L'estratto contiene pagine non in sequenza

Lorenzo Benvenuti

La fienagione

Principi, sistemi, macchine e impianti

edagricole

L'estratto contiene pagine non in sequenza

1ª edizione: marzo 2021

© Copyright 2021 by "Edagricole - Edizioni Agricole di New Business Media Srl.",
via Eritrea, 21 - 20157 Milano
Redazione: p.zza G. Galilei, 6 - 40123 Bologna Vendite: tel. 051 6575833; fax: 051 6575999
email: libri.edagricole@newbusinessmedia.it - www.edagricole.it

Proprietà letteraria riservata - printed in Italy

La riproduzione con qualsiasi processo di duplicazione delle pubblicazioni tutelate dal diritto d'autore è vietata e penalmente perseguibile (art. 171 della legge 22 aprile 1941, n. 633). Quest'opera è protetta ai sensi della legge sul diritto d'autore e delle Convenzioni internazionali per la protezione del diritto d'autore (Convenzione di Berna, Convenzione di Ginevra). Nessuna parte di questa pubblicazione può quindi essere riprodotta, memorizzata o tra-smessa con qualsiasi mezzo e in qualsiasi forma (fotomeccanica, fotocopia, elettronica, ecc.) senza l'autorizzazione scritta dell'editore. In ogni caso di riproduzione abusiva si procederà d'ufficio a norme di legge.

5608

Realizzazione grafica: Exegi snc, Via Pelagio Palagi, 3/2 - 40138 Bologna
Impianti e stampa: Centro Stampa Digitalprint S.r.l., Via A. Novella 15 - 47922 Rimini (RN)

Finito di stampare nel marzo 2021

ISBN 978-88-506-5608-0

L'estratto contiene pagine non in sequenza

Prefazione

I foraggi fibrosi sono il tema di questo libro, dedicato a chi s'impegna con perseveranza, tenacia e intelligenza a valorizzare questa risorsa fondamentale e preziosa per l'evoluzione del comparto foraggero-zootecnico. Una risorsa che merita la nostra attenzione non solo perché costituisce il perno attorno al quale consolidare il futuro della zootecnia, ma anche per il ruolo ecologico che sostiene e che sarebbe in grado di sostenere nel degradato territorio italiano.
Infatti i foraggi fibrosi, che provengono sostanzialmente dal prato, sono parte integrante della razione dei ruminanti, soprattutto quelli da latte. Il connubio prato-stalla è il punto di forza di molti dei comparti lattiero-caseari storici della nostra penisola. Una fiorente zootecnia da latte si è consolidata dove il territorio si è dimostrato vocato alla produzione di foraggi fibrosi.
Quando il prato e il foraggio che esso produce sono il cardine dell'azienda zootecnica, il sistema foraggero-zootecnico che ne deriva è caratterizzato da una buona sostenibilità, valutabile in termini di GHG (*Green House Gas*, cioè gas a effetto serra), biodiversità, fertilità dei suoli, qualità e remunerazione del prodotto. Il prato, quindi, è caratterizzato da un'elevata efficienza ecologica e può, per questo, diventare una coltura sostenibile in ottica ampia, quando è inserito in comparti agricoli diversi basati su sistemi zootecnici, e quando contribuisce al sostentamento del ruminante in misura non marginale.
Del prato, delle sue tipologie, delle specie che lo possono comporre e delle altre colture produttrici di foraggi fibrosi si occupa la prima parte del libro.
Nel web sono numerosi e anche autorevoli i siti divulgativi che trattano dei prati e della loro coltivazione; ho quindi evitato di replicare questa enorme massa di informazioni cercando piuttosto di fornire una chiave di lettura agronomica e ambientale alla coltivazione del prato e di quelle colture che portano alla produzione di foraggi fibrosi. Ciò perché la finalità del libro è di fornire un supporto tecnico al foraggicoltore affinché possa valorizzare la produzione dei foraggi fibrosi adottando metodi di utilizzazione adeguati. Pertanto non si voleva, e non è stato fatto, se non nei limiti ritenuti necessari per comprendere le dinamiche di comparto, approfondire gli aspetti botanici o quelli consolidati dell'agronomia.
I motivi sostanziali di questa scelta sono tre: per prima cosa sono conscio che vi sono tecnici più qualificati di me per affrontare, approfondendoli, tutti gli aspetti agronomici che contraddistinguono queste colture; secondo perché la finalità del

L'estratto contiene pagine non in sequenza

libro è quella di fornire un supporto tecnico, e non di realizzare un trattato adatto alle biblioteche ma poco per gli operatori; terzo perché ciò che rende poco appetibile introdurre o estendere queste colture nelle aziende agricole non dipende da aspetti di stretta pertinenza agronomica, ma piuttosto dall'oggettiva complessità e dalle difficoltà insite nella raccolta e conservazione dei foraggi.
Della raccolta e della conservazione parlerò nella seconda parte del libro, che ha la pretesa di rappresentare un punto di riferimento per questo specifico campo di attività.
L'obiettivo primario infatti è quello di indicare le tecniche e gli strumenti per superare il collo di bottiglia che nel sistema prato è rappresentato dalla fienagione, cioè da quell'insieme di attività con le quali l'agricoltore raccoglie e rende conservabile il foraggio.
Con la fienagione l'agricoltore cerca di salvaguardare la qualità (e la quantità) del suo raccolto, ma difficilmente ci riesce nelle misure possibili.
In questo libro gli spunti per migliorare la linea tecnologica e introdurre nuovi sistemi di conservazione ritengo siano numerosi. Spero che qualche agricoltore sappia farne tesoro, perché questa sarà per me la più preziosa delle ricompense.

L'estratto contiene pagine non in sequenza

Indice

Prefazione III

PARTE I - I FORAGGI FIBROSI

1. Introduzione 3

2. Il prato 7
2.1 Premessa 7
2.2 Prati avvicendati 12
2.2.1 Consociazioni 16
2.2.2 Impianto del prato 20
2.3 Prati permanenti 25
2.3.1 Prati stabili di pianura 28
2.4 Erbai 30

3. Le principali specie 35
3.1 Fabacee 35
3.2 *Medicago sativa* L. (Erba medica) 39
3.2.1 Note di botanica 42
3.2.2 L'impianto del medicaio 46
3.2.3 I fabbisogni nutrizionali 52
3.2.4 La gestione agronomica 53
3.2.5 L'utilizzazione 56
3.3 Altre fabacee 56
3.3.1 *Trifolium repens* var. *giganteum* (Trifoglio bianco ladino) 57
3.3.2 *Trifolium pratense* L. (Trifoglio pratense o violetto) 58
3.3.3 *Hedysarum coronarium* L. (Sulla) 59
3.3.4 *Onobrychis viciifolia* Scop. (Lupinella) 61
3.4 Poacee 63
3.4.1 Ciclo biologico e note agronomiche 66
3.4.2 *Dactylis glomerata* L. (Erba mazzolina) 70
3.4.3 *Festuca arundinacea* Schreb. (Festuca arundinacea) 71
3.4.4 *Lolium perenne* L. (Loietto perenne o inglese) 72
3.4.5 *Phleum pratense L.* (Fleolo o Coda di topo) 74

L'estratto contiene pagine non in sequenza

4. Il valore del prato 75
4.1 Condizioni “virtuose” 75
4.2 Dinamica della sostanza organica 80
4.3 Il ruolo sinecologico della sostanza organica del terreno 83
4.4 Il sequestro di carbonio 85

PARTE II - LA FIENAGIONE

5. Introduzione 91

6. I sistemi di utilizzazione del foraggio 97
6.1 Il comportamento del foraggio sul campo 98
6.2 Un modello per descrivere il processo evaporativo sul campo 102
6.2.1 Deficit di Saturazione (DS) 102
6.2.2 Sommatoria del Deficit di Saturazione (SDS) 104
6.2.3 Modelli matematici 106
6.3 Completa essiccazione del foraggio sul campo 109
6.3.1 Consigli pratici 112
6.3.2 Alterazioni e perdite di foraggio 113
6.3.3 La salubrità dei foraggi 120
6.4 Fienagione in due tempi 128
6.4.1 Classificazione dei sistemi di essiccazione 133
6.4.2 L’essiccazione artificiale 136
6.5 Insilamento 139
6.5.1 Il decorso dell’insilamento 142
6.5.2 Elementi da considerare 144
6.6 Le occasioni utili allo svolgimento della fienagione 146

7. Le operazioni di campo 153
7.1 Taglio 157
7.1.1 Sistemi di taglio 159
7.1.2 Falciatrici rotative 163
7.1.3 Scelta del disco 167
7.1.4 I sistemi di protezione 170
7.1.5 Le regolazioni 173
7.2 Condizionamento 175
7.2.1 Caratteristiche e regolazioni 181
7.3 Rivoltamento e spandimento 182
7.3.1 Voltaspandiforaggio 184
7.3.2 Come funziona e come si regola 189
7.4 Ranghinatura e andanatura 193
7.4.1 Ranghinatori a rotore 196

L'estratto contiene pagine non in sequenza

7.4.2 Ranghinatore a pettine 203
7.4.3 Ranghinatore a ruote stellate 205
7.4.4 Ranghinatore a nastro con pettini 207
7.4.5 Ranghinatore combinato 208
7.4.6 Inversori di andana e andanatori a tappeto 209
7.5 Raccolta 213
7.5.1 Rotoimballatrice 219
7.5.2 Imballatrici giganti 230
7.5.3 Rimorchio autocaricante 233
7.5.4 Raccoglitrinciacaricatrice 234
7.6 II trasporto 238
7.6.1 Il trasporto del foraggio imballato 239
7.6.2 Il trasporto del foraggio trinciato 241

8. Impianti per la conservazione 243
8.1 Essiccazione artificiale del foraggio sfuso 243
8.2 Essiccazione artificiale delle rotoballe 247
8.2.1 Aspetti energetici 251
8.3 Essiccazione artificiale forzata 252
8.4 Considerazioni per tutte le tipologie di impianti 254
8.5 Disidratazione a bassa temperatura 257
8.5.1 Che cosa succede durante la disidratazione 260
8.5.2 Parametri operativi 261
8.6 Insilamento 263
8.6.1 Silo orizzontale 263
8.6.2 Fasciatrice 268
8.6.3 Insilatrice tubolare 274
8.7 Movimentazione e prelievo del foraggio 276
8.7.1 Foraggio sfuso 277
8.7.2 Prelevamento del foraggio dal silo 280
8.7.3 Carro trinciamiscelatore 281

9. Alcuni approfondimenti 287
9.1 La fienagione in montagna 287
9.1.1 Trattori adattati 288
9.1.2 Operatrici speciali per la montagna 290
9.1.3 Operatrice semovente monoasse 295
9.2 Danni alla cotica erbosa e al terreno 299
9.3 La fienagione del futuro 306
9.3.1 Agricoltura di Precisione 307
9.3.2 Applicazioni potenziali 315
9.3.3 Nirs che passione 318

L'estratto contiene pagine non in sequenza

APPENDICI

Appendice A. Elementi per la progettazione di impianti per l'essiccazione del foraggio

A.1 Acqua da evaporare ed energia termica 325
A.1.1 Celle di essiccazione 325
A.1.2 Platea per foraggio imballato 329
A.2 Dimensionamento della cella di essiccazione 330
A.3 Il ventilatore 333
A.3.1 La misura della pressione 338
A.4 Considerazioni sui supporti energetici 340
A.4.1 Il collettore solare ad aria 342

Appendice B. Elementi per la progettazione di un silo

B.1 Dimensionamento del silo orizzontale 347
B.1.1 Il volume 347
B.1.2 Altezza e larghezza 348
B.1.3 Lunghezza e corredi utili 349
B.1.4 Soluzioni per le piccole aziende 351
B.2 Formazione del silo 352
B.3 Silo verticale per la montagna 354

Postfazione 355

L'estratto contiene pagine non in sequenza

PARTE II
La Fienagione

L'estratto contiene pagine non in sequenza

5. Introduzione

A parole, tutti i tecnici concordano nell'evidenziare quanto sia fondamentale il contributo fornito dal foraggio fibroso, soprattutto nell'alimentazione della vacca da latte; nei fatti interi comparti zootecnici relegano il contributo di quest'alimento nella dieta delle lattifere a valori inferiori al 10% e non raramente lo eliminano completamente dalla razione sostituendolo con la paglia. Escludere o diminuire drasticamente il foraggio dalla dieta significa ridurre la sostenibilità dell'allevamento zootecnico, rinunciare alle peculiarità organolettiche conferite da questo alimento, allentare il legame col territorio, procedere verso una omologazione sia del modo di produrre sia dei prodotti ottenuti (Fig. 5.1).
I motivi? Innanzitutto, produrre foraggi da prato è complesso e oneroso in termini di tempo e, ad una valutazione superficiale, all'allevatore appaiono più remunerative le ore passate in stalla rispetto a quelle passate sui campi. Inoltre, è difficile produrre un foraggio caratterizzato da una salubrità adeguata alle prestazioni delle bovine attuali. L'alimentarista scopre così che riducendo il contributo alimentare fornito dai foraggi fibrosi, le prestazioni e la qualità talvolta migliorano proprio perché con i foraggi se ne vanno anche spore, nitriti e micotossine.

Figura 5.1 - *La qualità del foraggio, intesa come salubrità e valore nutritivo, è un supporto alimentare imprescindibile per la zootecnia dei ruminanti italiana.*

L'estratto contiene pagine non in sequenza

Figura 5.2 - *Divulgare la conoscenza è un compito difficile. Riesce quando sperimentazione e innovazione sono tradotti in percorsi tecnologici concreti per l'azienda foraggero-zootecnica.*

In realtà i foraggi moderni possiedono tutte le potenzialità per fornire, oltre all'indispensabile apporto di fibra, anche un non trascurabile contributo energetico e proteico e quei fattori nutrizionali importanti per il benessere della bovina. Questa evoluzione delle potenzialità produttive, riscontrabile sia nelle graminacee sia nelle leguminose foraggere, rende ancora più urgente intervenire sulla fase dell'utilizzazione di questi foraggi individuando metodi e attrezzature idonee alle esigenze della moderna zootecnia. La fienagione quindi assume in questa fase storica una funzione strategica, ed è a lei che è dedicata questa parte del libro.
Fienagione è la somma di quelle pratiche che si svolgono in parte sul campo e in parte in azienda con lo scopo di rendere conservabile il foraggio fibroso proveniente dal prato o dall'erbaio. Un compito solo in apparenza semplice, che cela nel suo percorso diverse insidie che bisogna imparare a conoscere per poterle superare in modo appropriato.
Si deve iniziare con lo sgombrare il campo dalle semplificazioni alle quali anche la comunicazione tecnica ricorre (Fig. 5.2). A leggerla si potrebbe pensare che i foraggi prodotti oggi siano di qualità. Ciò è vero solo in parte. Sicuramente sono migliori di quelli di cinquanta anni fa, quando entrò sul mercato la rotoimballatrice che, a fronte di una razionalizzazione delle operazioni di trasporto e immagazzinamento, provocò un generalizzato scadimento della qualità dei fieni. Fu necessario attendere un paio di decenni prima che fossero realizzati impianti di essiccazione dei foraggi imballati; uno sviluppo tecnologico che portò a un netto miglioramento della qualità in molte zone di produzione del Parmigiano Reg-

L'estratto contiene pagine non in sequenza

Figura 5.3 - *Salvaguardare la qualità richiede l'adozione di un percorso tecnologico che inizia all'atto del taglio (cortesia Maschio).*

giano e non solo. Negli anni successivi una maggiore consapevolezza nei foraggicoltori e la contemporanea disponibilità di tecnologie per la fienagione, capaci di salvaguardare sempre meglio questo prezioso prodotto, hanno ulteriormente contribuito a migliorare la qualità media dei fieni (Fig. 5.3). Tuttavia, ancora oggi l'associazione fra "fienagione" e "qualità" suona più come un auspicio piuttosto che come un traguardo raggiunto. Infatti, produrre un foraggio di qualità non è facile, ma lo è ancora meno poterlo immagazzinare in azienda preservandone tutte le qualità che manifestava all'atto del taglio.

Produrre foraggio è impegnativo, richiede dedizione e rigore e non propone mai scappatoie e sotterfugi: la fisica e la biologia, prima ancora dell'agronomia, non lo consentono. La scienza ha indagato per decenni alla ricerca di soluzioni tecnologiche e biologiche che consentissero di valorizzare i foraggi, e i sistemi di fienagione attuali ne sono la testimonianza.

Notevolissimo il contributo dato dalle case costruttrici di attrezzature per la fienagione che, dopo un lungo percorso di ottimizzazione, propongono oggi soluzioni tecnologiche in grado di assecondare le esigenze della fienagione moderna. Ultima in ordine di tempo, ma non d'importanza, l'agricoltura di precisione che si è imposta subito con soluzioni semplici e oggi di basso costo, utilissime nella fase di campo, mentre si stanno elaborando nuove strategie e soluzioni che tendono sempre più a legare la produzione di foraggi fibrosi e quella degli insilati energetici con la stalla e il caseificio con l'intento di giungere a un'integrazione verticale che poggi su produzioni salubri, economiche e remunerative.

L'estratto contiene pagine non in sequenza

Figura 5.4 - *La fienagione è soggetta a un'imprevedibilità superiore a quella di tutti gli altri processi di trasformazione del prodotto agricolo.*

Questi processi di crescita e miglioramento tecnologico non hanno trovato sul lato degli impianti altrettanto limpido sviluppo. In particolare, su quelli per l'essiccazione vi è ancora la necessità di separare la farina dalla crusca e ciò è un fatto che continua a deprimere la foraggicoltura italiana che altrimenti avrebbe potuto affermarsi in modo più perentorio fornendo in più ampia misura il suo contributo. Infatti, la tipologia delle sue produzioni zootecniche e del suo clima avrebbe potuto trovare nella fienagione in due tempi una sincrasi che invece ancor'oggi stenta a costituirsi. Complice una scarsa conoscenza da parte di tutti gli attori delle relazioni fisiche che stanno alla base di questo elementare processo e la preferenza per una comunicazione poco chiara da parte delle ditte costruttrici.

La qualità di un fieno è il risultato di una strategia aziendale specifica applicata a un determinato territorio e soggetta a un'imprevedibilità superiore a quella che caratterizza le altre colture agrarie. Infatti, le scelte agronomiche e di meccanizzazione che contraddistinguono la fienagione impongono permanenze sul campo la cui lunghezza dipende dal sistema di conservazione adottato; in ogni caso devono confrontarsi con andamenti meteorologici prevedibili solo con brevissimo anticipo (Fig. 5.4).

Le scelte che influenzano la qualità finale del fieno iniziano con l'impianto del prato e coinvolgono le specie e le varietà seminate e sono determinate poi dal modello di gestione applicato, all'interno del quale pesano in modo rilevante la concimazione e l'irrigazione (Fig. 5.5). Fondamentale diventa poi l'individuazione della fase fenologica per eseguire il taglio del prato che influenza in misura

L'estratto contiene pagine non in sequenza

Figura 5.5 - *Le scelte che influenzano la qualità finale del fieno iniziano con l'impianto del prato e coinvolgono le specie e le varietà seminate (cortesia Kverneland).*

decisiva le quantità prodotte e soprattutto le caratteristiche nutrizionali e di digeribilità del foraggio. La successiva fienagione, infatti, non può migliorare la qualità del foraggio, ma solo tentare di salvaguardarla riducendo al minimo le perdite quantitative e soprattutto qualitative.
Pertanto, ed è bene ripeterlo, la qualità del foraggio si costruisce con scelte agronomiche coerenti al territorio e agli obiettivi che l'agricoltore si pone; è massima all'atto del taglio e poi con la fienagione inevitabilmente si riduce. Infatti, tale processo determina delle alterazioni nella qualità (sempre gravi) e delle perdite di quantità (più sopportabili). Esistono però strategie che consentono di preservarla in maggior misura arrivando a produrre un alimento adeguato alla delicata fisiologia delle bovine più performanti. Produrre un fieno di qualità è quindi possibile, ma richiede grande attenzione in tutte le fasi di coltivazione e la disponibilità di una linea di macchine adeguata alla superficie da trattare e alle caratteristiche del foraggio (Fig. 5.6).
La particolarità della fienagione risiede nel fatto che questo è l'unico processo agricolo di trasformazione che avviene sul campo e per questo è soggetto alle bizze dell'andamento meteorologico.
Il modo migliore per evitare la spada di Damocle rappresentata dal rischio di pioggia è quello di abbreviare la permanenza sul campo del foraggio. Ciò è perseguibile adottando strategie precise che iniziano all'atto del taglio, con il condizionamento del foraggio e proseguono con la scelta di un modello di gestione appropriato che può prevedere la reiterazione d'interventi di arieggiamento finché l'umidità del prodotto lo consente o la gestione del foraggio mediante rivol-

L'estratto contiene pagine non in sequenza

Figura 5.6 - *Dietro a un buon foraggio vi sono sempre cura e passione (cortesia Kverneland).*

tamenti dell'andana, e terminano con il completamento del processo evaporativo all'interno di impianti capaci di estrarre artificialmente l'acqua che residua nel foraggio o con l'insilamento.
La tipologia del prato, la sua produttività e lo stadio fenologico al quale è eseguito il taglio influiscono sul processo di fienagione. Semplificando, possiamo considerare che maggiori quantità e migliori caratteristiche nutrizionali possiede il foraggio al taglio e più diventa conveniente implementare una linea di macchine capace di preservare tali caratteristiche.

L'estratto contiene pagine non in sequenza

6. I sistemi di utilizzazione del foraggio

Il foraggio è conservato creando condizioni in grado di evitare, o almeno ostacolare, i fenomeni di degenerazione, per lo più di origine biologica, che si svolgono a carico della materia organica. Ciò si ottiene realizzando processi di tipo fisico, riconducibili a trattamenti che mirano all'asportazione completa dell'acqua libera[1] contenuta nel foraggio, e chimico-biologici mediante lo sviluppo di fermentazioni in ambiente anaerobico che producono l'acidificazione dell'acqua libera ancora presente nella massa.
I sistemi di conservazione del foraggio (Tab. 6.1) che fanno riferimento al principio fisico sono quelli caratterizzati da completa essiccazione sul campo, ottenuta con trattamenti meccanici, da fienagione in 2 tempi e da disidratazione ottenute con trattamenti meccanici sul campo e di ventilazione artificiale in appositi impianti che operano, rispettivamente, a bassa e ad alta temperatura. Al principio chimico-biologico fa, invece, riferimento l'insilamento ottenuto con trattamenti meccanici sul campo finalizzati a ridurre il contenuto d'acqua del foraggio (con lo scopo di facilitare il controllo del processo fermentativo e potenziarne gli effetti),

Tabella 6.1 - I sistemi di utilizzazione del foraggio.

Sistema di conservazione		Principio	Gestione
Completa essiccazione sul campo		Totale eliminazione dell'acqua libera	Sfuso o imballato
Fienagione in due tempi	Essiccazione artificiale		
	Essiccazione artificiale forzata		Sfuso*
	Disidratazione a bassa temperatura		
Insilamento		Parziale eliminazione dell'acqua libera e acidificazione	Sfuso o imballato

* Al termine del processo può essere prevista l'imballatura del foraggio mediante attrezzature che operano a punto fisso.

[1] Con acqua libera si intende quella porzione di acqua presente all'interno del foraggio o di altro alimento che, non essendo intimamente legata alla materia che lo compone, può essere utilizzata dai microrganismi per i loro processi biologici. È quindi evidente che la sua asportazione consente di conservare il prodotto.

L'estratto contiene pagine non in sequenza

e di compressione della massa e isolamento dall'aria atmosferica all'atto del carico dell'impianto.
In tutti i casi è prevista una fase sul campo la cui durata è molto variabile e il cui scopo è di ridurre il contenuto d'acqua fino al raggiungimento di valori che consentono la diretta conservazione o l'esecuzione dei successivi trattamenti aziendali.
L'analisi del processo di evaporazione dell'acqua dal foraggio assume quindi una valenza generale.

6.1 Il comportamento del foraggio sul campo

L'essiccazione implica il passaggio dell'acqua dal foraggio tagliato all'atmosfera dove si disperde. Questo fenomeno si manifesta naturalmente e la velocità di liberazione dell'acqua dipende da quanta acqua è contenuta nella pianta e dalla capacità di estrazione posseduta dall'aria che potremmo definire come capacità essiccante dell'aria.
In sostanza dobbiamo immaginare l'atmosfera come una grande pompa che agisce quando la pressione di vapore dell'aria è tale da riuscire a vincere le resistenze opposte dal vegetale, anche queste rappresentabili in termini di pressione. Infatti, queste resistenze derivano dalla pressione con la quale la sostanza vegetale trattiene l'acqua rallentandone la diffusione attraverso le pareti cellulari, i tessuti e infine la cuticola che riveste la superficie della pianta. La pressione è maggiore quando si trova all'interno della cellula, minore quando si trova negli spazi intercellulari. Se ne deduce che maggiore è il contenuto di acqua e più intensa sarà l'evaporazione. Per quanto riguarda l'aria, le situazioni più efficaci, invece, si verificano quando è necessario immettere "molto" vapore per saturare l'aria, cioè quando il deficit di saturazione è elevato. Questa condizione si verifica quando l'umidità relativa[2] dell'aria è bassa e la sua temperatura è alta.
Questi due parametri determinano e dirigono il processo di evaporazione che però può essere accelerato o rallentato da molti altri fattori che è necessario esaminare per meglio comprendere questo fenomeno. Il più importante co-fattore del processo di essiccazione sul campo è rappresentato dalla radiazione solare che (direttamente) agisce trasferendo energia termica alle singole molecole d'acqua facilitando il "salto" dallo stato liquido a quello gassoso, e (indirettamente) elevando la temperatura dell'ambiente in cui si svolge la fienagione e quindi incrementando la pressione di vapore dell'aria.
Altri fattori, come la presenza di vento, le caratteristiche botaniche delle piante e lo stadio di maturazione del prato, l'umidità del terreno, la quantità di foraggio

[2] L'umidità relativa esprime in percentuale il rapporto fra il contenuto d'acqua presente in una certa quantità d'aria, espresso in peso, e il contenuto d'acqua che la stessa aria conterrebbe alla saturazione.

L'estratto contiene pagine non in sequenza

per unità di superficie e, in collina o montagna, la giacitura[3] del campo, possono svolgere un ruolo molto importante nel processo evaporativo, soprattutto in particolari contesti territoriali.
Quando l'umidità relativa dell'aria è prossima alla saturazione (ad esempio quando è superiore al 90%) l'evaporazione si interrompe indipendentemente dall'intensità della radiazione solare o di altri fattori. In queste condizioni igrometriche può addirittura accadere che un foraggio che abbia concluso il suo processo di essiccazione riassorba dell'acqua, cioè che questa ritorni dall'atmosfera al fieno fino a raggiungere un equilibrio detto igroscopico[4]. Se invece l'umidità relativa è bassa il processo di trasferimento dell'acqua all'aria diventa notevolmente più rapido quando i fattori elencati vi possono contribuire.
I normali moti convettivi dell'aria provvedono a ricambiare l'aria ostacolando la formazione di un microclima umido all'interno e in prossimità dello strato di foraggio steso sul campo ad essiccare; il vento agisce in modo analogo ma con più efficienza forzando il ricambio d'aria anche all'interno della massa di foraggio, soprattutto quando è mantenuta in andana. In paesi come la Scozia e l'Irlanda, gli agricoltori sfruttano il vento per accelerare l'evaporazione (non facilissima a quelle latitudini) creando andane alte e disposte, quando possibile, ortogonalmente alla direzione predominante del vento.
Le caratteristiche botaniche delle piante influenzano il processo di evaporazione e ciò ha una rilevanza soprattutto nei prati polifiti. Ad esempio, alcuni ricercatori hanno rilevato che le fabacee e le dicotiledoni in genere richiedono un maggior tempo per completare l'essiccazione rispetto alle poacee a causa del maggiore contenuto iniziale di acqua e per la maggiore quantità di steli nella pianta (dai quali l'acqua "fatica" di più per uscire). Fa eccezione il trifoglio bianco (*Trifolium repens* L.), una fabacea che essicca con maggiore rapidità rispetto alle altre specie della famiglia, pur presentando un contenuto iniziale di acqua superiore. Le cause di queste differenze sono riconducibili al rapporto fra gli steli e le foglie, allo spessore della cuticola e al numero e alla disposizione delle aperture stomatiche sulla pianta. Talvolta, invece, la predisposizione all'essiccazione viene modificata da alcune peculiari caratteristiche morfologiche come accade con il loietto inglese (*Lolium perenne* L.) dove la presenza di guaine fogliari avvolte più strettamente allo stelo sono la probabile causa di un allungamento dei tempi di essiccazione (fino a quattro volte!) rispetto a quelli della festuca arundinacea (*Festuca arundinacea* L.).
È invece credenza diffusa che il taglio tardivo dei prati polifiti, soprattutto di quelli ricchi di poacee, semplifichi l'intero svolgimento del processo evaporativo.

[3] La giacitura di una superficie dipende dalla pendenza, cioè dalla sua inclinazione rispetto all'orizzontale, e dall'esposizione, voce che ne definisce la posizione rispetto ai punti cardinali. In condizioni di piano, quando cioè l'inclinazione della superficie è pari a zero, l'esposizione non può essere definita.
[4] In condizioni di equilibrio igroscopico la pressione di vapore nel vegetale e quella nell'atmosfera si equivalgono: il contenuto d'acqua nel foraggio rimane inalterato. I fieni, come gli altri prodotti agricoli conservati essiccati, sono materiali molto igroscopici e manifestano un continuo scambio di vapore con l'aria oscillando intorno a stati di equilibrio igroscopico.

L'estratto contiene pagine non in sequenza

Questo è solo in parte vero dato che se da un lato, all'atto del taglio il foraggio tagliato tardivamente presenta un contenuto d'acqua notevolmente inferiore a quello di un foraggio tagliato al giusto grado di maturazione, dall'altro il progressivo deposito di polisaccaridi e lignina sulle pareti cellulari può rallentare la fuoriuscita dell'acqua. Questa condizione si verifica soprattutto in ambiente montano dove anche a causa del basso livello tecnologico che contraddistingue le linee di macchine qui impiegate nella fienagione gli allevatori ricorrono a queste scorciatoie. Eseguire il taglio tardivo però, è bene ricordarlo, riduce fortemente il contenuto nutritivo del foraggio e la sua digeribilità.
Avviare la fienagione quando il terreno è molto umido è fortemente sconsigliato sia perché il trattore può formare ormaie superficiali e compattare il terreno in profondità (il terreno umido è meno portante), sia perché l'evaporazione dell'acqua dal suolo creerebbe un microclima umido tale da rallentare se non impedire l'essiccazione del foraggio. Tuttavia l'avvio della fienagione è spesso una mediazione fra esigenze contrastanti: da un lato la necessità di effettuare il taglio nella fase fenologica che individua la corretta maturazione del prato, dall'altro l'obbligatorietà di intervenire solo quando le previsioni meteorologiche indicano una finestra utile allo svolgimento della fienagione. Lo stato udometrico del suolo può rappresentare un altro fattore da considerare soprattutto per i terreni caratterizzati da un buon contenuto di argilla nei quali le condizioni di elevata umidità possono perdurare anche nelle giornate utili allo svolgimento della fienagione. In queste situazioni, purché il terreno non si trovi in uno stato superiore alla capacità di campo, è possibile avviare la fienagione prevedendo il mantenimento del foraggio in andana affinché le fasce di terreno libere dal foraggio possano ridurre il contenuto d'acqua dello strato più superficiale.

Figura 6.1 - *La distribuzione agronomica delle deiezioni zootecniche migliora la produttività dei prati e la sostenibilità dell'allevamento (cortesia Joskin).*

L'estratto contiene pagine non in sequenza

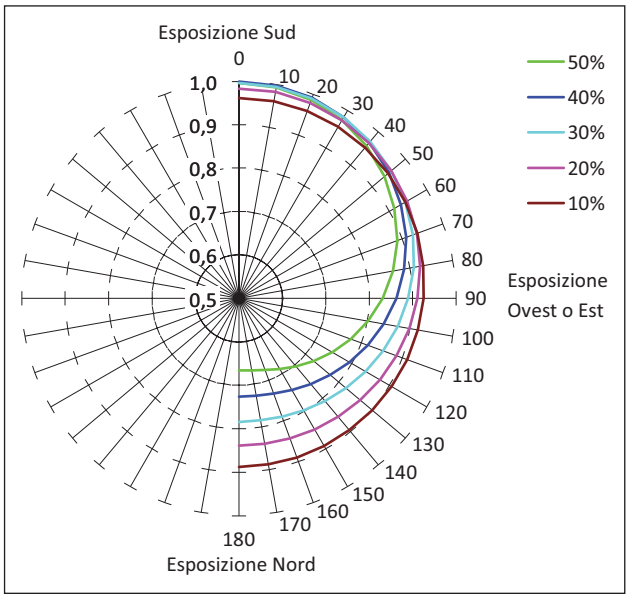

Figura 6.2 - *Coefficiente di insolazione determinato per superfici a prato caratterizzate da diversa pendenza ed esposizione, con latitudine di 45 gradi N, nel mese di giugno alle ore 12.00.*

Anche la produttività del prato influisce sul decorso della fase di campo della fienagione (Fig. 6.1). Com'è prevedibile, quanto maggiore è la produzione di foraggio tanto maggiore è la quantità d'acqua che deve evaporare per unità di superficie e ciò influisce negativamente sulla durata del processo. Il condizionamento e la reiterazione di operazioni di arieggiamento possono però contribuire a ridurre le differenze nella durata dell'essiccazione indotte dalla quantità di foraggio.
Infine, come anticipato, anche la giacitura interferisce con l'essiccazione modificando l'intensità della radiazione solare che colpisce la superfice: ad esempio in prossimità del solstizio d'estate una superficie caratterizzata da una pendenza di circa il 40% esposta a sud riceve una radiazione solare più potente di circa il 30% rispetto ad una con la medesima pendenza ma rivolta a nord[5]. È quindi evidente come una non buona giacitura possa interferire con l'andamento della fienagione proprio perché è maggiore l'energia ricevuta dalla radiazione solare (Fig. 6.2).
La minor disponibilità di radiazione solare influisce anche sullo sviluppo del prato e per tale motivo le giaciture meno favorevoli sono lasciate alla foresta dedicando all'agricoltura solo quelle migliori. Ciononostante anche ridotte differenze modificano il decorso della fienagione sul campo: a parità di altre condizioni i foraggi essiccano prima sui prati esposti a sud o a sud sud-ovest rispetto ai prati esposti a est.

[5] In particolare, l'intensità della radiazione solare (Φ, in J/m^2) che giunge su una determinata superficie per ogni istante può essere definita da: $\Phi = I_0 \cdot G$. Dove I_0 rappresenta l'energia che perviene per ogni istante di tempo su una superficie esposta perpendicolarmente ai raggi solari, in J/m^2; G il coefficiente di insolazione che esprime la posizione del sole rispetto alla superficie in funzione di una serie di parametri geografici ed astronomici.

L'estratto contiene pagine non in sequenza

6.2 Un modello per descrivere il processo evaporativo sul campo

Comprendere bene l'andamento di questo fenomeno fisico consente di compiere scelte consapevoli all'interno della propria azienda (Fig. 6.3).
Le metodologie proposte offrono inoltre la possibilità di condurre analisi di campo, confrontare soluzioni, approfondire aspetti statistici del proprio territorio e quindi governare il processo con più efficienza.

6.2.1 Deficit di Saturazione (DS)

In linea generale la velocità di evaporazione di una superficie di acqua libera a contatto con l'aria è proporzionale al deficit di saturazione dell'aria che esprime la differenza fra la pressione del vapore saturo corrispondente alla temperatura rilevata alla superficie dell'acqua (p_w (t)) e la pressione del vapore nell'aria (p_a):

$$DS = p_w (t) - p_a$$

L'evaporazione accresce la quantità di vapore nell'aria mediante l'assorbimento di calore, che determina a sua volta una riduzione della temperatura. Con l'aumentare del contenuto percentuale di umidità dell'aria il processo rallenta fino ad esaurirsi quando l'aria raggiunge la saturazione. Sul campo questo non accade perché i movimenti convettivi dell'aria in prossimità del foraggio, causati principalmente dalla differenza di temperatura, favoriscono la diffusione del vapore nell'ambiente. L'analisi del processo di essiccazione del foraggio richiede l'impiego di un indice climatico che consenta di definire le condizioni meteorologiche che regolano il fenomeno dell'evaporazione anche mediante la formalizzazione di un modello. Ma è necessario che l'indice possa essere calcolato in base alla registrazione di fattori meteorologici di facile misura e di facile reperimento nella letteratura. Infatti, questo tipo di informazione meteorologica potrebbe essere utilizzata non solo per analizzare l'andamento del processo di essiccazione sul campo durante il suo svolgimento, ma anche in chiave sia storica e sia previsionale per verificare

Figura 6.3 - *Il processo evaporativo può essere accelerato da interventi meccanici, dalla radiazione solare, dal vento, ma perché si verifichi è necessario che l'aria abbia un deficit di saturazione adeguato (cortesia John Deere).*

L'estratto contiene pagine non in sequenza

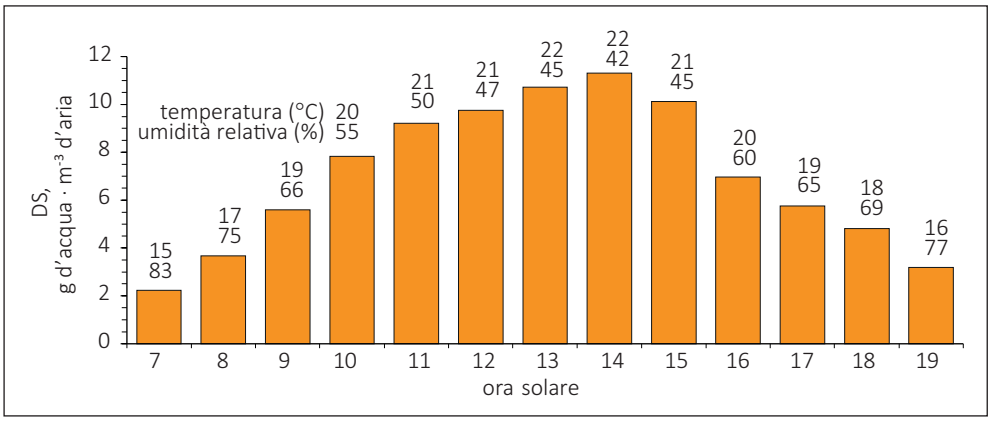

Figura 6.4 - *Andamento del Deficit di Saturazione (DS) nel corso di una giornata caratterizzata da condizioni favorevoli in ambito montano.*

la reale capacità essiccante accumulata o accumulabile nelle serie di giorni contigui non piovosi. In questo modo diventerebbe possibile completare l'informazione ottenuta mediante l'analisi storica degli eventi di pioggia pesando la capacità essiccante di ciascuna occasione di fienagione. L'analisi delle opportunità che mediamente si manifestano nell'arco di 20 o 30 anni consentirebbe di ricavare un indice mediante il quale classificare il territorio, indicare i metodi e le strategie di fienagione più convenienti per quel dato luogo.
A questi requisiti risponde bene l'indice climatico basato sul deficit di saturazione dell'aria (DS, in g di acqua · m^{-3} di aria · h) calcolato in funzione della temperatura e dell'umidità relativa dell'aria. Questo esprime la differenza fra il contenuto di umidità assoluta che l'aria può contenere alla saturazione e quello realmente presente nelle medesime condizioni di temperatura e può essere calcolato secondo la formula di Bosen[6] che semplifica le complesse relazioni psicrometriche che legano temperatura e umidità dell'aria:

$$DS = 622 \cdot (100\text{-}UR) \cdot E_{(t)} \cdot 287^{-1} \cdot (t + 273)^{-1}$$

dove:
UR = umidità relativa dell'aria (%)
$E_{(t)}$ = $33{,}8639 \cdot [(0{,}00738 \cdot t + 0{,}8072)^8 - 0{,}000019 \cdot (1{,}8 \cdot t + 4{,}8) + 0{,}001316]$
t = temperatura dell'aria (°C)

Il deficit di saturazione orario esprime, quindi, una misura della capacità di essiccazione dell'aria e presenta un andamento nell'arco della giornata caratterizzato da un massimo che generalmente si manifesta nelle prime ore pomeridiane in concomitanza con i valori di temperatura maggiori e umidità relativa minori (Fig. 6.4).

[6] Bosen J.F. (1960) – A formula for approximation of the saturation vapor pressure over water. *Monthly Weather Revue*, August.

L'estratto contiene pagine non in sequenza

6.2.2 Sommatoria del Deficit di Saturazione (SDS)

La sommatoria di deficit di saturazione medi orari consente di esprimere la potenzialità di evaporazione nell'arco di una o di più giornate o, al limite, dell'intero periodo di fienagione. La sommatoria del deficit di saturazione (SDS, in g di acqua · m^{-3} di aria · h), calcolata escludendo le ore diurne marginali, è quindi un potente strumento di calcolo (Tab. 6.2).
In giornate caratterizzate da condizioni climatiche molto favorevoli, si possono ottenere valori di SDS pari a 90 e 120 g di acqua · m^{-3} di aria · h rispettivamente in montagna e in pianura, mentre valori inferiori a 30 e a 50 g di acqua · m^{-3} di aria · h, rispettivamente in montagna e in pianura, indicano giornate poco influenti sul processo di essiccazione.
Tali variazioni nella SDS giornaliera dipendono dalla temperatura: al suo crescere cresce la quantità di acqua che l'aria riesce a contenere. Dato che in pianura le temperature sono più elevate, in tale ambiente il processo evaporativo dovrebbe procedere con maggiore celerità; in realtà ciò non è sempre vero, proprio a causa delle relazioni igroscopiche fra foraggio e atmosfera già descritte. Semplificando si può affermare che nella maggior parte dei casi la SDS in montagna è generata da contenuti di umidità relativa molto bassi (anche inferiori al 40%) mentre in pianura da elevate temperature (Fig. 6.5). Ciò fa sì che in pianura non tutti i grammi d'acqua conteggiati con SDS siano effettivamente utili.
Questa misura consente di prevedere la permanenza sul campo del foraggio perché è possibile definire per un determinato ambiente la SDS mediamente necessaria per completare il processo di essiccazione del foraggio sul campo.
È inoltre interessante notare come tale approccio consenta di analizzare l'influenza delle variabili che normalmente interferiscono col processo evaporativo: ad esempio, con produttività del prato di 3,0 e 4,5 t di sostanza secca di foraggio il conseguimento di contenuti di umidità idonei alla raccolta del foraggio come fieno ha richiesto il raggiungimento di una SDS pari rispettivamente a 140 e a 170 g di acqua · m^{-3} di aria · h.
Tenuto conto che in giorni caratterizzati da condizioni climatiche favorevoli, in cui l'umidità relativa dell'aria raggiunge nelle ore centrali della giornata valori inferiori al 50%, è possibile ottenere SDS giornaliere pari a 50-60 g di acqua · m^{-3}

Tabella 6.2 - Valori di SDS sufficienti per il raggiungimento di umidità del foraggio prossime al 25% ottenuti sul primo taglio di prati polifiti.

Condizioni	Media	Minimo	Massimo	C.V.*
SDS (g d'acqua · m^{-3} d'aria · h)	165	139	195	12,75
Acqua evaporata (kg d'acqua · kg^{-1} di sost. secca)	3,51	3,15	4,05	9,44

Rilevazioni condotte a quote comprese fra i 1.100 e i 1.300 m nella Val del Boite.
* Il coefficiente di variazione (C.V.) esprime il rapporto percentuale fra la deviazione standard e la media di un gruppo di valori.

L'estratto contiene pagine non in sequenza

Figura 6.5 - *Il processo evaporativo in montagna procede molto rapidamente in quanto, pur essendo minori le temperature, l'umidità relativa dell'aria si attesta spesso su valori inferiori al 50% (cortesia Pöttinger).*

di aria · h, si può dedurre che, nell'ambiente considerato, la raccolta del foraggio a una umidità prossima al 20% può essere effettuata dopo una permanenza sul campo non superiore ai 3 giorni.
Questo tipo di informazione consente quindi di verificare per ciascuna occasione di fienagione se la misura calcolata della "quantità di bel tempo" è sufficiente e in che misura per lo svolgimento della fienagione (Fig. 6.6). In questo modo si può definire per ogni periodo utile al taglio del prato il numero di occasioni di fienagione in funzione del rischio meteorologico che si ritiene vantaggioso accettare. La stima su base storica delle occasioni di fienagione descrive in maniera sintetica e chiara l'ambiente climatico fornendo un supporto importante nello studio della meccanizzazione della fienagione.
L'adozione di questa procedura richiede, oltre alla disponibilità di serie storiche di dati riguardanti la temperatura e all'umidità relativa, informazioni riguardanti la nuvolosità o all'intensità della radiazione solare per consentire l'analisi delle giornate che, contraddistinte da un clima incerto, sono di difficile interpretazione. Per quanto concerne invece la strutturazione dell'informazione climatica sono state individuate alcune correlazioni fra i valori del DS ottenuto dalla temperatura e umidità relativa di ore particolari della giornata, prossime a quelle caratterizzate dal maggiore deficit di saturazione, con la SDS giornaliera. Ciò può essere utile quando non sono disponibili serie storiche di parametri climatici orari altrimenti necessari per la corretta applicazione di questa procedura.

L'estratto contiene pagine non in sequenza

Figura 6.6 - *Il foraggio anche se tagliato continua a respirare ossidando importanti nutrienti sino a quando l'evaporazione riduce il contenuto d'acqua (cortesia Kuhn).*

6.2.3 Modelli matematici

L'evaporazione è caratterizzata da un andamento di tipo esponenziale decrescente; in altre parole l'intensità dell'evaporazione si riduce in misura sempre maggiore con il progredire del processo. Man mano che diminuisce il contenuto d'acqua nella pianta, aumenta la "pressione" con la quale la materia vegetale trattiene l'umidità residua che pertanto rallenta la sua fuoriuscita. Il processo di evaporazione continua fintanto che la "pressione" estrattiva dell'aria è maggiore della "pressione" che la trattiene nella pianta.
Nelle prime fasi del processo l'evaporazione è più intensa non solo perché è presente dell'acqua trattenuta all'interno della pianta da forze molto deboli, ma anche perché può fuoriuscire direttamente dagli stomi presenti soprattutto sulle foglie e, in misura minore, sugli steli. L'acqua intercellulare è sempre la prima a evaporare e a fuoriuscire dal vegetale. Poi, quando diminuisce la turgidità della pianta, gli stomi si chiudono e l'acqua è costretta a passare attraverso la cuticola, rallentando notevolmente il processo di evaporazione.
Analizzando la velocità con cui si manifesta l'evaporazione si può notare come essa rallenti in modo più che proporzionale al decrescere dell'acqua contenuta dal foraggio. Il modello matematico più idoneo per descrivere l'andamento del processo di essiccazione sul campo è, quindi, quello esponenziale di tipo decre-

L'estratto contiene pagine non in sequenza

scente. Ciò che caratterizza i diversi modelli è la tipologia dell'esponente che in molti casi è semplicemente rappresentato dal tempo di permanenza del foraggio sul campo; infatti, l'equazione che usualmente è utilizzata per descrivere questo fenomeno è così rappresentata:

$$M_t = M_0 \cdot e^{-kt}$$

dove:

M_t = contenuto d'acqua del foraggio al tempo t, in kg d'acqua/kg di s.s.[7];
M_0 = contenuto d'acqua del foraggio al momento del taglio, in kg d'acqua/kg di s.s.;
k = costante di essiccazione, in h^{-1};
t = durata dell'intervallo, in h.

Questa equazione esprime in modo ottimale l'andamento del processo evaporativo per piccoli intervalli temporali e limita la comparazione a prove condotte nello stesso luogo e nello stesso giorno. Ad esempio se vogliamo comparare gli effetti di un condizionatore dovremo svolgere la comparazione sullo stesso campo e allo stesso momento perché in un altro luogo o in un altro momento le condizioni meteorologiche potrebbero essere diverse vanificando gli esiti del confronto. Inoltre, quando è necessario analizzare l'intero processo, sorgono dei problemi perché l'essiccazione è caratterizzata da un andamento di tipo sinusoidale dovuto alla parziale ri-umidificazione subita dal foraggio durante le notti di permanenza sul campo. Tuttavia, si può verificare sperimentalmente che a una certa ora del mattino il foraggio presenta un contenuto di umidità pari a quello registrato la sera precedente e che questo intervallo può essere ritenuto, con buona approssimazione, costante per ampi periodi. L'insieme delle fasi efficaci per il processo di essiccazione, che si manifestano mediamente fra le ore 9 e le 18 (intervallo temporale che può essere opportunamente variato in funzione del mese e della latitudine e longitudine dei luoghi e anche determinato sperimentalmente), consente di dare al processo evaporativo una continuità fittizia attraverso l'eliminazione delle fasi notturne.
Un notevole passo avanti nella comprensione del fenomeno evaporativo si ottiene riferendo l'esponente a un parametro che descriva l'andamento effettivo della capacità essiccante dell'aria. In questo caso non è più il tempo "l'arbitro" del processo, ma ad esempio il Deficit di Saturazione, o meglio la sua sommatoria. L'adozione di un simile esponente permette di confrontare processi evaporativi avvenuti in giornate diverse ed anche in luoghi, purché rientranti in una medesima area geografica (ad esempio arco alpino, Pianura Padana). Tuttavia, minore è l'estensione del comprensorio e migliore è l'affidabilità della comparazione.

[7] Si noti che il rapporto è adimensionale ed in pratica esprime il contenuto di acqua contenuto nel foraggio su base secca (b.s.), mentre comunemente viene espresso come percentuale su base umida (b.u.).

L'estratto contiene pagine non in sequenza

Utilizzando la Sommatoria del Deficit di Saturazione dell'aria (SDS) è possibile descrivere il fenomeno con la funzione di Luder[8]:

$$M_t = M_0 \cdot e^{(-k_1\, sds_t + k_2\, sds_t^2)}$$

dove:

M_t = contenuto d'acqua del foraggio al tempo t, in kg d'acqua/kg di s.s.;

M_0 = contenuto d'acqua del foraggio al momento del taglio, in kg d'acqua/kg di s.s.;

sds_t = sommatoria dei valori del deficit di saturazione cumulati al tempo t, espressa in g di acqua · m^{-3} di aria · h;

k_1 = costante empirica che, secondo l'autore, esprime l'attitudine del vegetale a cedere l'acqua, in m^{-3} di aria · g^{-1} d'acqua · h^{-1};

k_2 = costante empirica che media l'influenza sul processo di fattori come la giacitura, lo stato idrico del suolo, la ventosità, di meccanizzazione, espressa in m^{-3} di aria · g^{-1} d'acqua · h^{-1}.

Questa metodologia consente di approfondire il rapporto esistente fra il processo di evaporazione e alcune caratteristiche agronomiche, orografiche e di meccanizzazione, quantificandone l'influenza. In particolare, Luder operando su prati naturali e artificiali in area alpina, ha determinato l'influenza dell'altitudine e della produttività del prato sul fabbisogno di SDS necessario al raggiungimento di un contenuto di umidità idoneo per la conservazione:

- **altitudine**: il fabbisogno di SDS decresce del 4% per ogni incremento di 100 m;
- **produttività**: il fabbisogno di SDS aumenta di circa l'8% per ogni t di sostanza secca di foraggio (verificata sul 1° taglio).

L'altitudine modifica quindi, in modo inatteso, il fabbisogno di SDS e ciò è probabilmente imputabile all'aumento dell'intensità della radiazione solare (parametro non considerato in modo diretto da questa metodologia) e alla modificazione della membrana vegetale e della struttura stessa degli steli di foraggio che lo rende più facilmente essiccabile.
Una tale funzione ha ovviamente potenziali impieghi in modelli predittivi ma poco si presta per confronti sperimentali proprio a causa del doppio esponente che rende meno immediata la comprensione. Per analizzare gli effetti indotti da tecnologie e metodi di fienagione diventa conveniente modificare l'equazione esponenziale proposta da Luder nella seguente[9]:

$$M_t = M_0 \cdot e^{-k\, sds_t}$$

[8] Luder W. (1982) – *Ermittlung der Erntegelegenheiten und des Verlustrisikos aufgrund von Klimadaten, dargestellt am Beispiel der Rauhfutterernte*. Tesi di dottorato n. 6981. Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich. p. 174.

[9] Questa funzione è stata proposta e validata nella sua affidabilità nel lavoro di L. Benvenuti, R. Cavalli e A. Ott (1995) – Forage conditioning under alpine environmental conditions. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 61: 107-114.

L'estratto contiene pagine non in sequenza

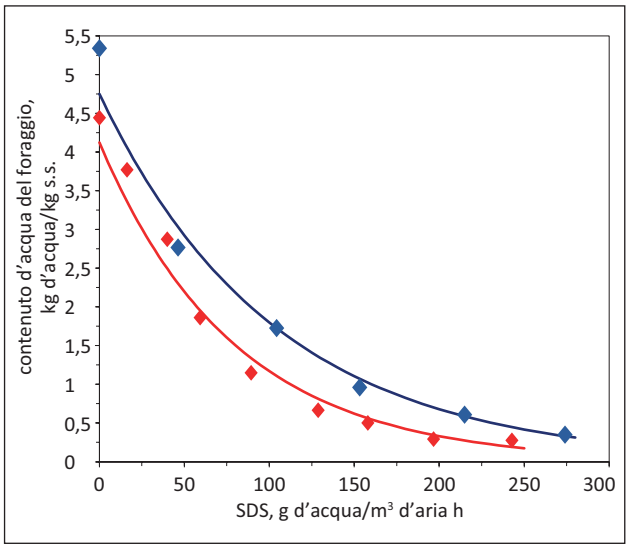

Figura 6.7 - *Analisi del processo di essiccazione sul campo sul primo taglio di erba medica trattata con due diverse falciacondizionatrici.*

dove:

M_t = contenuto d'acqua del foraggio al tempo t, in kg d'acqua/kg di s.s.;

M_0 = contenuto d'acqua del foraggio al momento del taglio, in kg d'acqua/kg di s.s.;

sds_t = sommatoria dei valori del deficit di saturazione cumulati al tempo t, in g di acqua · m^{-3} di aria · h;

k = coefficiente di essiccazione, espresso in m^{-3} di aria · g^{-1} d'acqua · h^{-1}.

Questa equazione prevede, rispetto ai modelli proposti da altri autori, l'adozione di una variabile climatica in sostituzione di quella temporale (Fig. 6.7). Ciò consente da un lato di comparare i risultati sperimentali ottenuti dalle diverse prove, anche se condotte in momenti successivi per rispettare le condizioni operative delle aziende agricole e quelle vegetative dei prati e, dall'altro, l'elaborazione di un coefficiente in grado di esprimere l'efficacia di un trattamento o l'influenza di una variabile agronomica in funzione della capacità essiccante dell'ambiente.

6.3 Completa essiccazione del foraggio sul campo

L'utilizzazione convenzionale del foraggio prevede la sua completa essiccazione sul campo, cioè fino al raggiungimento di un tenore di umidità tale da evitare, o quantomeno ridurre, i fenomeni degenerativi svolti principalmente dalla flora microbica che si manifestano con il "riscaldamento" del foraggio imballato o stivato. Tuttavia, come analizzato nei paragrafi precedenti, ciò non è facile da ottenere perché l'ultima porzione di acqua contenuta nel foraggio è trattenuta dallo stesso con una forza molto elevata. Infatti, nella fase finale l'evaporazione

L'estratto contiene pagine non in sequenza

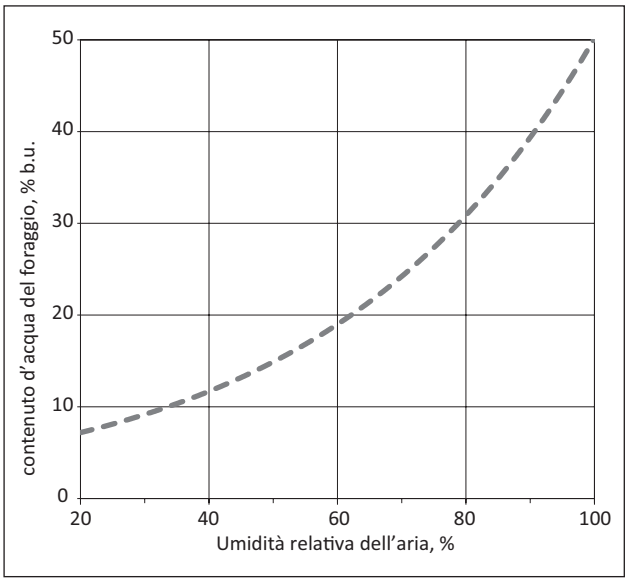

Figura 6.8 - *Curva di equilibrio igroscopico rilevata durante il processo di desorbimento di un foraggio di prato polifita con prevalenza di poacee, alla temperatura ambientale di 20 °C. Al crescere della temperatura cala il contenuto d'acqua nel foraggio e viceversa (0,25 punti percentuali per ogni grado) (Bovagne J., G. Cabon e M. Grillot. 1985 – Le foin sèchè par ventilation. Prestimprim, Lyon, p. 79).*

dipende non solo dalle caratteristiche termo-igrometriche dell'aria, ma anche dal rapporto che s'instaura fra queste e il foraggio. Così un foraggio composto prevalentemente da specie graminacee e con un contenuto di umidità pari al 30% entra in condizione di equilibrio igroscopico, cioè permane sul campo senza sensibili variazioni nel suo contenuto in acqua, quando, con temperature di 20 °C, l'umidità relativa dell'aria è superiore all'80-85% (Fig. 6.8). Per una sua rapida eliminazione, quindi, sono necessarie condizioni meteorologiche molto favorevoli caratterizzate cioè da un'elevata insolazione e, soprattutto, da valori igrometrici molto bassi, indicativamente inferiori al 60%.

Ciò non sempre accade come, ad esempio, nella Pianura Padana dove, spesso, anche nel pieno della stagione estiva, il bel tempo è associato a valori di umidità dell'aria elevati. In questi casi s'instaurano condizioni di equilibrio igroscopico, cioè il foraggio permane sul campo senza apprezzabili variazioni nel suo contenuto di acqua, aumentando il rischio di pioggia. In queste situazioni è molto frequente la raccolta di un foraggio con un contenuto d'acqua relativamente elevato, ad esempio superiore al 20%.

Il prolungarsi della permanenza sul campo causa, da un lato, un incremento del numero di operazioni meccaniche a carico del foraggio e, dall'altro, un aumento delle probabilità che esso possa sottostare a un evento piovoso. Le reiterate operazioni di spargimento, rivoltamento e ranghinatura, condotte su foraggio caratterizzato da un elevato contenuto di sostanza secca, causano perdite per frammentazione, dovute al contatto fra organi meccanici in movimento e il foraggio. Il rischio di pioggia è il fenomeno che meglio evidenzia i limiti di questo sistema di utilizzazione del foraggio poiché in grado di vanificare completamente gli sforzi produttivi della fienagione (Fig. 6.9).

L'estratto contiene pagine non in sequenza

Figura 6.9 - *Svolgere le operazioni di fienagione con tempestività contribuisce a preservare la qualità dei foraggi e le capacità produttive del prato (cortesia Kuhn).*

Il perdurare di condizioni sfavorevoli al processo evaporativo o l'approssimarsi di condizioni climatiche avverse inducono sovente l'agricoltore alla raccolta di un foraggio non completamente essiccato. Sarà durante la conservazione che la massa di foraggio cederà all'aria i punti residui di umidità raggiungendo una condizione di stabilità dinamica con valori di umidità oscillanti fra il 12% e il 14%. È quindi evidente che nelle prime fasi di conservazione l'immagazzinamento del foraggio sfuso garantisce una maggiore sofficità della massa e facilita quegli indispensabili scambi gassosi che, invece, sono notevolmente rallentati dalla compressione del foraggio in balle di grandi dimensioni (rotoballe o balle prismatiche giganti).
La presenza di acqua associata a sostanze nutritive permette la crescita microbica. Questa ha come effetto secondario la produzione di calore che, intrappolato all'interno di una massa foraggera compressa, provoca un rapido incremento della temperatura. Si innesca così una spirale in cui l'effetto, il calore prodotto dall'attività microbica, stimola la causa, cioè la crescita microbica. In particolari condizioni, per fortuna abbastanza rare, si raggiungono temperature talmente elevate da innescare processi spontanei di combustione. Frequente è invece il raggiungimento di temperature superiori ai 50 °C.
Al momento del taglio il foraggio ha un contenuto di umidità compreso fra l'80 e l'85% b.u.[10], mentre, per conseguire la stabilizzazione della massa mediante l'asportazione dell'acqua libera, è necessario che il foraggio arrivi a possedere un contenuto di umidità pari al 12-14%. Questo, che può essere considerato il

[10] L'umidità dei prodotti agricoli si esprime sempre su base umida, mentre quella dei prodotti forestali su base secca. Quando nel testo si fa riferimento alla base secca viene specificato.

L'estratto contiene pagine non in sequenza

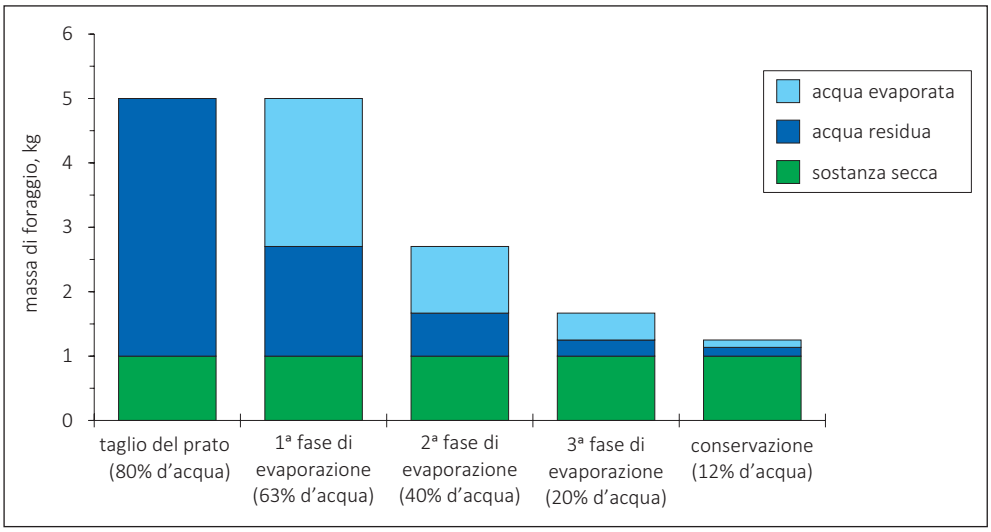

Figura 6.10 - *Semplificazione ideale del processo di essiccazione di un foraggio sul campo. Ciascuna fase è caratterizzata da una equivalente "quantità di bel tempo".*

livello di massima essiccazione raggiungibile in condizioni ambientali normali, comporta l'evaporazione di un'elevata quantità d'acqua pari a 3,86 e a 5,53 kg per kg di sostanza secca di foraggio, rispettivamente con l'80% e l'85% di umidità. La cessione di quest'acqua avviene in gran parte durante la permanenza del foraggio sul campo, ma in accordo con l'andamento esponenziale decrescente che caratterizza questo processo, l'ultima frazione di acqua contenuta nel foraggio è ceduta così lentamente, da disperdersi nell'ambiente dopo la raccolta, durante la manipolazione e la conservazione in azienda in un lasso di tempo molto maggiore. Infine, il fieno stivato entra in equilibrio dinamico cedendo o acquistando umidità dall'aria in base alle condizioni di equilibrio igroscopico.
Suddividendo un ideale processo di essiccazione in tre fasi distinte, caratterizzate però da un'eguale "quantità di bel tempo", si può ipotizzare che nella prima fase si disperda in atmosfera circa il 55-60% dell'acqua da evaporare, nella seconda fra il 25 e il 30%, nella terza poco più del 10% e quindi la quota rimanente durante lo stoccaggio (Fig. 6.10).

6.3.1 Consigli pratici

Quando si opera entro i confini della fienagione convenzionale, prima di mettere il foraggio in fienile conviene attendere l'evaporazione dell'ultima frazione di acqua.
In particolare con il foraggio imballato è bene, soprattutto se si hanno dubbi sul grado di umidità che residua, compiere un controllo della temperatura dopo qualche ora dall'imballaggio. Temperature superiori a quella ambientale testi-

L'estratto contiene pagine non in sequenza

Figura 6.11 - *Il fieno imballato deve avere un contenuto di acqua almeno inferiore al 18% per evitare problemi durante la conservazione.*

moniano attività microbiche esotermiche conseguenza di una non completa essiccazione del foraggio (Fig. 6.11). Se l'umidità è inferiore al 20-22% dopo poche ore, la temperatura inizierà a calare e il foraggio potrà considerarsi stabilizzato. Utile in questi casi è disporre le balle su pallet o grigliati (le rotoballe appoggiate su una base) in modo tale da favorire l'evacuazione del calore e del vapore acqueo dal foraggio attraverso una sorta di effetto camino.
Con il foraggio sfuso questi controlli sono più difficili perché fino a che non è stivato nel fienile raramente manifesta rialzi termici. Infatti, perché ciò avvenga, è necessario che il foraggio sia compresso.
La temperatura di un foraggio posto in cumulo o imballato è quindi una misura, indiretta del suo contenuto di acqua, rapida, pratica ed efficace. Infatti, permette di capire se il foraggio può essere stivato in fienile o se è meglio attendere qualche giorno.
Va, infatti, evidenziato come l'umidità del foraggio sia un parametro difficile da rilevare direttamente poiché, gli strumenti disponibili derivano questa grandezza dalla resistenza elettrica o dalla conducibilità elettrica, misure però soggette a errori anche molto grossolani. L'errore è riconducibile alla difficoltà di far aderire allo strumento il foraggio e di farlo nello stesso modo nel corso dei successivi rilievi; alle diverse caratteristiche elettriche dei foraggi sui quali non sono state svolte indagini specifiche; da come lo strumento è utilizzato.

6.3.2 Alterazioni e perdite di foraggio

Il foraggio durante il processo di fienagione è soggetto a fenomeni biologici, chimici e fisici che riducono la quantità e la qualità del prodotto raccolto. Questi sono la respirazione cellulare, la lisciviazione e la riumidificazione del foraggio causata dalla pioggia, l'attività microbica a carico del foraggio e il contatto con organi meccanici in movimento che causano la formazione di frammenti di foraggio che rimangono sul campo perché troppo piccoli perché siano raccolti.

edagricole

La fienagione

Clicca QUI per ACQUISTARE il libro ONLINE

Clicca QUI per scoprire tutti i LIBRI del catalogo EDAGRICOLE

Clicca QUI per avere maggiori INFORMAZIONI

edagricole
www.edagricole.it

gruppo tecniche nuove
www.tecnichenuove.it

Servizio clienti libri:
libri.edagricole@newbusinessmedia.it
Tel. 051.6575833