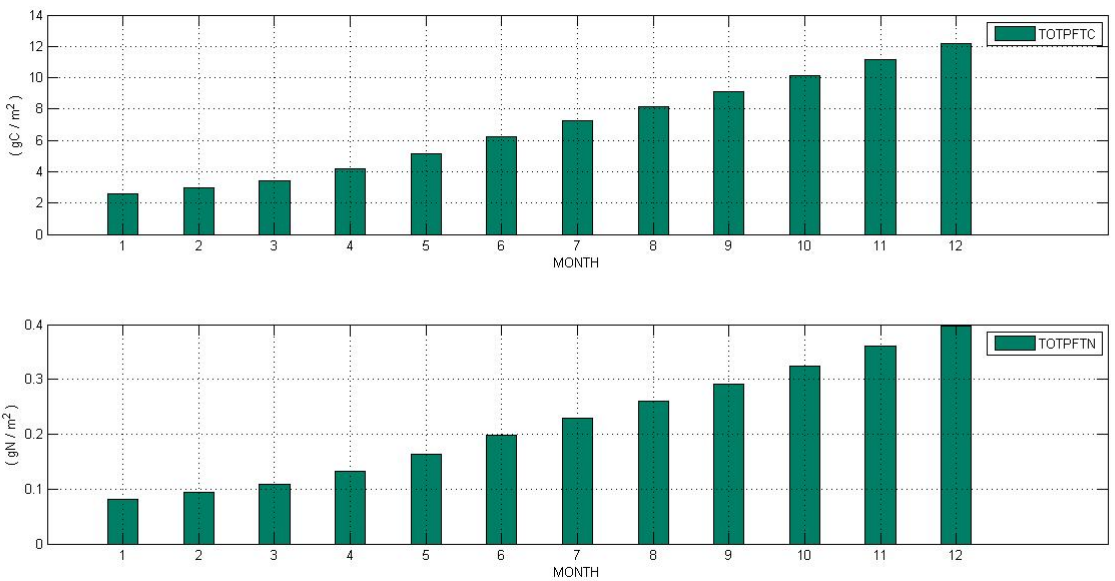


Figura 3.69 Andamento stagionale del carbonio e dell'azoto totale al livello dei PFT con il modello CNDV.

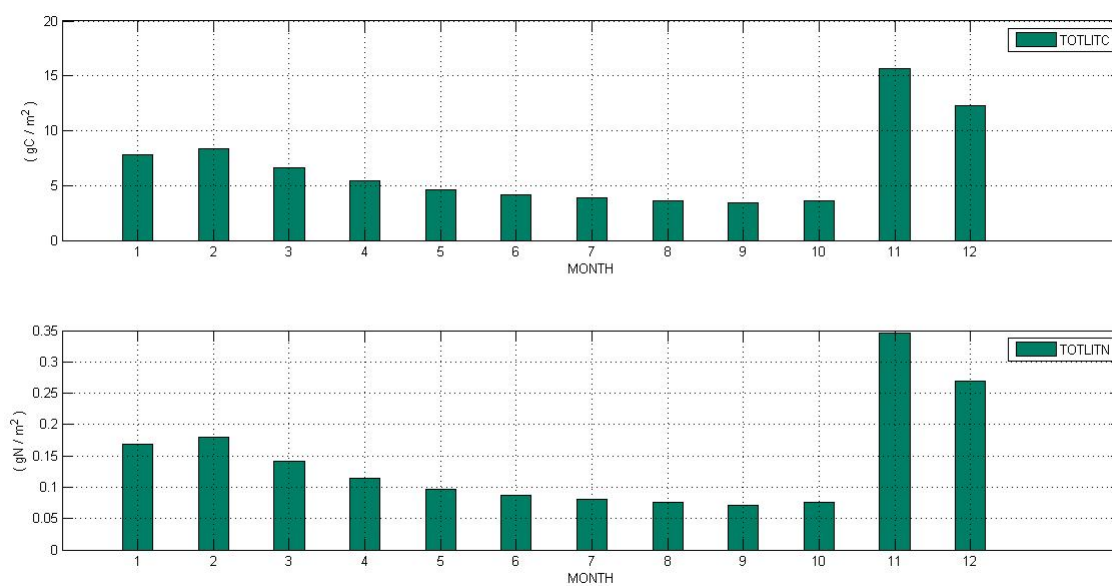


Figura 3.70 Andamento stagionale del carbonio e dell'azoto totale nella lettiera con il modello CN.

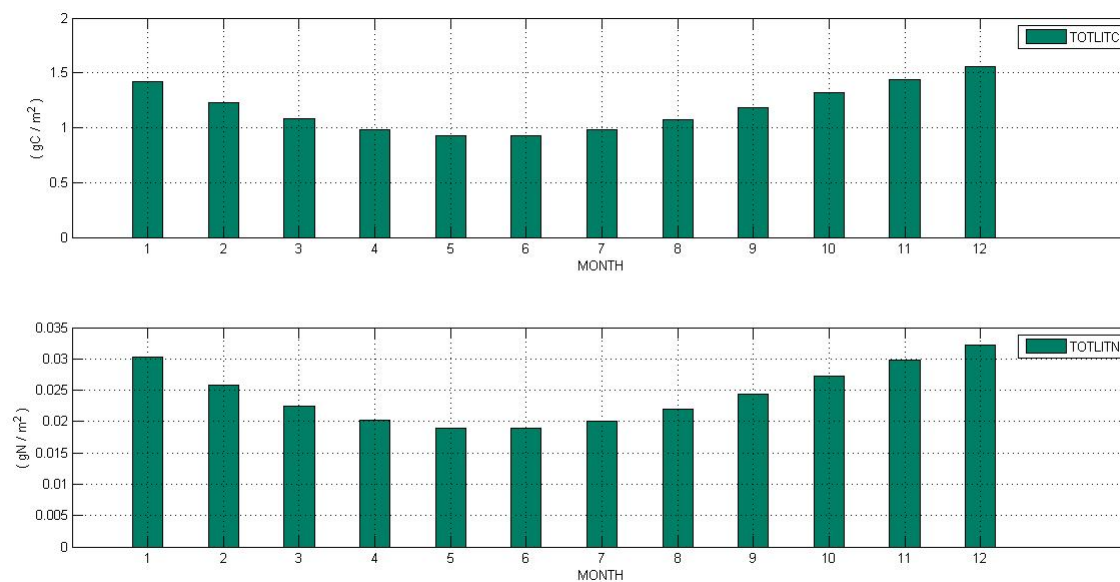


Figura 3.71 Andamento stagionale del carbonio e dell'azoto totale nella lettiera con il modello CNDV.

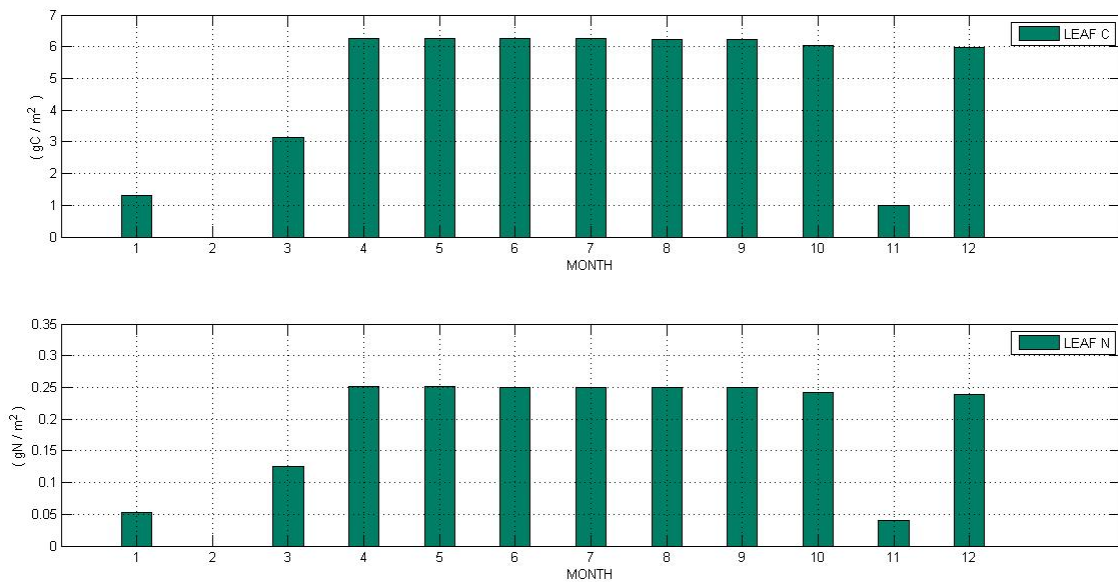


Figura 3.72 Andamento stagionale del carbonio e dell'azoto al livello della foglia con il modello CN.

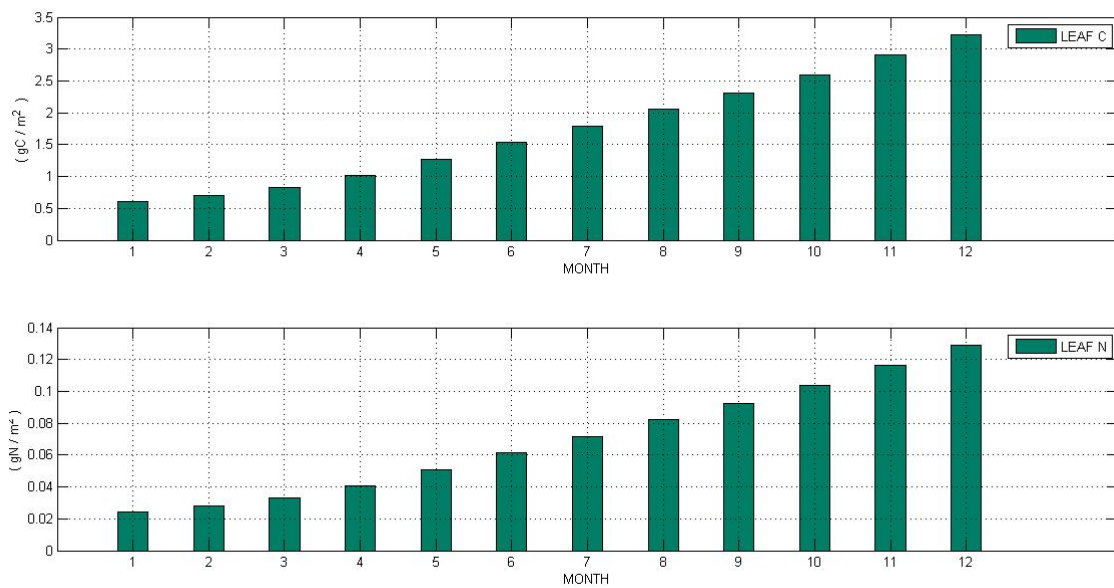


Figura 3.73 Andamento stagionale del carbonio e dell'azoto al livello della foglia con il modello CNDV.

Il CLM nelle due configurazioni non ha presentato vistose differenze nel calcolo della mineralizzazione di azoto nel suolo, nel prelievo di azoto operato dalla pianta e nella denitrificazione. Solo la stima dell'immobilizzazione è risultata più piccola per la configurazione con il CNDV.

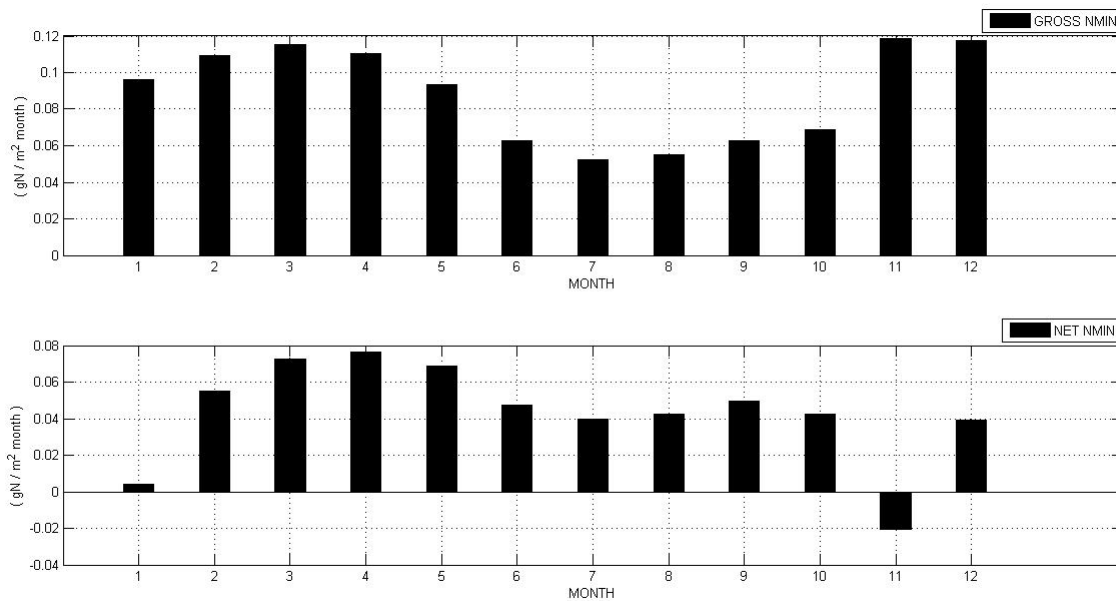


Figura 3.74 Andamento stagionale della mineralizzazione lorda e netta con il modello CN.

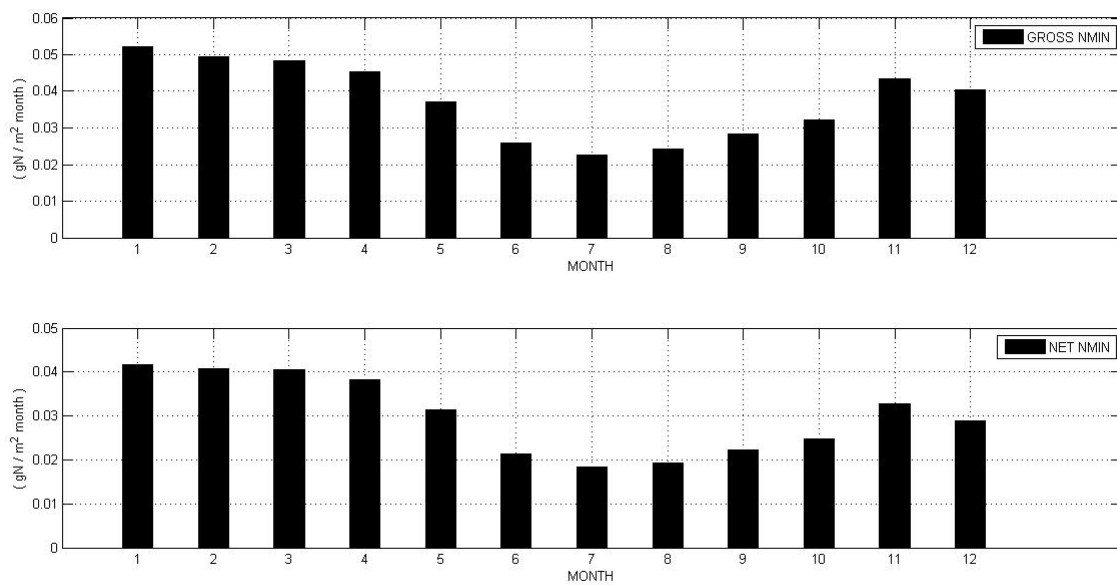


Figura 3.75 Andamento stagionale della mineralizzazione lorda e netta con il modello CNDV.

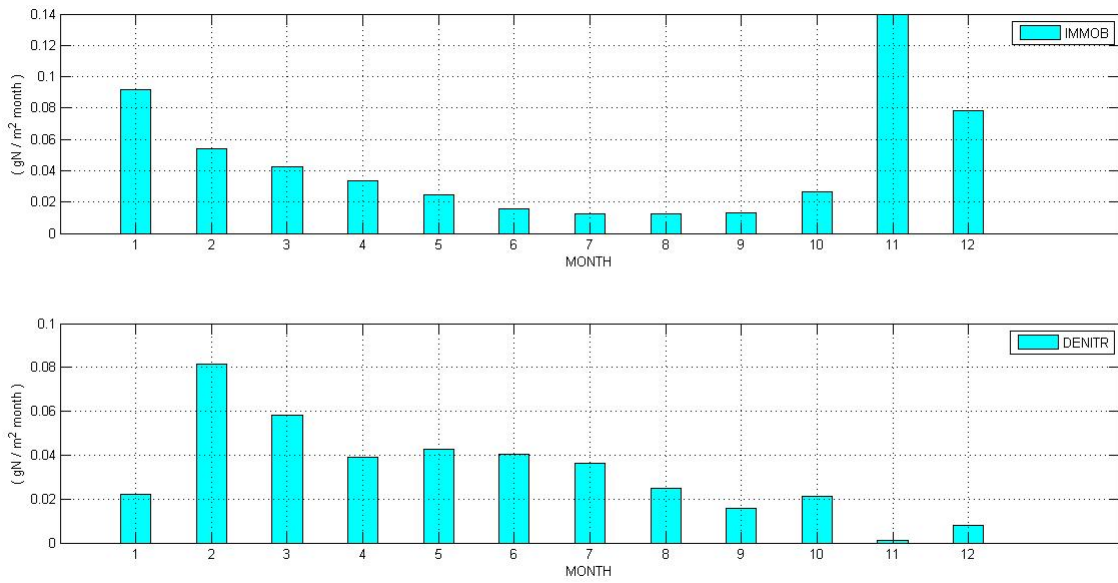


Figura 3.76 Andamento stagionale dell'immobilizzazione e della denitrificazione con il modello CN.

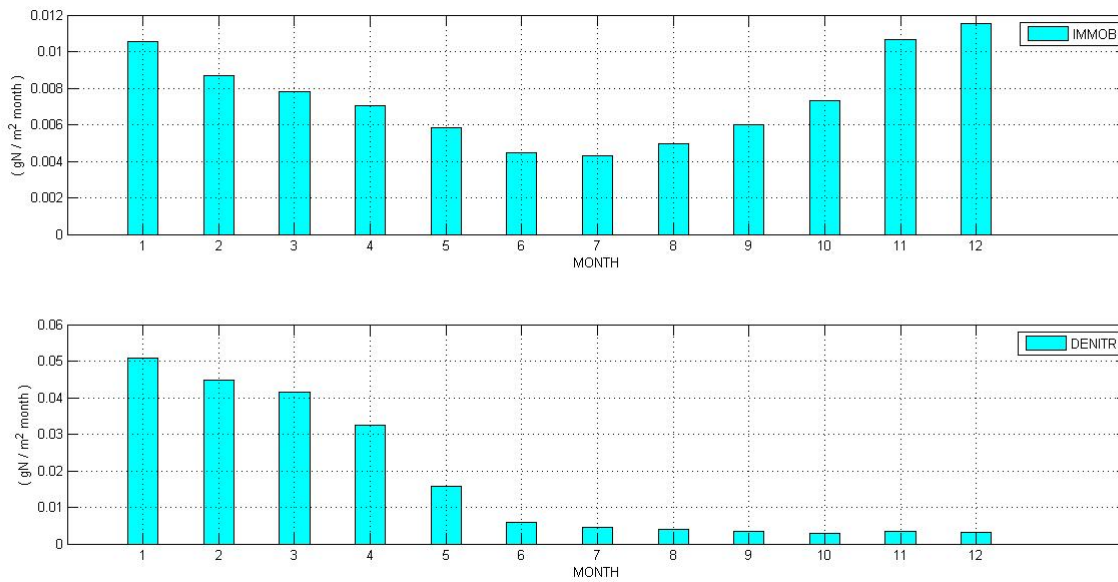


Figura 3.77 Andamento stagionale dell'immobilizzazione e della denitrificazione con il modello CNDV.

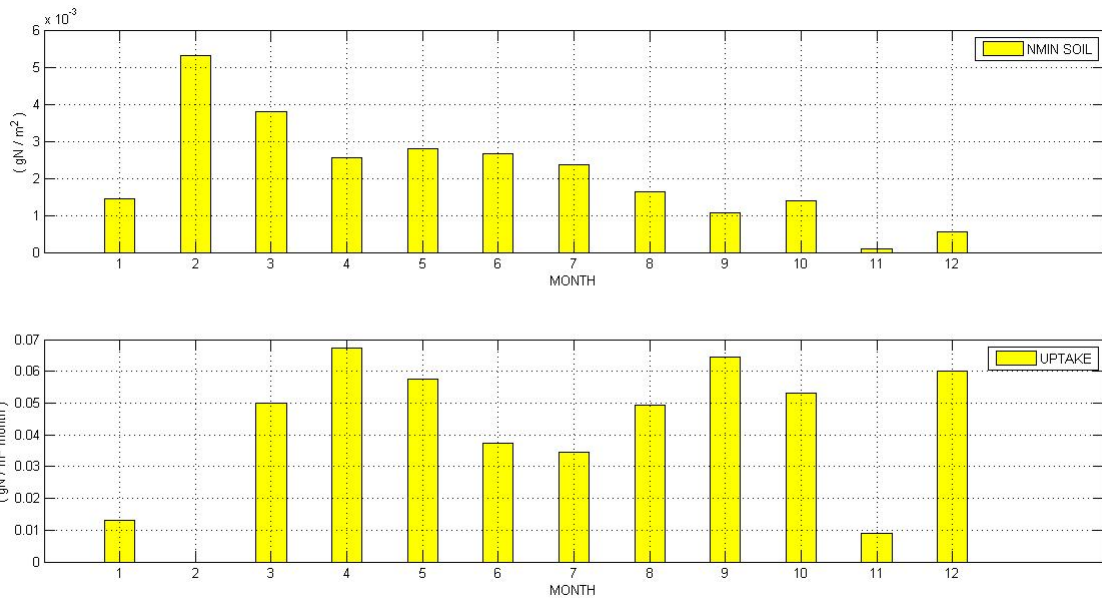


Figura 3.78 Andamento stagionale della mineralizzazione di azoto nel suolo e del prelievo da parte della pianta di azoto minerale dal suolo con il modello CN.

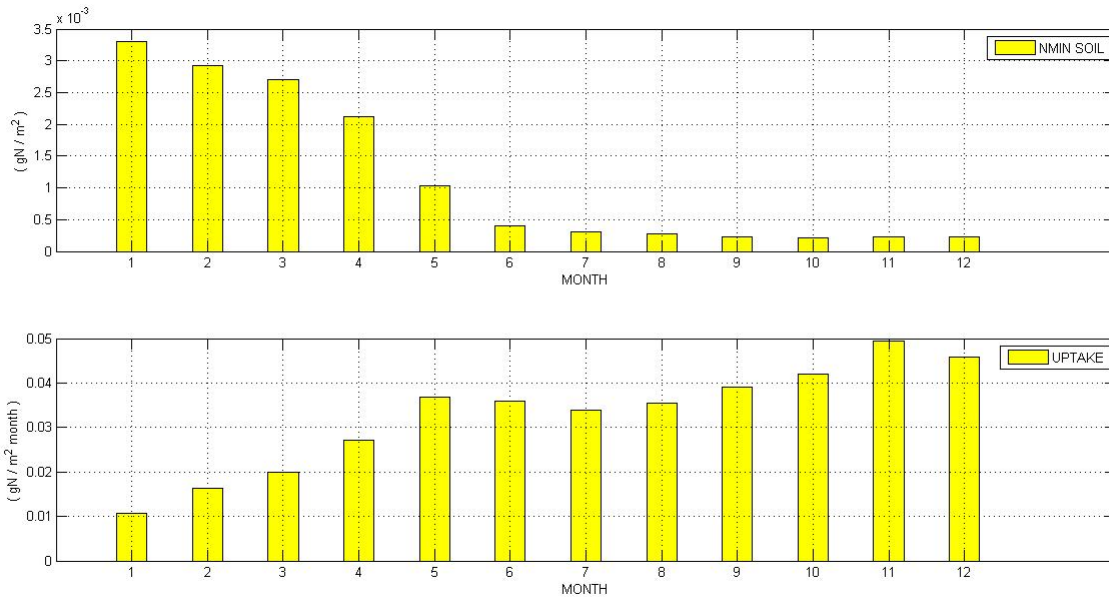


Figura 3.79 Andamento stagionale della mineralizzazione di azoto nel suolo e del prelievo da parte della pianta di azoto minerale dal suolo con il modello CNDV.

Per quanto riguarda gli incendi è da sottolineare come per il sito Nama Karoo anche il modello CN non ha rilevato la presenza di incendi sistematici.

Tabella 3.10. Valori annuali delle variabili relative ai cicli biogeochimici di carbonio (C) e azoto (N) ottenuti con il modello CLM per la simulazione effettuata a Nama Karoo.

NAMA KAROO	CN	CNDV
Caduta sulla lettiera (gC m ⁻² yr ⁻¹)	27,5	2,5
Serbatoio di C materia organica del suolo (gC m ⁻²)	603,5	268,6
Serbatoio di N materia organica del suolo (gN m ⁻²)	60,2	26,8
Serbatoio di C al livello PFT (gC m ⁻²)	78,5	6,9
Serbatoio di N al livello PFT (gN m ⁻²)	1,5	0,2
Serbatoio di C al livello lettiera (gC m ⁻²)	6,6	1,2
Serbatoio di N al livello lettiera (gN m ⁻²)	0,1	0,02
Serbatoio di C al livello foglia (gC m ⁻²)	4,6	1,7
Serbatoio di N al livello foglia (gN m ⁻²)	0,2	0,07
C perso negli incendi al livello PFT (gC m ⁻² yr ⁻¹)	0	0
N perso negli incendi al livello PFT (gN m ⁻² yr ⁻¹)	0	0
Mineralizzazione di N netta (gN m ⁻² yr ⁻¹)	0,5	0,4
Immobilizzazione (gN m ⁻² yr ⁻¹)	0,5	0,09
Denitrificazione (gN m ⁻² yr ⁻¹)	0,4	0,2
Deposizione N atmosferico (gN m ⁻² yr ⁻¹)	0,2	0,2
Prelievo di N minerale operato dalla pianta (gN m ⁻² yr ⁻¹)	0,5	0,4

Si nota (Tabella 3.10) come i serbatoi di carbonio e azoto riferiti alla materia organica nel suolo abbiano gli stessi ordini di grandezza sia nel CN che nel CNDV. Sono risultati comparabili anche le quantità di carbonio al livello della lettiera e della foglia. La simulazione del CLM con entrambe le configurazioni ha generato in questo sito valori di mineralizzazione netta, di denitrificazione, di deposizione di azoto atmosferico e di prelievo della pianta molto simili.

CAPITOLO 4

CONCLUSIONI

La ricerca di un modello in grado di generare serie stagionali di variabili relative alla vegetazione ha messo in evidenza diverse limitazioni soprattutto quando si è utilizzato il modello di dinamica della vegetazione globale CNDV. Il confronto con i dati di letteratura (dove possibile) in questo caso ha evidenziato una forte tendenza a sottostimare le variabili, quasi sempre inferiori di un ordine di grandezza rispetto al modello biogeochimico CN.

Il nostro studio ha dovuto verificare le potenzialità di due differenti modelli, il CN e il CNDV, il primo considerato come modello biogeochimico terrestre e il secondo come modello di dinamica della vegetazione globale. Entrambi sono dei modelli che riproducono attraverso opportune parametrizzazioni i processi idrologici, ecofisiologici e biogeochimici che interessano gli ecosistemi, semplificati come raggruppamenti di un piccolo numero di tipi funzionali di vegetazione (PFT) in modo da ridurre la complessità rappresentata dalla diversità di specie presenti. I modelli biogeochimici terrestri (*TBM*) simulano i flussi di carbonio, di acqua e di azoto all'interno degli ecosistemi terrestri. I modelli dinamici di vegetazione globale (*DGVM*) inoltre accoppiano questi processi interattivamente con dei cambiamenti nei processi lenti dell'ecosistema, che dipendono dalla competizione per le risorse, lo stabilimento di nuovi individui, la crescita e la mortalità dei differenti tipi di vegetazione. La nostra analisi ha riguardato tre diverse tipologie di bioma presenti in Sud Africa: la savana, la prateria e il deserto. Le simulazioni sono state effettuate con due differenti configurazioni in modo da comparare i risultati ottenuti e verificare le potenzialità del modello CLM in Sud Africa. Le differenze tra i due modelli sono state meno evidenti nel bioma desertico della regione Nama Karoo. Per quanto riguarda il confronto con i dati in letteratura si sono considerate principalmente la produttività primaria netta NPP e l'indice di area fogliare LAI per tutti e tre i tipi di bioma. Per il bioma savana a Skukuza è stato possibile effettuare il confronto per il ciclo dell'acqua e dei nutrienti (carbonio e azoto), prendendo

come riferimento lo studio al sito di Nylsvley. Tenendo conto delle semplificazioni adottate, si è potuto confermare un buon accordo nel rappresentare i diversi flussi e serbatoi presenti, almeno sul piano qualitativo, per quanto riguarda il modello biogeochimico. Il modello di dinamica della vegetazione presenta invece risultati meno convincenti, suggerendo alcune criticità nel suo utilizzo in simulazioni rappresentanti scenari di cambiamento climatico. A questo proposito è opportuno citare il lavoro di [Scheiter S. e Higgins S.I., 2009] sull'incapacità dei principali modelli di vegetazione di riprodurre le condizioni peculiari degli ecosistemi tropicali e subtropicali. Rispetto a sviluppi futuri, l'obiettivo è quello da un lato di acquisire ulteriore sensibilità sulle criticità del CLM, dall'altro di sfruttarne le potenzialità ad esempio nella modellistica distribuita. In accordo con questi obiettivi, alcune analisi che sono state già individuate comprendono:

- utilizzo del modello in modalità *single-site* e comparazione con dati misurati in stazioni di flusso lungo il transetto del Kalahari [Baldocchi D. et al., 2001];
- test sul funzionamento del modello in modalità distribuita a fine risoluzione (inferiore al grado).

Riferimenti bibliografici

- Baldocchi, D., et al. 2001. FLUXNET: "A new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities". Bull. Amer. Meteor. Soc. 82:2415-2433.
- Beven, K.J., and Kirkby, M.J. 1979. "A physically based variable contributing area model of basin hydrology". Hydrol. Sci. Bull. 24:43-69.
- Bonan, G.B. 1996. "A land surface model (LSM version 1.0) for ecological, hydrological, and atmospheric studies: Technical description and user's guide". NCAR Technical Note NCAR/TN-417+STR, National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO, 150 pp.
- Bonan, G.B., Levis, S., Kergoat, L., and Oleson, K.W. 2002. "Landscapes as patches of plant functional types: An integrating concept for climate and ecosystem models". Global Biogeochem. Cycles 16: 5.1-5.23.
- Bonan, G.B., and Levis, S. 2006. "Evaluating aspects of the Community Land and Atmosphere Models (CLM3 and CAM3) using a dynamic global vegetation model". J. Climate 19:2290-2301.
- Collatz, G.J., Ball, J.T., Grivet, C., and Berry, J.A. 1991. "Physiological and environmental regulation of stomatal conductance, photosynthesis, and transpiration: A model that includes a laminar boundary layer". Agric. For. Meteor. 54:107-136.

Collatz, G.J., Ribas-Carbo, M., and Berry, J.A. 1992. "Coupled photosynthesis-stomatal conductance model for leaves of C4 plants". *Aust. J. Plant Physiol.* 19:519-538.

De Michele, C., and Scholes, R.J., 2009. "Biodescesa: BIODiversity and DEsertification SCEnarios in South Africa under climate change projections ". Politecnico di Milano, Dipartimento di Ingegneria Idraulica Ambientale Rilevamento. CSIR, South Africa.

Dickinson, R.E., Oleson, K.W., Bonan, G., Hoffman, F., Thornton, P., Vertenstein, M., Yang, Z.-L., and Zeng, X. 2006. "The Community Land Model and its climate statistics as a component of the Community Climate System Model". *J. Climate* 19:2302-2324.

Kluzek, E. 2010. "*CESM Research Tools: CLM4.0.10 User's Guide Documentation*". NCAR, Boulder, Colorado.
<http://www.cesm.ucar.edu/models/cesm1.0/clm/index.shtml>).

Lawrence, P.J., and Chase, T.N. 2007. "Representing a MODIS consistent land surface in the Community Land Model (CLM 3.0)". *J. Geophys. Res.* 112:G01023.
DOI:10.1029/2006JG000168.

Lieth, H., and Chase, R.H. Whittaker. 1975. "Primary Productivity of the Biosphere". *Ecological Studies* 14, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York.

Millennium Ecosystem Assessment, 2005. "Ecosystems and Human Well-Being: Current State and Trends. Findings of the Condition and Trends Working Group". Island Press, Washington, DC.

Myneni, R.B., et al. 2002. "Global products of vegetation leaf area and fraction absorbed PAR from year one of MODIS data". *Remote Sens. Environ.* 83:214-231.

Niu, G.-Y., Yang, Z.-L., Dickinson, R.E., and Gulden, L.E. 2005. A simple TOPMODEL-based runoff parameterization (SIMTOP) for use in global climate models. *J. Geophys. Res.* 110:D21106. DOI: 10.1029/2005JD006111.

Niu, G.-Y., Yang, Z.-L., Dickinson, R.E., Gulden, L.E., and Su, H. 2007. "Development of a simple groundwater model for use in climate models and evaluation with Gravity Recovery and Climate Experiment data". *J. Geophys. Res.* 112:D07103. DOI:10.1029/2006JD007522.

Oleson, K.W., D.M. Lawrence, G.B. Bonan, M.G. Flanner, E. Kluzek, P.J. Lawrence, S. Levis, S.C. Swenson, P.E. Thornton, A. Dai, M. Decker, R. Dickinson, J. Feddema, C.L. Heald, F. Hoffman, J.-F. Lamarque, N. Mahowald, G.-Y. Niu, T. Qian, J. Randerson, S. Running, K. Sakaguchi, A. Slater, R. Stockli, A. Wang, Z.-L. Yang, Xi. Zeng, and Xu. Zeng, 2010: "Technical Description of version 4.0 of the Community Land Model (CLM)". NCAR Technical Note NCAR/TN-478+STR, National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO, 257 pp.

<http://www.cesm.ucar.edu/models/cesm1.0/clm/index.shtml>

Qian, T., Dai, A., Trenberth, K., and Oleson, K.W., 2006. "Simulation of Global Land Surface Conditions from 1948 to 2004. Part I: Forcing Data and Evaluations". NCAR, Boulder, Colorado.

Scheiter, S., S.I. Higgins, 2009: "Impacts of climate change on the vegetation of Africa: an adaptive dynamic vegetation modelling approach". *Global Change Biology*, 15(9), 2224-2246.

Scholes, R.J., Walker, B.H., 1993. "An African Savanna: Synthesis of the Nylsvley Study". Cambridge University Press, Cambridge.

Thonicke, K., Venevsky, S., Sitch, S., and Cramer, W. 2001. "The role of fire disturbance for global vegetation dynamics: coupling fire into a Dynamic Global Vegetation Model". *Global Ecology and Biogeography* 10:661-667.

Thornton, P.E., Law, B.E., Gholz, H.L., Clark, K.L., Falge, E., Ellsworth, D.S., Goldstein, A.H., Monson, R.K., Hollinger, D., Falk, M., Chen, J., and Sparks, J.P. 2002. "Modeling and measuring the effects of disturbance history and climate on carbon and water budgets in evergreen needleleaf forests". *Agric. For. Meteorol.* 113:185-222.

Thornton, P.E., and Rosenbloom, N.A. 2005. "Ecosystem model spin-up: estimating steady state conditions in a coupled terrestrial carbon and nitrogen cycle model". *Ecological Modelling* 189:25-48.

Vertenstein, M., Craig, T., Middleton, A., Feddema, D., Fischer, C. "*CESM1.0 User's Guide*". NCAR, 131 pp.

<http://www.cesm.ucar.edu/models/cesm1.0/clm/index.shtml>

Zeng, X., Shaikh, M., Dai, Y., Dickinson, R.E., and Myneni, R. 2002. Coupling of the Common Land Model to the NCAR Community Climate Model. *J. Climate* 15:1832-1854.

APPENDICE A

CONSTANTI FISICHE

A.1 Costanti fisiche condivise da tutte le componenti del modello

Tabella A.1. Costanti fisiche.

Pi	π	3.14159265358979323846	-
Acceleration of gravity	g	9.80616	m s ⁻²
Standard pressure	P _{std}	101325	Pa
Stefan-Boltzmann constant	σ	5.67x10 ⁻⁸	W m ⁻² K ⁻⁴
Boltzmann constant	κ	1.38065x10 ⁻²³	J K ⁻¹ molecule ⁻¹
Avogadro's number	N _A	6.02214x10 ²⁶	molecule kmol ⁻¹
Universal gas constant	R _{gas}	N _A κ	J K ⁻¹ kmol ⁻¹
Molecular weight of dry air	MW _{da}	28.966	kg kmol ⁻¹
Dry air gas constant	R _{da}	R _{gas} / MW _{da}	J K ⁻¹ kg ⁻¹
Molecular weight of water vapor	MW _{wv}	18.016	kg kmol ⁻¹
Water vapor gas constant	R _{wv}	R _{gas} / MW _{wv}	J K ⁻¹ kg ⁻¹
Von Karman constant	k	0.4	-
Freezing temperature of fresh water	T _f	273.15	K
Density of liquid water	ρ_{liq}	1000	kg m ⁻³
Density of ice	ρ_{ice}	917	kg m ⁻³
Specific heat capacity of dry air	C _p	1.00464x10 ³	J kg ⁻¹ K ⁻¹

Specific heat capacity of dry water	C_{liq}	4.188×10^3	$J \text{ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$
Specific heat capacity of ice	C_{ice}	2.11727×10^3	$J \text{ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$
Latent heat of vaporization	λ_{vap}	2.501×10^6	$J \text{ kg}^{-1}$
Latent heat of fusion	L_f	3.337×10^5	$J \text{ kg}^{-1}$
Latent heat of sublimation	λ_{sub}	$\lambda_{vap} + L_f$	$J \text{ kg}^{-1}$
¹ Thermal conductivity of water	λ_{liq}	0.6	$W \text{ m}^{-1} \text{ K}^{-1}$
¹ Thermal conductivity of ice	λ_{ice}	2.29	$W \text{ m}^{-1} \text{ K}^{-1}$
¹ Thermal conductivity of air	λ_{air}	0.023	$W \text{ m}^{-1} \text{ K}^{-1}$
Radius of the earth	R_e	6.37122×10^6	m

¹Non condivisa dalle altre componenti del sistema di modellazione accoppiato.