

Alma Mater Studiorum – Università di Bologna

DOTTORATO DI RICERCA  
INGEGNERIA ENERGETICA, NUCLEARE E DEL  
CONTROLLO AMBIENTALE

Ciclo XXI

**Settore/i scientifico disciplinari di afferenza:** ING-IND/19

TITOLO TESI  
I DATI METEOROLOGICI PER APPLICAZIONI  
ENERGETICHE E AMBIENTALI

**Presentata da:** Claudia Mandurino

**Coordinatore Dottorato**

**Relatore**

**Prof. Antonio Barletta**

**Prof. Ruben Scardovelli**

**Esame finale anno 2009**



# Riassunto non tecnico

La presente ricerca è nata dall'esigenza di avere una disponibilità di adeguati dati meteorologici da dare in input ai modelli di analisi e previsione per le valutazioni ambientali ed energetiche. Attualmente in Italia si fa ricorso a basi di dati, quali quelle elaborate dall'ENEL e dal CNR tra la fine degli anni '70 ed i primi anni '80, che risultano essere inadeguate per il numero di località, limitate rispetto alle esigenze del territorio italiano, per i periodi di rilevamento, lontani nel tempo (che rischiano di non rappresentare i trend recenti) e, soprattutto, per la metodologia di elaborazione dei dati meteorologici. Quest'ultima è tale da fare perdere gran parte della significatività dei dati stessi. Allineando l'Italia a quanto avviene in molti paesi europei e nel Nord America, si è creata una base di dati meteorologici, costituita da anni considerati caratteristici dell'andamento climatico del lungo periodo. Questi anni caratteristici sono chiamati nella notazione europea Test Reference Year (TRY) ed in quella americana Typical Meteorological Year (TMY). Il metodo scelto per la selezione dell'anno tipo nella presente ricerca è stato quello americano. La procedura di selezione del TRY avviene su base mensile. Per ogni mese del calendario si sceglie quello che, in base a criteri statistici applicati alle variabili considerate importanti per la particolare applicazione per cui il TRY è generato, risulta essere il più vicino all'andamento poliennale del mese in esame. Così un TRY potrà essere formato, per esempio, dai dati orari del Gennaio 1998, del Febbraio 2001, e così via. Tale procedura è stata definita per la creazione dei TRY americani ed è largamente usata in tutto il mondo. Essa è stata applicata esclusivamente per la generazione dei TRY che qui sono stati identificati come "solari-termici". Mentre l'applicazione al caso energetico può considerarsi consolidata, quella in campo ambientale è ipotizzata, sviluppata e validata nel presente lavoro di tesi.

Il primo passo intrapreso è stato il censimento degli Enti che posseggono o gestiscono stazioni meteorologiche, analizzando anche le caratteristiche delle stazioni installate, quali le variabili misurate e la data di attivazione, per avere un quadro complessivo della disponibilità dei dati meteorologici necessari al presente studio. Quindi si è proceduto a contattare gli Enti per richiedere i dati delle stazioni meteorologiche. In totale sono stati acquisiti ed importati nel Data Base i dati di 154 stazioni. Queste stazioni non sono, sfortunatamente, distribuite in maniera omogenea su tutto il territorio nazionale, come si evince dalla Tabella 1.

Il lavoro svolto in tale fase è descritto nel Capitolo 2 del presente lavoro.

REGIONE	STAZIONI ACQUISITE	REGIONE	STAZIONI ACQUISITE
ABRUZZO	–	MOLISE	1
BASILICATA	10	PIEMONTE	3
CALABRIA	2	PUGLIA	3
CAMPANIA	20	SARDEGNA	3
EMILIA ROMAGNA	19	SICILIA	6
FRIULI VENEZIA GIULIA	19	TOSCANA	4
LAZIO	3	TRENTINO ALTO ADIGE	20
LIGURIA	1	UMBRIA	2
LOMBARDIA	23	VALLE D’AOSTA	–
MARCHE	2	VENETO	13
<b>TOTALE</b>			<b>154</b>

**Tabella 1:** Riepilogo delle stazioni acquisite, suddivise per regione.

I dati acquisiti ed importati nel Data Base, sono stati sottoposti ad una analisi qualitativa, per valutare quanti dati erano mancanti o errati e procedere, quando possibile, alla loro ricostruzione. Le variabili meteo analizzate sono state solo quelle di interesse per le applicazioni ambientali ed energetiche e sono riportate in Tabella 2, che mostra anche la percentuale di dati ricostruiti rispetto a quelli inizialmente mancanti. La metodologia di ricostruzione dei dati mancanti e/o erronei è stata esposta nel Capitolo 3.

VARIABILE	BUCHI ED ERRORI INIZIALI	RILEVAMENTI RICOSTRUITI	PERCENTUALE DI RICOSTRUZIONE
Radiazione Solare	38617	26555	68.8 %
Temperatura	19275	4320	22.4 %
Umidità relativa	24367	4848	20 %
Pressione atmosferica	51677	1131	2.2 %
Direzione del vento	29190	3858	13.2 %
Velocità del vento	25251	3970	15.7 %
Copertura nuvolosa	102830	618	0.6 %
Soleggiamento	71150	2856	4 %
<b>Media su tutte le variabili</b>	<b>45294</b>	<b>6019</b>	<b>13.9 %</b>

**Tabella 2:** Valori mediati su tutte le stazioni dei Buchi ed errori iniziali (BI), dei rilevamenti ricostruiti (RR) e valore percentuale tra RR e BI.

Finita la fase di analisi e ricostruzione dei dati, si sono analizzate le stazioni per individuare quelle che presentavano una serie storica sufficientemente lunga e completa per la generazione dei TRY.

I TRY prodotti sono di quattro differenti tipi:

- TRY ambientale, per lo studio di valutazioni di diffusioni di inquinanti in atmosfera;
- TRY eolico, prodotto per l’analisi delle performance di impianti eolici;
- TRY fotovoltaico, per l’analisi di impianti fotovoltaici;
- TRY solare-termico, sviluppato per prevedere le performance di impianti solari-termici e per l’analisi del carico termico invernale ed estivo di un edificio.

Le stazioni scelte per la generazione di almeno uno tra i quattro TRY elencati precedentemente sono relative a 102 località italiane ed i TRY totali prodotti ed inseriti nel Data Base sono in totale 291, suddivisi come mostrato in Tabella 3.

TIPI DI TRY	TRY GENERATI
Solare-termico	78
Fotovoltaico	91
Eolico	71
Ambientale	51
<b>TOTALE</b>	<b>291</b>

Tabella 3: Numero di TMY generati suddivisi per tipologia.

La Tabella 4 riporta i TRY prodotti per ciascuna stazione presente nel Data Base.

Località	TMY ambientale	TMY eolico	TMY fotovoltaico	TMY solare-termico	Località	TMY ambientale	TMY eolico	TMY fotovoltaico	TMY solare-termico
Belluno V.E.	X		X	X	Porto	X	X	X	X
Legnaro			X		Vivaro	X	X	X	X
Villadose	X		X	X	San Vito	X	X	X	X
Breda di Piave	X		X	X	Faedis	X	X	X	X
Cavallino Treporti	X		X	X	Tolmassons	X	X	X	X
Villafranca Veronese	X		X	X	Palazzolo	X	X	X	X
Quinto Vicentino			X		Capriva	X	X	X	X
Fossalon di Grado	X		X	X	Fagagna	X	X	X	X
Udine	X		X	X	Gradisca	X	X	X	X
Puegnago			X		Cervignano	X	X	X	X
San Michele	X	X	X	X	Sgonico	X	X	X	X
Borgo Valsugana	X	X	X	X	Enemonzo	X	X	X	X
Trento Sud	X	X	X	X	Verzuolo	X	X	X	X
Arco	X	X	X	X	Carpeneto	X	X	X	X
Cles	X	X	X	X	Piubega	X	X	X	X
Argenta			X		Montanaso Lomb.	X	X	X	X
Martorano			X		Susegana	X	X	X	X
Fiorenzuola			X	X	Cividale		X	X	
Cascine	X		X	X	Fiume Veneto		X	X	X
Ala	X	X	X	X	San Casciano		X	X	X
Messina	X	X	X	X	S. Piero a Grado		X	X	X
Palermo Boccadifalco		X			Santa Fista	X	X	X	X
Lecce		X			Marsciano		X	X	X
Brindisi	X	X	X	X	Monsampolo	X	X	X	X
Napoli Capodichino		X	X	X	Caprarola		X	X	X
Roma Ciampino	X	X	X	X	Borgo S. Michele		X	X	X
Falconara		X			Campochiaro		X	X	X
Bologna BorgoP.			X	X	Piano Cappelle	X	X	X	X
Genova Sestri	X	X	X	X	Pontecagnano	X	X	X	X
Trieste	X	X	X	X	Palo del Colle		X	X	X
Catania Sigonella		X			Sibari	X	X	X	X
Torino Caselle	X	X	X	X	Pietranera		X	X	X
Cagliari Elmas	X		X	X	Santo Pietro		X	X	X
CNR	X	X	X		Libertinia		X	X	X
Chilivani	X	X	X	X	Bema			X	X
Santa Lucia	X	X	X	X	BergamoV.G.			X	X
Baselga	X		X		BergamoV.S.G.		X	X	X
Caldonazzo		X	X	X	Bormio		X		
Paneveggio		X	X	X	Busto Arsizio		X		
Passo Brocon		X	X	X	Capralba			X	
Passo Tonale		X	X	X	Carate Brianza		X	X	X
Polsa		X	X	X	Colico		X		
Rabbi		X	X	X	Costa Volpino	X		X	X
Riva del Garda		X	X	X	Filago	X		X	X
Tovel		X	X	X	Gambara		X		
Tremalzo		X	X	X	Lonate		X	X	X
Milano VJuvara		X	X	X	Metaponto	X		X	X
S. Angelo Lod			X		Villa Agri			X	
Stezzano			X	X	Pisticci			X	
Varese		X			Policoro			X	

Tabella 4: Tipologie di TRY prodotti suddivisi per stazione.

I dettagli del processo di selezione delle differenti tipologie di TRY prodotte sono esposti nel Capitolo 4.

Lo studio, oltre alla realizzazione del data base dei TRY per le località suddette, fornisce una importante indicazione. Infatti, sebbene il numero dei TRY generati sia considerevole, questo non significa che la copertura nazionale sia stata raggiunta. Infatti i TRY prodotti sono relativi, principalmente, a località del Nord e Centro Italia. Occorre notare che l'impossibilità di ottenere i dati meteorologici di stazioni da Enti importanti, come l'Aeronautica Militare, ha causato, una disomogeneità nella distribuzione territoriale delle stazioni acquisite, come si evince in Tabella 1. Per potere dire di avere effettivamente una banca dati meteorologica completa a livello nazionale bisognerà superare questo limite e procedere all'acquisizione di altri dati meteorologici ed alla generazione di altri TRY per potere avere effettivamente, per tutte le regioni italiane, una copertura soddisfacente.

# Indice

<b>Riassunto non tecnico</b>	<b>i</b>
<b>Introduzione</b>	<b>1</b>
<b>1 I Test Reference Year (TRY) nel Mondo</b>	<b>3</b>
1.1 L'importanza dell'anno tipico per applicazioni energetiche e ambientali . . .	3
1.2 Gli anni tipici sviluppati nel mondo . . . . .	4
1.2.1 ASHRAE TRY (Nord America) . . . . .	5
1.2.2 Typical Meteorological Year (TMY) . . . . .	6
1.2.3 TRY Giapponese . . . . .	8
1.2.4 TRY Danese . . . . .	9
1.2.5 TRY "Festa-Ratto" . . . . .	10
1.2.6 TRY Belga . . . . .	11
<b>2 I dati meteorologici in Italia</b>	<b>13</b>
2.1 La situazione dei dati disponibili . . . . .	13
2.2 I dati recuperati . . . . .	16
2.2.1 Riepilogo nazionale . . . . .	17
2.2.2 UCEA . . . . .	19
2.2.3 Aeronautica Militare . . . . .	19
2.2.4 ALSIA - Basilicata . . . . .	21
2.2.5 CAR - Campania . . . . .	21
2.2.6 ARPA - Emilia Romagna . . . . .	22
2.2.7 OSMER - Friuli Venezia Giulia . . . . .	23
2.2.8 ARPA - Lombardia . . . . .	24
2.2.9 Provincia di Brescia - Lombardia . . . . .	24
2.2.10 LaMMA - Toscana . . . . .	24
2.2.11 Centro Agrometeorologico Provinciale – S. Michele all'Adige - Tren- tino . . . . .	25
2.2.12 Istituto Veneto di Scienze Lettere ed Arti - Veneto. . . . .	25
2.2.13 ARPA - Veneto . . . . .	26
<b>3 Correzione e completamento dei dati acquisiti ed importati nel Data Base</b>	<b>27</b>

3.1	Ricostruzione dei dati mancanti . . . . .	27
3.1.1	Lacune 1-5 ore . . . . .	30
3.1.2	Lacune 6-24 ore . . . . .	32
3.1.3	Lacune 25-72 ore . . . . .	34
3.2	Omogenizzazione dell'intervallo di acquisizione dei dati . . . . .	35
3.3	Calcolo delle variabili meteorologiche derivate . . . . .	36
3.4	Algoritmi per alla ricostruzione dei dati mancanti . . . . .	38
3.4.1	Forzatura dei valori notturni della radiazione . . . . .	39
3.4.2	Approssimazione tramite spline . . . . .	40
3.4.3	Approssimazione tramite interpolazione lineare per lacune da 6 a 24 ore . . . . .	42
3.4.4	Approssimazione tramite interpolazione lineare per lacune da 25 a 72 ore . . . . .	43
<b>4</b>	<b>Generazione dei Test Reference Year</b>	<b>45</b>
4.1	Metodologia per la generazione dei TRY . . . . .	45
4.2	TRY solare-termico . . . . .	48
4.2.1	Metodologia per la generazione del TRY solare-termico . . . . .	48
4.2.2	Test di validazione del TRY solare-termico . . . . .	48
4.3	TRY fotovoltaico . . . . .	54
4.3.1	Metodologia per la generazione del TRY fotovoltaico . . . . .	54
4.3.2	Test di validazione del TRY fotovoltaico . . . . .	55
4.4	TRY eolico . . . . .	60
4.4.1	Metodologia per la generazione del TRY eolico . . . . .	60
4.4.2	Test di validazione del TRY eolico . . . . .	61
4.5	TRY ambientale . . . . .	64
4.5.1	Metodologia per la generazione del TRY ambientale . . . . .	64
4.5.2	Test di validazione del TRY ambientale . . . . .	65
4.6	Generazione del TRY per 102 località italiane . . . . .	85
4.6.1	La creazione del Data Base complessivo dei TRY prodotti . . . . .	88
<b>5</b>	<b>Conclusioni</b>	<b>91</b>
<b>A</b>	<b>Censimento dei metodi di stima delle variabili meteorologiche mancanti</b>	<b>93</b>
A.1	Metodi di stima generici . . . . .	93
A.2	Metodi di stima della Temperatura . . . . .	95
A.3	Metodi di stima dell'Umidità relativa . . . . .	96
A.4	Metodi di stima della Radiazione solare . . . . .	96
A.4.1	Metodi di stima della radiazione solare da altre variabili meteorolo- giche . . . . .	99
A.5	Generazione stocastica di dati meteorologici . . . . .	101



## Indice

---

<b>B Consultazione on-line dei TRY generati</b>	<b>103</b>
<b>Ringraziamenti</b>	<b>109</b>
<b>Bibliografia</b>	<b>111</b>



# Introduzione

Un gran numero di valutazioni ambientali ed energetiche implicano la disponibilità di adeguati dati meteorologici da dare in input ai modelli di analisi e di previsione, come, ad esempio, nel caso della dispersione in atmosfera di inquinanti gassosi o della valutazione del potenziale fotovoltaico di un sito.

I principali campi applicativi possono essere raggruppati nelle seguenti macro-categorie:

- valutazione di impatto ambientale;
- valutazione ambientale strategica;
- energie rinnovabili e risparmio energetico;
- rischi di incidente rilevante;
- protezione civile.

Attualmente nel nostro Paese si fa ricorso a basi di dati, quali quelle elaborate dall'ENEL e dal CNR (all'interno del Piano Finalizzato Energetica) tra la fine degli anni 70 ed i primi anni 80, che risultano essere inadeguate, in quanto le informazioni sono relative a:

- un numero limitato di località rispetto alle esigenze del territorio italiano;
- periodi di rilevamento lontani nel tempo, che non tengono conto dei trend recenti;
- modalità di distribuzione dei dati antiquate;
- metodologia di elaborazione dei dati tale da fare perdere gran parte della significatività degli stessi.

Quest'ultima limitazione è la meno evidenziata, ma forse è la più grave. Infatti, oggi è pressoché inevitabile utilizzare dati meteorologici sotto forma di medie poliennali delle singole variabili a sé stanti. Ad esempio, possiamo avere il valore medio della radiazione solare del mese di marzo e la rosa dei venti per lo stesso mese, ma non potremo in alcun modo correlare i due dati tra loro, poiché l'informazione della contemporaneità è inevitabilmente perduta con il procedimento di aggregazione dei dati "istantanei" originali. L'altra informazione che si perde con i procedimenti di aggregazione tradizionali è, evidentemente, la sequenza dei dati stessi. Non possiamo, ad esempio, risalire dalla temperatura media mensile alla sequenza delle temperature medie giornaliere e tanto meno a quelle orarie. Ne consegue che non potremo realisticamente analizzare e prevedere situazioni quali, ad esempio, l'aumento dell'ozono dovuto ad una sequenza di giorni di elevata radiazione solare. Analoghe limitazioni sono riscontrabili per le applicazioni re-

lative alle energie rinnovabili. La sostanziale inutilizzabilità dei dati per i fini in oggetto è testimoniata dal fatto che tale problema è stato affrontato e risolto, a partire da quasi trenta anni fa, in molte nazioni europee, a livello UE, e nel Nord America. Occorre, dunque, una base di dati accessibile ed analitica, per distribuzione territoriale, per disaggregazione e per contemporaneità del dato. È necessario elaborare i dati meteorologici a partire da una serie storica almeno decennale, senza perdere le informazioni relative alla contemporaneità dei dati rilevati e alla sequenza degli stessi, costruendo così un “anno tipico” come sequenza di dati orari realmente misurati per più variabili contemporaneamente, relativamente ad un anno di 365 giorni.

Attraverso degli opportuni criteri statistici, si seleziona da una serie storica, per ciascun mese, quello che è il più rappresentativo della serie storica stessa. Si perviene così ad un anno di dati costruito, ad esempio, mettendo insieme il Gennaio 1995, con il Febbraio 1988, il Marzo 2002, ecc.

È evidente che tale sequenza ha tutte le caratteristiche desiderate: i dati sono analitici (orari e relativi a 365 giorni), contemporanei, non mediati (dentro il mese ci sono una varietà di giorni e di sequenze di giorni).

# Capitolo 1

## I Test Reference Year (TRY) nel Mondo

### 1.1 L'importanza dell'anno tipico per applicazioni energetiche e ambientali

I dati meteorologici per le applicazioni ambientali ed energetiche possono essere classificati in differenti tipi [1]:

- 1- Tabelle statistiche di dati per creare un set di dati statistici (quali, ad esempio, le rose dei venti, le temperature medie mensili,...), con l'inevitabile perdita della contemporaneità e significatività dei dati stessi;
- 2- Dati "multi-anno": sono i dati fondamentali e includono un consistente ammontare di informazioni per un certo numero di anni. In sostanza si usa tutta la serie storica;
- 3- Anni tipici: un anno tipico (o di riferimento, TRY) è un anno singolo di 8760 dati orari, selezionati per rappresentare l'andamento climatico che si troverebbe in un set di dati "multi-anno". La definizione di un anno tipico dipende da come esso soddisfa un set di test statistici che lo mettono in relazione al set di dati multi-anno;
- 4- Giorni rappresentativi: sono dei dati orari per alcuni giorni medi, sviluppati per rappresentare delle condizioni climatiche tipiche. I giorni rappresentativi sono economici per analisi su piccola scala e sono spesso usati in simulazioni semplificate.

Per simulazioni dettagliate, gli anni tipici sono quelli più comunemente usati, giacché l'uso di un set di dati multi-anno spesso non è flessibile ed economicamente vantaggioso, l'uso di tabelle statistiche comporta la perdita della contemporaneità delle variabili, fondamentale per avere un'accurata descrizione della reale situazione climatica, mentre l'uso di giorni rappresentativi è troppo limitato e il più delle volte non abbastanza accurato. L'uso di anni tipici ha due vantaggi principali:

- gli sforzi computazionali e i dati meteorologici usati sono ridotti ad un singolo anno,
- un consistente set di dati meteorologici è garantito cosicché i risultati di differenti studi possono essere confrontati fra loro.

Il concetto di anno tipico è stato inizialmente usato nelle simulazioni relative a sistemi ad energia solare, e quindi successivamente applicato anche a simulazioni energetiche per edifici poiché le due applicazioni hanno richieste simili per quanto riguarda l'input di dati meteorologici. Praticamente un anno tipico può essere considerato come un compromesso tra l'uso di un set di dati multi-anno e le tabelle statistiche di dati meteorologici a lungo termine. Per assicurare che la sequenza climatica realmente presente in natura sia preservata, un anno tipico è generato selezionando un intero anno dal passato o unendo diversi mesi o stagioni appartenenti ad anni diversi [2].

La "bontà" di un anno tipico dipende da come esso è costruito e su quali dati esso si basa. La "rappresentatività" dei dati meteorologici sarà strettamente correlata su come la "tipicità" è definita e misurata. Infatti un anno considerato tipico per una situazione potrebbe non esserlo per un'altra applicazione giacché le variabili meteorologiche ed i loro effetti su di un sistema possono essere altamente differenti ed è impossibile stabilire un anno che sia tipico per tutte le situazioni. Vi sono due approcci per definire un criterio adatto alla selezione ed all'analisi degli anni tipici [2]:

- approccio statistico: basato esclusivamente su un'analisi statistica delle variabili meteorologiche;
- approccio simulativo: basato sul confronto dei risultati di simulazione ottenuti usando i dati meteorologici.

Entrambi gli approcci hanno alcune limitazioni: il primo è indiretto e potrebbe non portare a delle strette correlazioni con la situazione reale di applicazione; il secondo è specifico per un sistema, una costruzione, o un programma di simulazione.

Un modo completo per generare un anno tipico è selezionare un anno con un approccio statistico e quindi utilizzarlo in simulazioni per verificare come i dati scelti rappresentino l'andamento a lungo termine.

### 1.2 Gli anni tipici sviluppati nel mondo

Le metodologie utilizzate per la definizione degli anni tipici sono differenti. Alcune richiedono l'analisi di dati orari, come il WYEC [3]; altri usano medie giornaliere o mensili, come il CIBSE Example Year [4] e ASHRAE TRY [5]. Il periodo di dati meteorologici usati in genere varia da 10 a 40 anni, in dipendenza dalla disponibilità dei dati stessi. Sebbene la procedura di selezione può variare sensibilmente da studio a studio, i concetti fondamentali dei più accreditati studi iniziali sono spesso adottati. La Tabella 1.1 mostra una lista sintetica dei TRY sviluppati nei vari paesi.

A seguito di una attenta analisi dei vari metodi si è deciso di scartare quelli che prevedono una selezione del TRY annuale (come il metodo ASHRAE), perché sicuramente inadeguati. Inoltre, anche il metodo giapponese viene scartato in quanto è troppo dipendente o dal luogo o dal problema in esame. Per quanto riguarda il metodo danese, con la sua modifica Festa-Ratto ed il metodo belga, essi hanno avute poche e discontinue appli-

Studi di anni tipici	Periodo usato	Numero di anni	Selez. per
<b>USA E CANADA</b>			
ASHRAE Test Reference Year (TRY) [5]	1948-75	28	Anno
Typical Meteorological Year (TMY) by NCC [6]	1952-75	15-24	Mese
New TMY by NREL [7]	1961-90	30	Mese
Users Manual for TMY3 Data Sets [8]	1976-2005	30	Mese
Weather Year for Energy Calculation (WYEC) [3] [9]	1941-80	30-40	Mese
Canadian TMY [10]	1967-76	10	Mese
<b>EUROPA</b>			
Belgium TRY [11]	1958-75	15	Mese
CIBSE Example Weather Year (EWY) [4]	1956	20	Anno
Danish TRY [11]	1959-73	15	Mese
Finnish Test Year [12]	1968-87	20	Mese
Short Reference Year and EC-TRY [13]	1958-75	13-18	Mese
Design Reference Year (DRY) [14]			Mese
Athens' TMY (Greece) [15]	1966-82	17	Mese
<b>ALTRE NAZIONI</b>			
China Standard Year [16]	1974-83	10	Mese
Ibadan Test Reference Year (Nigeria) [17]	1979-88	10	Mese
Japan Standard Weather Year (SWY) [18]	1960-69	10	Mese
Saudi Arabia Typical Weather Year [19]	1970-91	22	Mese
Standard Solar Year (New Zeland) [20]	1954-64	11	Mese
<b>HONG KONG</b>			
HK Example Weather Year [21]	1967-91	25	Anno
HK Test Reference Year [22]	1948-90	42	Anno
HK Typical Weather Year [23]	1980-89	10	Mese

**Tabella 1.1:** TRY sviluppati nel mondo.

cazioni. Osserviamo, infine, che il progetto europeo CEC (DG XII) PASCOOL (contratto JOU2-CT92-0013), ha scelto il TMY (Typical Meteorological Year) sviluppato dal Sandia National Laboratories. Attualmente, il metodo di gran lunga più applicato è il TMY, unitamente alla sua variante TMY2. Nei paragrafi seguenti si espongono nel dettaglio le procedure di selezione del TRY maggiormente utilizzate nel Mondo.

### 1.2.1 ASHRAE TRY (Nord America)

Negli anni '70 l'ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating, and Air - conditioning Engineers) sviluppò una semplice procedura di generazione del TRY e la applicò a numerose città degli Usa determinando così dei TRY per tali località [5]. Il principio base per la determinazione del TRY sviluppato dall'ASHRAE è eliminare tutti quegli anni che contengono valori medi mensili di temperatura estremamente alti o estremamente bassi, fino a quando un solo anno (il TRY) rimane. I mesi estremi sono catalogati in ordine d'importanza in termini energetici. I Luglio più caldi ed i Gennaio più freddi sono considerati i più importanti. Tutti gli altri mesi sono divisi tra la metà calda (da Maggio a

## 1. I TRY nel Mondo

---

Ottobre) e la metà fredda (da Novembre ad Aprile) dell'anno. Assumendo che i mesi estivi caldi ed i mesi invernali freddi siano più importanti dei mesi estivi freddi o invernali caldi, allora l'ordine d'importanza dei mesi estremi andrà dal Luglio più caldo all'Aprile più freddo e quindi dal Luglio più freddo all'Aprile più caldo come mostrato in Tabella 1.2.

1- Luglio più caldo	13- Luglio più freddo
2- Gennaio più freddo	14- Gennaio più caldo
3. Agosto più caldo	15- Agosto più freddo
4- Febbraio più freddo	16-. Febbraio più caldo
5- Giugno più caldo	17- Giugno più freddo
6- Dicembre più freddo	18- Dicembre più caldo
7- Settembre più caldo	19- Settembre più freddo
8- Marzo più freddo	20- Marzo più caldo
9- Maggio più caldo	21- Maggio più freddo
10- Novembre più freddo	22- Novembre più caldo
11- Ottobre più caldo	23- Ottobre più freddo
12- Aprile più freddo	24- Aprile più caldo

**Tabella 1.2:** Metodo di selezione del TRY ASHRAE.

La procedura di selezione comincia segnando i 24 mesi estremi come mostrato in Tabella 1.2. Se uno o più anni restano senza mesi segnati, il processo si ripete e l'eliminazione continua fino a quando non rimane un solo anno non segnato che verrà scelto come TRY. Un TRY così selezionato risulta utile per studi comparativi, ma non è rappresentativo e sufficientemente "tipico" quando usato per stime a lungo termine di consumi o simulazioni energetiche.

### 1.2.2 Typical Meteorological Year (TMY)

Il metodo TMY è stato sviluppato da Sandia National Laboratories in USA [6] [24], ed è stato usato, se pur con qualche modifica, in molti paesi come il Canada [10], la Grecia [15], la Nigeria [17], l'Arabia Saudita [19], e ovviamente gli USA [24] [7]. Un TMY consiste di dodici "mesi tipici meteorologici" (TMM) selezionati da un calendario di mesi appartenenti ad una serie storica. Per esempio il Gennaio del 1980 potrebbe essere selezionato come il primo TMM, il Febbraio del 1985 come il secondo, e così via. Tutti i dodici mesi così selezionati verranno uniti a formare il TMY. Ovviamente è necessario "saldare" i mesi l'uno all'altro per evitare cambiamenti repentini delle variabili nel passaggio da un mese a quello seguente, essendo essi appartenenti ad anni diversi. La selezione dei TMM si basa su analisi statistiche e sulla valutazione di quattro variabili meteorologiche: radiazione solare totale GSR (Global Solar Radiation), temperatura di bulbo asciutto DBT (Dry-Bulb Temperature), temperatura del punto di rugiada DPT (Dew-Point Temperature) e velocità del vento WSP (Wind Speed). Nove indici giornalieri sono scelti e sono mostrati nella Tabella 1.3, insieme ai loro rispettivi pesi.

Per determinare un TMM sono considerate tre proprietà fondamentali: le distribuzioni di frequenza (gli elementi climatici dovrebbero avere distribuzioni di frequenza vicine



Variabili meteo - Indici giornalieri	Fattori di peso		
	Vecchio TMY	Nuovo TMY (TMY2)	CWEC
Temperatura di bulbo asciutto (max)	1/24 (4,2%)	1/20 (5%)	5.00%
Temperatura di bulbo asciutto (min)	1/24 (4,2%)	1/20 (5%)	5.00%
Temperatura di bulbo asciutto (media)	2/24 (8.3%)	2/20 (10%)	30.00%
Temperatura del punto di rugiada (max)	1/24 (4.2%)	1/20 (5%)	2.50%
Temperatura del punto di rugiada (min)	1/24 (4.2%)	1/20 (5%)	2.50%
Temperatura del punto di rugiada (media)	2/24 (8.3%)	2/20 (10%)	5.00%
Velocità del vento (max)	2/24 (8.3%)	1/20 (5%)	5.00%
Velocità del vento (media)	2/24 (8.3%)	1/20 (5%)	5.00%
Radiazione solate totale	12/24 (50%)	5/20 (25%)	40.00%
Radiazione solare diretta	Non usata	5/20 (25%)	Non usata

**Tabella 1.3:** Variabili meteorologiche e loro pesi nel metodo TMY. “Vecchio” TMY si riferisce al metodo TMY originale usato dal National Climatic Center (NCC) [6]; “nuovo” TMY si riferisce al metodo proposto dal National Renewable Energy Laboratory (NREL) [7]; CWEC è il Canadian Weather for Energy Calculation [25]. La percentuale di ciascun indice è scritta in parentesi affianco al fattore di peso.

a quelle a lungo termine), le sequenze (le sequenze delle misure giornaliere dovrebbero essere simili alle sequenze spesso registrate nel sito di interesse) e le correlazioni (le relazioni tra differenti elementi climatici dovrebbero essere simili alle relazioni osservate in natura). La procedura assume che un TMY costituito da dodici TMM, che soddisfino tutti e tre questi criteri, avrà delle caratteristiche e delle prestazioni nelle sue varie applicazioni molto vicine alle condizioni climatiche a lungo termine. Il processo di selezione dei dodici mesi tipici si articola in tre fasi [26].

Per ciascun mese dell’anno, ne sono selezionati 5 che abbiano la più piccola somma pesata della statistica di Filkenstein-Schafer (FS) dei nove indici precedentemente citati. La somma pesata WS, della statistica di FS, è espressa come:

$$WS(y, m) = \frac{1}{M} \cdot \sum_{x=1}^M WF_x \cdot FS_x(y, m), \quad (1.1)$$

dove

$$FS_x(y, m) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N |CDF_m(x_i) - CDF_{y,m}(x_i)| \quad (1.2)$$

e

$$\sum_{x=1}^M WF_x = 1 \quad (1.3)$$

$CDF_m$  e  $CDF_{y,m}$  sono le funzioni di distribuzione cumulative dell’ indice x per il mese

“m” rispettivamente per il lungo termine (20 anni) e per il breve termine (per l’anno  $y$ ), e  $WF_x$  sono i fattori di peso, uno per ogni indice giornaliero.

I cinque mesi candidati sono catalogati in base alla vicinanza del mese al valore medio e mediano del lungo termine. Le differenze relative sono calcolate tra i valori medi e mediani della temperatura e della radiazione solare per ciascun mese specifico e le rispettive medie e mediane del lungo periodo (20 anni). Al mese sarà quindi assegnato il massimo delle quattro differenze relative.

La persistenza della temperatura media di bulbo asciutto e della radiazione globale è valutata, determinando la frequenza e la durata (numero di giorni consecutivi), sopra e sotto dei percentili di lungo termine fissi. Per la temperatura si determina la frequenza e la durata sopra il 67° percentile (giorni caldi consecutivi), e sotto al 33° percentile (giorni freddi consecutivi), mentre per la radiazione globale è calcolato soltanto un limite inferiore, al 33°. I dati di persistenza sono usati per calcolare dai cinque mesi selezionati precedentemente, il mese che verrà incluso nel TMY. Il criterio di persistenza esclude i mesi con la durata più lunga, quelli con più cicli di durata e quelli con cicli pari a zero; il mese migliore restante, in accordo al secondo punto di selezione, è scelto per fare parte del TMY.

Una importante modifica al metodo originale TMY è stata apportata da Marion e Urban [7], ed il nuovo metodo risultante è noto come TMY2. Tale modifica, oltre che aggiungere una nuova variabile (la radiazione solare diretta), assegna nuovi pesi agli indici giornalieri usati. Come si può notare dalla Tabella 1.3 i pesi della temperatura di bulbo asciutto e del punto di rugiada sono stati modificati per dare più enfasi alle temperature e meno alla velocità del vento, e quindi risulta evidente che un tale metodo non è appropriato se applicato per esempio a centrali eoliche.

Nel Maggio del 2008 sono stati sviluppati da US National Renewable Energy Laboratory [8] i nuovi TMY, chiamati TMY3. La differenza principale con i precedenti è data dal fatto che nelle nuove località analizzate la radiazione solare è stimata e non misurata come avveniva in tutte le precedenti analizzate con il TMY2 ed il criterio di persistenza è talora non utilizzato, avendo analizzato stazioni con serie storiche di 10-15 anni e nelle quali tale criterio portava alla esclusione di tutti i mesi. In tale caso la selezione si è basata esclusivamente sulla statistica di Filkenstein-Schafer e sull’analisi della media e mediana.

### 1.2.3 TRY Giapponese

Matsuo et al. [18] hanno basato la selezione del TRY non su parametri climatici, ma sui carichi termici (di riscaldamento e raffreddamento) risultanti dall’applicazione dei dati su di un sistema standard. Questi carichi sono calcolati ora per ora per un periodo di dieci anni per due differenti sistemi e per quattro differenti orientamenti. Questo fornisce otto diversi profili decennali. La procedura è quindi ripetuta per ciascun anno appartenente alla decade scelta e l’anno con il profilo che più si avvicina a quello decennale (per tutti gli otto casi) viene scelto come TRY.

### 1.2.4 TRY Danese

La selezione del TRY Danese si basa su valori medi e massimi giornalieri di temperatura di bulbo asciutto e valori di radiazione solare totale giornaliera per i mesi da Marzo a Ottobre, ore di sole per i mesi da Novembre a Febbraio. Tre criteri sono usati per selezionare ciascun mese tipico: una valutazione manuale (criterio A) e due criteri matematici (criteri B e C) [27].

Il criterio A consiste nella valutazione da parte di un meteorologo esperto delle condizioni climatiche di ogni mese del periodo selezionato, per l'esclusione di mesi con condizioni climatiche anormali. Questa valutazione è fatta sulla base di valori medi mensili di circa venti parametri per un periodo normalmente di trenta anni.

Temperatura media mensile	X
Media delle temperature massime giornaliere	X
Media delle temperature minime giornaliere	X
Valore assoluto della temperatura massima mensile	
Valore assoluto della temperatura minima mensile	
Frequenze delle velocità del vento	X
Frequenze delle direzioni del vento	X
Pressione atmosferica media mensile	X
Ore di sole	X
Numero di giorni con precipitazione	
Quantitativo mensile di precipitazione	X
Umidità media mensile	
Numero di giorni con nebbia	
Numero di giorni sereni	
Numero di giorni nuvolosi	

**Tabella 1.4:** Esempio di una applicazione del Criterio A del metodo Danese di selezione del TRY.

I parametri meteorologici che sono considerati essere particolarmente importanti per la valutazione sono segnati con una X, come mostrato in Tabella 1.4. Un mese sarà considerato "non qualificabile" se il valore medio di uno dei parametri descritti come particolarmente importanti differisce di più di una deviazione standard dalla media trentennale dello stesso, o se almeno due dei parametri non segnati in Tabella 1.4 differiscono di più di una deviazione standard dalla media suddetta.

Il criterio B è la selezione dei mesi con valori medi tipici delle tre variabili meteorologiche: temperatura media giornaliera, temperatura massima giornaliera e radiazione solare giornaliera totale (o ore di sole):

- per ciascun mese del periodo selezionato calcolo del valore medio;
- per ciascun mese calcolo del valore medio attraverso il periodo di selezione del valore medio mensile (media delle medie);
- calcolo della deviazione standard dei valori medi mensili;
- rapporto tra la deviazione media di ciascun mese e la deviazione standard, per effettuare dei confronti.

Infine il criterio C consiste nella selezione dei mesi con variazioni tipiche:

- per ciascun mese del periodo selezionato calcolo della deviazione standard dei valori giornalieri dal valore medio mensile;
- per ciascun mese del periodo selezionato calcolo della deviazione standard dei valori giornalieri dal valore medio mensile;
- per ciascun mese calcolo del valore medio attraverso il periodo di selezione delle deviazioni standard mensili;
- calcolo della deviazione standard delle deviazioni standard mensili;
- rapporto tra la deviazione media delle deviazioni standard mensili e la deviazione standard delle deviazioni standard mensili, per effettuare dei confronti.

I criteri B e C sono applicati a valori giornalieri meno i valori medi per ciascun giorno attraverso il periodo di selezione, filtrati con un'analisi di Fourier che coinvolge solo i primi tre coefficienti. Per ciascun mese del periodo di selezione, vi sono sei valori di tassi di deviazioni medie dalla deviazione standard, cioè due valori per ogni parametro (uno per il criterio B e uno per il criterio C). Il maggiore di questi valori viene usato per la classificazione del mese. Il mese più adatto è quello con il valore di classificazione minore, se tale mese è in accordo al criterio A. Se esso non risulta tale, allora si esamina il mese con il secondo valore più piccolo e il mese con il terzo valore più piccolo e così via fino a quando non si avranno tutti e dodici i mesi che formeranno il TRY. Bisogna notare che l'uso della durata di illuminazione solare invece della radiazione globale nel metodo danese è una scelta intesa per essere utilizzata durante l'inverno e ad alte latitudini ( $> 500$ ), quando cioè la radiazione solare misurata sul piano orizzontale non è particolarmente rappresentativa dell'irraggiamento a livello di superfici verticali o inclinate, come i collettori solari o le finestre di una costruzione.

### 1.2.5 TRY "Festa-Ratto"

Il metodo "Festa-Ratto" per il calcolo del TRY è una modifica del metodo danese e richiede un trattamento statistico dei dati alquanto complesso [28]. Innanzitutto i parametri meteorologici sono convertiti in residui standardizzati

$$X(y, m, d) = \frac{[x(y, m, d) - \mu_x(m, d)]}{[\sigma_x(m, d)]}, \quad (1.4)$$

dove  $X(y, m, d)$  è il residuo standardizzato del parametro  $x(y, m, d)$ , per l'anno  $y$ , il mese  $m$  ed il giorno  $d$ , rispetto al valore medio e alla deviazione standard,  $\mu_x(m, d)$  e  $\sigma_x(m, d)$ , rispettivamente, calcolati sugli anni disponibili. Quindi si calcola il residuo standardizzato  $Z(y, m, d)$  del parametro  $z(y, m, d)$ , definito come  $z(y, m, d) = X(y, m, d) \cdot X(y, m, d+1)$ , rispetto al valore medio e alla deviazione standard,  $\mu_x(m, d)$  e  $\sigma_x(m, d)$ , rispettivamente, calcolati sugli anni disponibili. Per ciascun parametro  $X$  e  $Z$  si calcola la media, la deviazione standard e la distribuzione cumulativa per ogni singolo mese (parametri di breve termine). Quindi, i parametri corrispondenti sono calcolati per ogni mese, ma questa

volta per l'intero periodo di anni disponibile (parametri di lungo termine). Le distanze tra le medie di breve e lungo termine,  $d_{av}$ , le deviazioni standard,  $d_{sd}$ , e il parametro di Kolmogorov-Smirnov<sup>1</sup>,  $d_{KS}$ , sono calcolati per ogni parametro X e Z e per ogni singolo mese. Quindi, si calcola una distanza composita definita come:

$$d(y, m, j) = (1 - a - b) \cdot d_{KS}(y, m, j) + a \cdot d_{av}(y, m, j) + b \cdot d_{sd}(y, m, j), \quad (1.5)$$

dove  $a \approx b \approx 0.1$  e  $(y, m, j)$  indica la distanza per l'anno y, il mese m ed il parametro  $j = X, Z$ . In questo modo, usando la temperatura media e massima giornaliera dell'aria, l'umidità media relativa, la velocità media relativa del vento e la somma giornaliera della radiazione globale, si ottengono 10 distanze, calcolate per ogni mese candidato. Usando infine un approccio "min-max" che assegna il massimo delle dieci distanze al mese candidato e sceglie il mese con la distanza minima definita come

$$d_{min\ max}(y, m, 1) = \min \{d_{max}(y, m, j) \text{ per } 1 \leq j \leq 10\}, \quad (1.6)$$

si giunge alla selezione dei dodici mesi del TRY.

### 1.2.6 TRY Belga

Il metodo di generazione del TRY belga è puramente matematico e può essere applicato a qualunque variabile meteorologica. Se per esempio si considerano solo due variabili come la temperatura media giornaliera e la somma giornaliera della radiazione globale orizzontale allora il metodo si articola come esposto di seguito [27]. Per ciascun mese del periodo di interesse, sono calcolati il valore medio, la varianza e la correlazione seriale, e ciò porta ad avere sei variabili per mese. Per ciascuno dei dodici mesi dell'anno, queste sei variabili sono quindi ridotte tramite la relazione

$$z_{ij} = \frac{(x_{ij} - \tilde{\mu}_i)}{\sqrt{\tilde{v}_{jj}}} \quad (1.7)$$

dove:

- $i=1, \dots, n$ , essendo n il numero di anni del periodo scelto,
- $j=1, \dots, 6$  indica la variabile,
- $x_{ij}$  è il valore della variabile j per il mese dell'anno i,
- $\mu_j$  è il valore medio della variabile j attraverso l'intero periodo,
- $v_{jj}$  è la varianza della variabile j attraverso l'intero periodo.

<sup>1</sup>Il parametro di Kolmogorov-Smirnov è definito come il massimo del valore assoluto della differenza tra due distribuzioni cumulative:  $KS = N \cdot \max |prob(P(x_k)) - prob(M(x_k))|$  dove  $prob(P(x_k))$  e  $prob(M(x_k))$  sono le frequenze cumulative, cioè la probabilità di accadimento di valori predetti e misurati non maggiore di  $x_k$ .

## 1. I TRY nel Mondo

---

Se  $\tilde{\rho} = \|\tilde{\rho}_{jj}\|$  è la matrice di correlazione tra gli elementi del vettore  $z$ , cioè  $z_i(z_{ij})$ , si può costruire uno  $\tilde{Z}_i$  statistico, definito dal prodotto matriciale:

$$\tilde{Z}_i = z_i' \tilde{\rho}^{-1} z_i \quad (1.8)$$

Questo  $\tilde{Z}_i$  statistico si avvicinerà ad una ripartizione  $\chi^2$  con 6 gradi di libertà. L'elemento della serie  $x_i$  che meglio tende al valore medio  $\mu$  sarà quello che porta il valore di  $\tilde{Z}_i$  più vicino a zero. Inoltre con la legge  $\chi^2$  si può fare una stima esatta o approssimata della probabilità associata a ciascun valore di  $\tilde{Z}_i$ , e quindi a ciascun elemento della serie temporale.

## Capitolo 2

# I dati meteorologici in Italia

### 2.1 La situazione dei dati disponibili

La situazione dei dati meteorologici disponibili in Italia è particolarmente complessa. Nonostante le stazioni meteorologiche siano più di 7000 [29], esse non sono equamente distribuite sul territorio nazionale né sono tutte ugualmente interessanti. Infatti, sono principalmente localizzate nel Nord e Centro Italia e molto più rare e di più recente attivazione nel Sud e nelle isole. Gli enti che posseggono e/o gestiscono le stazioni meteo sono sia pubblici che privati ed i principali gestori sono riassunti in Tabella 2.1

Reti Nazionali	Reti Interregionali	Reti Regionali	Reti Locali	Stazioni Meteorologiche
Aeronautica Militare	Autorità di Bacino	Servizi Agro-meteorologici	Amministrazioni Locali	Università
UCEA	Magistrato per il Po	Centri Regionali	Consorzi di Difesa	Istituti di Ricerca
Servizio Idrografico e Mareografico			Consorzi di Bonifica	Aziende
			Aziende Municipalizzate	
			Altre	

Tabella 2.1: Principali gestori delle reti e stazioni di rilevamento meteorologico presenti in Italia.

Un censimento delle stazioni presenti sul territorio italiano [30] ha portato ad un totale di 3037 stazioni meteorologiche automatiche (di cui circa 1200 complete), che però presentano un problema di regolarità nella loro distribuzione nello spazio, e 4398 stazioni meccaniche, distribuite in modo più omogeneo.

La rete più completa e omogenea è sicuramente quella dell'**Aeronautica Militare** che ha più di 130 stazioni, quasi tutte attivate tra gli anni '50 e '60 ed ancora funzionanti, di cui 30 effettuano anche misure di radiazione solare. Esse sono in genere ubicate in aeroporti di bassa pianura litoranea, ma non mancano stazioni in quota, necessarie per la navigazione aerea. I tempi e le modalità di osservazione e rilevamento sono molto articolati, essendo

## 2. I dati meteorologici in Italia

---

effettuati con strumenti di registrazione e/o strumenti a lettura diretta oppure stimati a vista. Le osservazioni vengono effettuate ogni tre ore nell'arco delle 24 ore negli aeroporti principali e dalle 6:00 alle 18:00 in quelli secondari per la maggior parte delle grandezze rilevate, mentre altre (come la radiazione e l'eliofania) sono misure giornaliere.

La rete di rilevamento RAN (Rete Agrometeorologia Nazionale) gestita dall'UCEA (Ufficio Centrale di Ecologia Agraria) consta di 42 stazioni automatiche, uniformemente distribuite sul territorio. Queste stazioni sono state attivate a partire dagli anni '90, sono quasi tutte complete e misurano tutte le principali variabili meteorologiche di interesse in campo agrometeorologico. I tempi di acquisizione variano per le differenti grandezze misurate da un minimo di 10 minuti (come per la direzione e la velocità del vento) ad un massimo di 1440 minuti (per l'evaporazione). La maggior parte delle grandezze sono però misurate ad intervalli orari.

Il **Servizio Idrografico Nazionale**, ha storicamente avuto il compito del monitoraggio quantitativo delle risorse idriche superficiali e sotterranee attraverso le seguenti reti di rilevamento:

- Rete termo-pluviometrica base;
- Rete idrometrica;
- Rete di misura delle portate dei principali fiumi italiani;
- Rete freaticometrica;
- Rete idrometeorologica in tempo reale.

I dati rilevati, dopo la loro validazione, sono pubblicati negli Annali Idrologici e sui bollettini idrologici. Con il trasferimento di competenze dallo Stato alle Regioni, gli Uffici periferici del Dipartimento per i Servizi Tecnici Nazionali (DSTN) sono stati trasferiti alle Regioni ed incorporati nelle strutture operative regionali competenti in materia. Successivamente, il Decreto della Presidenza del consiglio dei Ministri del 24 luglio 2002 ha trasferito gli Uffici compartimentali e le sezioni distaccate del Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale (SIMN) del DSTN. Così le competenze del Servizio Idrografico sono passate ad enti regionali (agenzie Arpa, oppure servizi tecnici regionali, oppure altri enti). Essendo le stazioni principalmente di tipo termo-pluviometrico, non sono disponibili i dati meteorologici come la velocità e la direzione del vento o la radiazione solare necessari alla generazione dei TRY e quindi le serie storiche di tale servizio non sono state né analizzate né importate nel Data Base.

Per quanto riguarda le **reti regionali** si possono individuare due enti che hanno il maggior numero di stazioni, distribuite sul territorio nazionale:

- i Servizi Agrometeorologici Regionali (SAR);
- le Agenzie Regionali prevenzione e Ambiente (ARPA).

I primi sono presenti, o sono in fase di attivazione, praticamente in tutte le regioni d'Italia [31] e quasi la metà hanno esperienza operativa decennale. Essi sono molto importanti perché per alcune regioni sono l'unico Ente di riferimento per la meteorologia. Infatti



in 13 regioni i SAR rappresentano l'unico Ente che realizza un monitoraggio dettagliato e continuo delle condizioni meteo locali con una tempestiva diffusione dei dati raccolti. La Tabella 2.2 riporta i principali gestori e la composizione della rete agrometeorologica regionale.

Regione	Gestore	Rete
Abruzzo	A.R.S.S.A	60 stazioni automatiche
Basilicata	A.L.S.I.A	40 stazioni automatiche
Calabria	A.R.S.S.A	in fase di realizzazione
Campania	Se. S.I.R.C.A	20 stazioni meccaniche + 37 st. aut.
Friuli Venezia Giulia	E.R.S.A	100 stazioni automatiche
Emilia Romagna	A.R.P.A	50 stazioni automatiche
Lazio	A.R.S.I.A.L + Ass. all'agricoltura	37 st. aut. + 5 st. mecc.
Liguria	C.A.R.	10 st. aut. + 25 per misure mobili
Lombardia	E.R.S.A.L	30 st. aut. + 25 di altri enti
Marche	A.S.S.A.M	70 stazioni automatiche
Molise	E.R.S.A.M	12 attive + 12 di prossima installazione
Piemonte	Settore fitosanitario regionale	160 st. aut. + 350 st. aut. del servizio idrografico regionale
Puglia	-	-
Sardegna	Consorzio S.A.R. s.r.l.	51 st. aut. + 13 di altri enti
Sicilia	Assessorato all'agricoltura	10 st. aut. + 121 st. aut. di nuova installazione
Toscana	A.R.S.I.A	113 stazioni automatiche
Trentino	Centro agrometeorologico provinciale	25 stazioni automatiche
Umbria	A.R.U.S.I.A	64 stazioni automatiche
Valle d'Aosta	-	-
Veneto	A.R.P.A.V	200 stazioni automatiche

**Tabella 2.2:** Caratterizzazione dei servizi agrometeorologici regionali (SAR).

Le ARPA regionali hanno una rete di misura che varia da regione a regione in maniera considerevole, sia per numero di stazioni presenti che per la loro data di attivazione. In particolare, mentre per alcune regioni, come Lombardia ed Emilia-Romagna, la rete è costituita da più di 50 stazioni, in molti casi attive da più di 15 anni, per altre, come Puglia e Campania, la rete ha solo un numero limitato di stazioni (nell'ordine della decina) attive da 4-5 anni al massimo. Inoltre anche la politica adottata per la distribuzione dei dati è differente. Infatti alcune regioni mettono a disposizione tutti i dati acquisiti da tutte le stazioni, dalla loro data di attivazione ad oggi, gratuitamente on-line, per altre i dati vengono ceduti solo a titolo oneroso.

Come è facile intuire, data la varietà di Enti che hanno una rete di misura delle variabili meteorologiche, a parte le regole di installazione e manutenzione stabilite dall'Organizzazione Meteorologica Mondiale (WMO), in Italia non esiste uno standard ufficialmente riconosciuto per i dati meteorologici e quindi le diverse reti presentano caratteristiche differenti. Le principali differenze, facilmente riscontrabili, sono nei parametri acquisiti e nella loro frequenza di acquisizione, nella pronta disponibilità o meno di un dato, nonché

## 2. I dati meteorologici in Italia

---

nelle unità di misura utilizzate. Tutto questo comporta una notevole disomogeneità nei dati acquisiti da enti differenti con la conseguente necessità di analizzare ed uniformare gli stessi.

Dopo un'analisi approfondita della situazione italiana, analizzando, in maniera più completa possibile, gli Enti nazionali, regionali e provinciali che posseggono o gestiscono stazioni meteorologiche, si è potuto valutare quante stazioni sono effettivamente disponibili per la creazione di una banca dati nazionale dei TRY. Questa situazione è riassunta in Tabella 2.3. La mancanza di alcuni dati nella Tabella 2.3 significa che non si è riuscito a trovare informazioni sulla rete di misura e quindi non è possibile fare una previsione di quante stazioni abbiano le caratteristiche necessarie per la generazione dei TRY.

ENTI NAZIONALI	NUMERO STAZIONI	SERIE STORICHE
UCEA	24	≥ 10 anni
AM/ENAV	131	≥ 30 anni
ENTI REGIONALI	NUMERO STAZIONI	SERIE STORICHE
ABRUZZO	19	max 8 anni
BASILICATA	9	max 10 anni
CALABRIA	1	> 10 anni
CAMPANIA	17	max 7 anni
FRIULI VENEZIA GIULIA	14	≥ 10 anni
EMILIA ROMAGNA	88	≥ 10 anni
LAZIO	2	≥ 10 anni
LIGURIA	-	-
LOMBARDIA	18	≥ 10 anni
MARCHE	20	≥ 10 anni
MOLISE	-	-
PIEMONTE	31	≥ 10 anni
PUGLIA	-	-
SARDEGNA	50	≥ 10 anni
SICILIA	-	-
TOSCANA	62	≥ 10 anni
TRENTINO ALTO ADIGE	14	≥ 10 anni
UMBRIA	-	-
VALLE D'AOSTA	20	-
VENETO	107	≥ 10 anni
<b>TOTALE</b>	<b>627</b>	

Tabella 2.3: Riepilogo delle stazioni individuate ed eventualmente utilizzabili per la generazione dei TRY.

È evidente che le stazioni sono in numero sufficiente per generare una banca dati di TRY completa, a copertura dell'intero territorio nazionale.

### 2.2 I dati recuperati

Una volta individuati gli Enti nazionali e regionali la cui rete di misura soddisfa le caratteristiche necessarie al presente progetto di ricerca, si è provveduto a contattare tali

Enti per richiedere la fornitura dei dati meteorologici. L'iter per ottenere tali dati gratuitamente, o ad un costo contenuto, è stato in molti casi lungo e talora non è stato possibile giungere ad un accordo. Questo è dovuto al fatto che, come già evidenziato nel paragrafo precedente, i dati acquisiti dalle stazioni, sono considerati un bene prezioso e, a parte rari casi in cui vengono forniti gratuitamente ed è possibile scaricarli dalla rete, sono gelosamente custoditi dagli Enti possessori e venduti a costi talvolta proibitivi. Un esempio è dato dall' Aeronautica Militare. Dopo avere avuto una fornitura gratuita di 16 stazioni, si è proceduto ripetutamente a richiedere i dati di tutte, o almeno buona parte, delle stazioni da essa gestite, ma dopo ripetuti contatti con vari responsabili, si è preso atto della impossibilità attuale ad acquisire i dati.

### 2.2.1 Riepilogo nazionale

In Tabella 2.4 sono riepilogate tutte le stazioni acquisite, suddivise per regione.

REGIONE	STAZIONI ACQUISITE	REGIONE	STAZIONI ACQUISITE
ABRUZZO	–	MOLISE	1
BASILICATA	10	PIEMONTE	3
CALABRIA	2	PUGLIA	3
CAMPANIA	20	SARDEGNA	3
EMILIA ROMAGNA	19	SICILIA	6
FRIULI VENEZIA GIULIA	19	TOSCANA	4
LAZIO	3	TRENTINO ALTO ADIGE	20
LIGURIA	1	UMBRIA	2
LOMBARDIA	23	VALLE D'AOSTA	–
MARCHE	2	VENETO	13
<b>TOTALE</b>		<b>154</b>	

**Tabella 2.4:** Riepilogo delle stazioni acquisite, suddivise per regione.

Come si può facilmente notare, si è raggiunta una buona copertura del territorio nazionale, anche se purtroppo per l'Abruzzo e la Valle d'Aosta non è stato possibile ottenere alcuna stazione.

In particolare, mentre per alcune regioni le stazioni sono in numero considerevole, indipendentemente dall'estensione territoriale della regione stessa (come il Trentino per cui si può ritenere di avere un'ottima copertura della zona), per altre (come la Liguria) si ha solo una stazione disponibile che risulta evidentemente insufficiente a caratterizzare la regione. Naturalmente, si fa notare l'assenza delle stazioni dell'Aeronautica Militare: occorrerà quindi rimuovere questo limite per una futura base di dati nazionale che voglia dirsi effettivamente completa.

Nei paragrafi seguenti si riportano i dati acquisiti, suddivisi in base agli Enti fornitori. In generale, per gli Enti che hanno fornito i dati per il presente progetto di ricerca, se non indicato diversamente, nella colonna dati si fa riferimento alle seguenti variabili:

- T = temperatura (°C);

## 2. I dati meteorologici in Italia

---

- VV = velocità del vento (m/s);
- DV = direzione del vento (gradi);
- UR = umidità relativa (%);
- Prec = precipitazioni (mm);
- RS = radiazione solare globale ( $W/m^2$ );
- RN = radiazione solare netta ( $W/m^2$ );
- P = pressione atmosferica (mBar);
- Sol = soleggiamento (minuti);
- CN = copertura nuvolosa (ottavi).

### 2.2.2 UCEA

L'iter per l'acquisizione dei dati della Rete Agrometeorologica Nazionale (RAN), gestiti dall'UCEA, è stato lungo, ma alla fine è stato possibile ottenere i dati di 24 stazioni, dalla loro data di attivazione ad oggi. I dati che ci sono stati forniti hanno intervallo orario per le seguenti variabili:

- temperatura,
- umidità relativa,
- pressione atmosferica,
- eliofania,
- radiazione solare;

mentre sono misurati ogni 10 minuti le variabili:

- precipitazione,
- velocità del vento,
- direzione del vento.

La Tabella 2.5 riassume le stazioni dell'UCEA ottenute ed importate nel Data Base.

NOME STAZIONE	REGIONE	NOME STAZIONE	REGIONE
Verzuolo (CN)	Piemonte	Caprarola (VT)	Lazio
Carpeneto (AL)	Piemonte	Borgo San Michele (LT)	Lazio
Piubega (MN)	Lombardia	Campochiaro (CB)	Molise
Montanaso Lombardo (LO)	Lombardia	Piano Cappelle (BN)	Campania
Susegana (TV)	Veneto	Pontecagnano (SA)	Campania
Cividale (UD)	Friuli V.G.	Palo del Colle (BA)	Puglia
Fiume Veneto (PN)	Friuli V.G.	Sibari (CS)	Calabria
San Casciano (FI)	Toscana	Pietranera (AG)	Sicilia
San Piero a Grado (PI)	Toscana	Santo Pietro (CT)	Sicilia
Santa Fista (PG)	Umbria	Libertina (CT)	Sicilia
Marsciano (PG)	Umbria	Chilivani (SS)	Sardegna
Monsampolo (AP)	Marche	Santa Lucia (OR)	Sardegna

Tabella 2.5: Stazioni dell'UCEA acquisite.

### 2.2.3 Aeronautica Militare

L'Aeronautica Militare ha fornito i dati di 16 stazioni. I dati sono in genere triorari, tranne che per la Radiazione solare ed il soleggiamento che risultano essere giornalieri. In genere la serie storica fornita va dal 1965 al 2004. Le stazioni misurano tutte le seguenti variabili, riportate con le unità di misura:

- T = temperatura (°C);
- VV = velocità del vento (nodi);
- DV = direzione del vento (decimi di grdo);
- UR = umidità relativa (%);
- Prec = precipitazioni (mm);

## 2. I dati meteorologici in Italia

---

- P = pressione atmosferica (mBar);
- CN = copertura nuvolosa (ottavi);
- AmN = Altezza minima delle nubi (km);
- VmO = visibilità minima orizzontale (km);
- $T_r$  = temperatura di rugiada ( $^{\circ}\text{C}$ );
- $T_{max}$  = temperatura massima giornaliera ( $^{\circ}\text{C}$ );
- $T_{min}$  = temperatura minima giornaliera ( $^{\circ}\text{C}$ ).

Nella tabella seguente sono riportate, se misurate, le seguenti variabili:

- RS = radiazione solare globale ( $\text{W}/\text{m}^2$ );
- Sol = soleggiamento (ore e decimi di ora).

La Tabella 2.6 mostra in dettaglio le caratteristiche delle stazioni acquisite.

NOME STAZIONE	REGIONE	VARIABILI
Reggio Calabria (RC)	CALABRIA	-
Messina (ME)	SICILIA	RS, Sol
Palermo Boccadifalco (PA)	SICILIA	-
Lecce (LE)	PUGLIA	-
Brindisi (BR)	PUGLIA	RS, Sol
Potenza (PZ)	BASILICATA	-
Napoli/Capodichino (NA)	CAMPANIA	RS, Sol
Roma/Ciampino (RM)	LAZIO	RS, Sol
Falconara (AN)	MARCHE	RS
Firenze/Peretola (FI)	TOSCANA	-
Bologna/Borgo Panigale (BO)	EMILIA ROMAGNA	RS
Genova/Sestri (GE)	LIGURIA	RS
Trieste (TS)	FRIULI	RS, Sol
Catania/Sigonella (CT)	SICILIA	-
Torino/Caselle (TO)	PIEMONTE	R
Cagliari/Elmas (CA)	SARDEGNA	RS, Sol

**Tabella 2.6:** Stazioni dell'Aeronautica Militare acquisite.

### 2.2.4 ALSIA - Basilicata

L' **A.L.S.I.A.** (Agenzia Lucana di Sviluppo e di Innovazione in Agricoltura) ha fornito gratuitamente i dati orari relativi alle stazioni elencate Tabella 2.7. Per queste stazioni la radiazione solare globale è misurata in  $kJ/m^2$ .

Stazione	Provincia	Serie storica	Dati (orari)
Bernalda	MT	1998-2006	T, Prec, RS, VV, DV
Villa d'Agri	PZ	1998-2006	T, Prec, RS, VV, DV
Pisticci	MT	1998-2006	T, Prec, RS, VV, DV
Policoro	MT	1998-2006	T, Prec, RS, VV, DV
Matera Nord	MT	1998-2006	T, Prec, RS, VV, DV
Sarconi	PZ	1998-2006	T, Prec, RS, VV, DV
Satriano	PZ	1998-2006	T, Prec, RS, VV, DV
Venosa Terre della Fortezza	PZ	2000-2006	T, Prec, RS, VV, DV
Metaponto	MT	1996-2006	T, Prec, RS, VV, DV, UR, P, Sol

Tabella 2.7: Stazioni della Basilicata acquisite.

### 2.2.5 CAR - Campania

Il **CAR** (Centro Agrometeorologico Regionale) della Campania ci ha fornito gratuitamente i dati delle 17 stazioni elencate in Tabella 2.8. I dati sono triorari fino al 2005 incluso ed orari nel 2006. In questo caso le unità di misura sono quelle precedentemente indicate, tranne che per la pressione atmosferica misurata in hPa.

Stazione	Provincia	Serie storica	Dati (orari)
Airola	BN	2003-2006	T, UR, VV, DV, RS, P, Prec, Sol
Battipaglia	SA	1999-2006	T, UR, VV, DV, RS, P, Prec, Sol
Buonabitacolo	SA	1999-2006	T, UR, VV, DV, RS, P, Prec, Sol
Castel S. Lorenzo	SA	1999-2006	T, UR, VV, DV, RS, P, Prec, Sol
Castelvetere	AV	2003-2006	T, UR, VV, DV, RS, P, Prec, Sol
Greci	AV	2003-2006	T, UR, VV, DV, RS, P, Prec, Sol
Mirabella	AV	2004-2006	T, UR, VV, DV, RS, P, Prec, Sol
Morcone	BN	2003-2006	T, UR, VV, DV, RS, P, Prec, Sol
Policastro	SA	1999-2006	T, UR, VV, DV, RS, P, Prec, Sol
S. Marco	BN	2003-2006	T, UR, VV, DV, RS, P, Prec, Sol
S. Rufo	SA	2003-2006	T, UR, VV, DV, RS, P, Prec, Sol
Alife	CE	2003-2006	T, UR, VV, DV, RS, P, Prec, Sol
Castel Morrone	CE	2003-2006	T, UR, VV, DV, RS, P, Prec, Sol
Marigliano	NA	2003-2006	T, UR, VV, DV, RS, P, Prec, Sol
Presenzano	CE	2003-2006	T, UR, VV, DV, RS, P, Prec, Sol
Sessa Aurunca	CE	2003-2006	T, UR, VV, DV, RS, P, Prec, Sol
Vitulazio	CE	2003-2006	T, UR, VV, DV, RS, P, Prec, Sol

Tabella 2.8: Stazioni della Campania acquisite.

## 2. I dati meteorologici in Italia

---

### 2.2.6 ARPA - Emilia Romagna

L'ARPA dell'Emilia-Romagna ha creato un profilo personalizzato per il servizio Dexter che ha permesso di scaricare gratuitamente i dati meteo relativi a 14 stazioni, riportate in Tabella 2.9 più altre 4 stazioni fornite direttamente dall'ARPA. I dati misurati sono tutti orari tranne la copertura nuvolosa che è trioraria.

Stazione	Comune e Provincia	Serie storica	Dati (orari)
Argenta	Argenta (FE)	1991-2005	RS, T, UR, DV, VV
Martorano	Martorano (FC)	1991-2005	RS, T, UR, DV, VV
Fiorenzuola	Fiorenzuola d'Arda (PC)	1991-2005	RS, T, UR, DV, VV
S. Pietro Capofiume	S. Pietro Capofiume (BO)	1991-2005	RS, T, UR, DV, VV
Borgo Tossignano	Borgo Tossignano (BO)	1989-2002	T, UR, VV, DV, P, Prec
Cotignola	Cotignola (RA)	1991-2002	T, UR, VV, DV, P, Prec
Finale Emilia	Finale Emilia (MO)	1969-oggi	T, UR, VV, DV, P, Prec
Imola Mario Neri	Imola (BO)	1969-oggi	T, UR, VV, DV, P, Prec
Loiano	Loiano (BO)	1969-oggi	T, UR, VV, DV, P, Prec
Malborghetto di Boara	Ferrara (FE)	1969-oggi	T, UR, VV, DV, P, Prec
Panocchia	Parma	1969-oggi	T, UR, VV, DV, P, Prec
Piumazzo	Castelfranco Emilia(MO)	1993-2002	T, UR, VV, DV, P, Prec
Rolo	Rolo (RE)	1969-oggi	T, UR, VV, DV, P, Prec
San Pancrazio	Parma	1969-oggi	T, UR, VV, DV, Prec
Settefonti	Ozzano dell'Emilia (BO)	1969-oggi	T, UR, VV, DV, P, Prec, CN (3h)
Spilamberto	Spilamberto (MO)	1986-1992	T, UR, VV, DV, P, Prec, CN (3h)
Vignola	Vignola (MO)	1969-oggi	T, UR, VV, DV, P, Prec
Volano	Codigoro (MO)	1969-oggi	T, UR, VV, DV, P, Prec

Tabella 2.9: Stazioni dell'Emilia Romagna acquisite.



### 2.2.7 OSMER - Friuli Venezia Giulia

L' Agenzia Regionale per la Protezione dell' Ambiente (ARPA), settore OSMER - Osservatorio Meteorologico Regionale, del Friuli Venezia Giulia ha fornito gratuitamente i dati di 16 stazioni, riportate in Tabella 2.10.

Stazione	Provincia	Serie storica	Dati (orari)
Vivaro	PN	1990-2006	T, UR, DV, VV, P, RS, Prec
San Vito	UD	1990-2006	T, UR, DV, VV, P, RS, Prec
Brugnera	PN	1990-2006	T, UR, DV, VV, P, RS, Prec
Faedis	UD	1990-2006	T, UR, DV, VV, P, RS, Prec
Fagagna	UD	1990-2006	T, UR, DV, VV, P, RS, Prec
Talmassons	UD	1990-2006	T, UR, DV, VV, P, RS, Prec
Palazzolo	UD	1990-2006	T, UR, DV, VV, P, RS, Prec
Capriva del Friuli	GO	1990-2006	T, UR, DV, VV, P, RS, Prec
Gradisca d' Isonzo	GO	1990-2006	T, UR, DV, VV, P, RS, Prec
Cervignano del Friuli	UD	1992-2006	T, UR, DV, VV, P, RS, Prec
Sgonico	TS	1992-2006	T, UR, DV, VV, P, RS, Prec
Enemonzo	UD	1994-2006	T, UR, DV, VV, P, RS, Prec
Forni di Sopra	UD	2004-2006	T, UR, DV, VV, P, RS, Prec
Gemona del Friuli	UD	1990-1995	T, UR, DV, VV, P, RS, Prec
Fossilon di Grado	GO	1992-2004	T, UR, DV, VV, RS
Udine	UD	1992-2004	T, UR, DV, VV, RS

**Tabella 2.10:** Stazioni del Friuli Venezia Giulia acquisite.

## 2. I dati meteorologici in Italia

### 2.2.8 ARPA - Lombardia

L'ARPA della Lombardia, come quella dell'Emilia Romagna, mette a disposizione agli utenti, sul proprio sito internet, i dati meteo ed è stato possibile scaricare i dati delle stazioni riportate in Tabella 2.11. Le unità di misura differiscono da quelle indicate precedentemente per le variabili meteorologiche della pressione, misurata in hPa. RN indica la radiazione netta ( $W/m^2$ ) oraria.

Stazione	Provincia	Serie storica	Dati (orari)
Stezzano	BG	1993-2007	T, UR, DV, VV, RS, Prec
Bergamo Via Goisis	BG	1996-2007	T, UR, DV, VV, RS, Prec
Bergamo Via San Giorgio	BG	1989-2007	T, UR, DV, VV, P, RS, Prec
Costa Volpino	BG	1992-2006	T, UR, DV, VV, RS, Prec
Filago	BG	1992-2006	T, UR, DV, VV, RS, Prec
Gambara	BS	1990-2007	T, UR, DV, VV, P, Prec
Minoprio	CO	1990-2007	T, UR, DV, VV, RS, Prec
Capralba	CR	1996-2007	T, UR, DV, VV, RS, Prec
Colico	LC	1990-2007	T, UR, DV, VV, P, Prec
S. Angelo Lodigiano	LO	1993-2007	T, UR, DV, VV, RS, Prec
Curtatone	MN	1992-2007	T, UR, DV, VV, RS, Prec
Milano via Juvara	MI	1999-2007	T, UR, DV, VV, P, RS, Prec, RN
Carate Brianza	MI	1996-2007	T, UR, DV, VV, P, RS, Prec, RN
Bema	SO	1993-2007	T, UR, DV, VV, RS, Prec
Bormio	SO	1993-2007	T, UR, DV, VV, P, Prec
Busto Arsizio via Magenta	VA	1991-2007	T, UR, DV, VV, P, Prec
Lonate Pozzolo	VA	1996-2007	T, UR, DV, VV, P, RS, Prec
Varese Vidoletti	VA	1991-2007	T, UR, DV, VV, P, Prec

Tabella 2.11: Stazioni del Lombardia acquisite fornite dall'ARPA.

### 2.2.9 Provincia di Brescia - Lombardia

La Provincia di Brescia ha fornito i dati delle tre stazioni riportate in Tabella 2.12. Anche in questo caso le unità di misura sono quelle precedentemente indicate, tranne per la Radiazione solare misura in  $Wh/m^2$ , e la Temperatura misurata in decimi °C.

Stazione	Provincia	Serie storica	Dati (orari)
Puegnago	BS	1993-2004	T, UR, RS, Prec
Remedello	BS	1996-2005	T, UR, DV, VV, RS, Prec
Sale Marasino	BS	1995-2005	T, UR, DV, VV, P, RS, Prec

Tabella 2.12: Stazioni del Lombardia acquisite fornite dalla Provincia di Brescia.

### 2.2.10 LaMMA - Toscana

Per la Toscana l'unica stazione acquisita da enti regionali è stata quella di Cascine (PI) fornita dal Laboratorio di meteorologia e modellistica ambientale LaMMA. La serie storica va dal 1989 al 2004 relativa alle variabili di Radiazione Solare ( $j/m^2$ ), Temperatura (°C), Umidità relativa (%) e Direzione (gradi) e velocità ( $m/s$ ) del vento.

### 2.2.11 Centro Agrometeorologico Provinciale – S. Michele all’Adige - Trentino

Il **Centro Agrometeorologico Provinciale** – S. Michele all’Adige (TN) ha a disposizione un database, consultabile online, da cui sono stati scaricati gratuitamente tutti i dati di interesse per le stazioni della provincia di Trento. Le stazioni individuate ed acquisite sono 20 e sono riportate in Tabella 2.13. Anche in questo caso vi sono delle unità di misura differenti. Infatti la radiazione solare è misurata in  $Mj/m^2$ . Sol indica il soleggiamento (secondi).

Stazione	Provincia	Serie storica	Dati (orari)
San Michele	TN	1983-2006	T, UR, DV, VV, P, RS,
Borgo Valsugana	TN	1983-2006	T, UR, DV, VV, P, RS,
Trento Sud	TN	1983-2006	T, UR, DV, VV, P, RS,
Arco	TN	1983-2006	T, UR, DV, VV, P, RS,
Cles	TN	1983-2006	T, UR, DV, VV, P, RS,
Ala	TN	1983-2006	T, UR, DV, VV, P, RS,
Caldonazzo lago	TN	1994-2007	T, UR, DV, VV, P, RS, Prec
Baselga di Pinè	TN	1997-2007	T, UR, Prec, DV, VV, RS, Sol
Lavazè	TN	1993-2007	T, UR, DV, VV, P, RS, Prec
Paneveggio	TN	1987-2007	T, UR, DV, VV, P, RS, Prec
Passo Brocon	TN	1988-2007	T, UR, DV, VV, P, RS, Prec
Passo Tonale	TN	1987-2007	T, UR, DV, VV, P, RS, Prec
Passo Vezzena	TN	1990-2007	T, UR, DV, VV, P, RS, Prec
Pinzolo Prà Rodont	TN	1989-2007	T, UR, DV, VV, P, RS, Prec
Polsa	TN	1994-2007	T, UR, DV, VV, P, RS, Prec
Rabbi	TN	1992-2007	T, UR, DV, VV, P, RS, Prec
Riva del Garda	TN	1990-2007	T, UR, DV, VV, P, RS, Prec
Savignano	TN	1993-2007	T, UR, DV, VV, P, RS, Prec
Tovel	TN	1985-2007	T, UR, DV, VV, P, RS, Prec
Tremalzo	TN	1987-2007	T, UR, DV, VV, P, RS, Prec

Tabella 2.13: Stazioni del Trentino acquisite

### 2.2.12 Istituto Veneto di Scienze Lettere ed Arti - Veneto.

L’ **Istituto Veneto di Scienze Lettere ed Arti** fornisce gratuitamente i dati relativi ad alcune stazioni della provincia di Venezia. La Tabella 2.14 riporta le stazioni che hanno le caratteristiche per la generazione dei TMY e che sono state acquisite. La stazione Aeroporto Marco Polo ha dati triorari. Le unità di misura sono quelle indicate precedentemente tranne che per VV\* che indica la velocità del vento espressa in nodi mentre la copertura nuvolosa è espressa in decimi. CS indica la classe di stabilità atmosferica.

## 2. I dati meteorologici in Italia

---

Stazione	Provincia	Serie storica	Dati (orari)
Aeroporto Marco Polo	VE	1961-1981	P, DV, VV*, T, CN
Porto Marghera stazione 5	VE	1993-2004	DV, VV, T, CS
Porto Marghera stazione 23	VE	1993-2004	T, UR, RS, Prec
Cavanis	VE	2000-2007	T, UR, RS, Prec, DV, VV
CNR	VE	1992-2006	T, P, RS, Prec, DV, VV

Tabella 2.14: Stazioni del Veneto acquisite.

### 2.2.13 ARPA - Veneto

L' ARPA del Veneto ha fornito gratuitamente i dati delle stazioni riportate in Tabella 2.15. Le unità di misura sono quelle indicate precedentemente tranne che per le seguenti variabili:

- T = temperatura (decimi °C);
- VV = velocità del vento (dm/s).

Stazione	Provincia	Serie storica	Dati (orari)
Belluno Viale Europa	BL	1992-2004	RS, T, UR, DV5m, VV5m
Legnaro	PD	1992-2004	RS, T, UR, DV10m, VV10m, DV2, VV2m
Villadose	RO	1992-2004	RS, T, UR, DV10m, VV10m
Breda di Piave	TV	1992-2004	RS, T, UR, DV10m, VV10m
Cavallino (Treporti)	VE	1992-2004	RS, T, UR, DV10m, VV10m
Villafranca Veronese	VR	1992-2004	RS, T, UR, DV5m, VV5m
Quinto Vicentino	VI	1992-2004	RS, T, UR, DV5m, VV5m, DV10m, VV10m

Tabella 2.15: Stazioni dell'ARPAV acquisite.

## Capitolo 3

# Correzione e completamento dei dati acquisiti ed importati nel Data Base

I dati meteorologici acquisiti, prima di potere essere utilizzati, devono essere sottoposti ad una procedura di pulizia dei dati errati e/o mancanti, con una eventuale ricostruzione delle lacune presenti. Inoltre, un altro aspetto affrontato nella importazione dei dati nel Data Base è stato l'intervallo di acquisizione. Infatti per una stessa stazione alcune variabili erano state misurate ad intervalli temporali differenti da altre, ed inoltre, in alcuni casi, l'intervallo di acquisizione cambiava da un certo anno in poi divenendo, come nel caso delle stazioni della Campania, da triorario ad orario. Infine sono state calcolate le grandezze derivate quali le Classi di Stabilità atmosferica di Pasquill-Gifford e la Mixing Height.

### 3.1 Ricostruzione dei dati mancanti

Un aspetto fondamentale dei dati meteorologici è la qualità del dato. Essa dipende da vari fattori, primo fra tutti la strumentazione impiegata per la misura. Per potere valutare la bontà del dato misurato si deve fare riferimento a vari fattori:

- caratteristiche degli apparati e dei sensori e loro manutenzione;
- modalità di posizionamento degli strumenti in campo;
- scansione temporale, particolarmente importante per i dati dei decenni passati, quando gli strumenti erano a lettura diretta e richiedevano costose letture in campo;
- modalità di effettuazione della registrazione dei dati, che potrebbe essere fonte di errori sia casuali che sistematici.

Negli ultimi decenni, grazie allo sviluppo dell'elettronica, le misure effettuate mediante le stazioni automatiche sono diventate predominanti su quelle manuali, ma questo non significa che le prime siano più affidabili delle seconde [32]. Una delle cause di ciò, è che la "strada" che il dato compie tra il sensore e l'archivio, un tempo molto breve, è diventata estremamente lunga. Infatti, se la misura della temperatura (ad esempio) veniva in passato effettuata leggendo e trascrivendo immediatamente sul registro la posizione

### 3. Correzione e completamento dei dati acquisiti ed importati nel DataBase

---

del livello del mercurio, oggi la caduta di tensione misurata su una resistenza al platino dipende dalla stabilità del generatore, dal convertitore analogico-digitale, dalla trasmissione dei dati via telefono o via radio e dalla scrittura su un file. Risulta quindi evidente che è sufficiente che uno solo di questi passaggi fallisca per perdere il dato, o renderlo erroneo. Appare evidente che la strumentazione meteorologica non deve essere troppo “raffinata” (e cioè troppo fragile); infatti, la robustezza di uno strumento, associata alla facilità di manutenzione, consente di poter contare sui dati anche in condizioni di impiego difficili o estreme (come ondate di caldo o di freddo, piogge intense,...) [33]. Un altro aspetto importante per la qualità del dato è costituito dalle caratteristiche metrologiche, come la precisione dello strumento, la sensibilità, la prontezza, la risoluzione, ecc.

Oggi, lavorare in qualità è una delle regole a cui devono attenersi tutte le reti meteorologiche, adeguandosi alle norme di installazione e gestione stabilite dall’Organizzazione Meteorologica Mondiale (WMO), e quindi i dati vengono sottoposti alla procedura di controllo qualità e vengono etichettati con uno o più marcatori di qualità per poi decidere se convalidare il dato, oppure rimuoverlo e sostituirlo con un dato ricostruito. Tuttavia non si può, comunque, escludere la presenza di dati non veritieri nelle serie storiche.

Da quanto esposto finora, è evidente che la procedura di creazione del Data Base è stata alquanto laboriosa con un dispendio di energie notevole. Oltre ai problemi evidenziati di disomogeneità delle variabili meteorologiche per intervallo di acquisizione e per unità di misura utilizzata ed alla eventuale presenza di dati mancanti e/o erronei, si è dovuto anche affrontare il problema che ogni Ente utilizza il formato che ritiene più opportuno per l’archiviazione dei dati. Una volta importati tutti i dati, si è effettuato un controllo per valutare quali dati fossero accettabili e quali invece dovessero essere considerati come errati o mancanti per potere poi procedere ad eventuali correzioni/ricostruzioni.

I criteri di controllo adottati sugli errori sono di due tipi: un controllo di tipo “assoluto”, ed uno di tipo “relativo”. In particolare, si è fatto riferimento ai criteri usati nella costruzione del TMY greco [34] [35], per le variabili: temperatura, umidità relativa, velocità del vento e radiazione solare, modificando in modo lieve il limite minimo della temperatura per prendere in considerazione le differenze climatologiche dell’Italia rispetto alla Grecia. Il primo criterio valuta se il dato in esame si trova in un preciso range di validità (per esempio una temperatura maggiore di 50 °C è evidentemente un errore di misura e viene etichettata come errore assoluto, eliminata, e se possibile ricostruita).

Il secondo criterio, invece, si basa su misure contigue, e permette di indagare se la differenza tra due dati contigui supera un valore stabilito come soglia massima (per esempio, se le temperature misurate in cinque ore successive sono, in ordine, 12°C, 13°C, 25°C, 15°C, 14°C, allora la temperatura di 25°C viene etichettata come errore relativo, anche in questo caso eliminata ed eventualmente ricostruita).

Tali criteri per tutte le variabili prese in esame, sono esposti in Tabella 3.1, in cui sono anche riportate le unità di misura a cui fanno riferimento tali criteri. Si fa notare che i criteri sono ovviamente differenti se i dati analizzati hanno intervallo temporale di acquisizione

### 3. Correzione e completamento dei dati acquisiti ed importati nel DataBase

orario, triorario o giornaliero.

VARIABILE	UNITÀ DI MISURA	CRITERIO ASSOLUTO	CRITERIO RELATIVO
RADIAZIONE SOLARE	[Wh/m <sup>2</sup> ]	Il valore deve essere compreso tra 0 e 1400 (misure orarie) e 33600 (misure giornaliere)	La differenza massima tra due misure contigue non deve superare 400 (misure orarie) o 9600 (misure giornaliere)
TEMPERATURA	[°C]	Il valore deve essere compreso tra -30 e 50	La differenza massima tra due misure contigue non deve superare 4 (misure orarie) o 12 (misure triorarie)
UMIDITÀ	[%]	Il valore deve essere compreso tra 0 e 100	La differenza massima tra due misure contigue non deve essere superiore a 15 (misure orarie) o 45 (misure triorarie)
PRESSIONE ATMOSFERICA	[millibar]	Il valore deve essere compreso tra 0 e 1500	n.d.
DIREZIONE DEL VENTO	[gradi]	Il valore deve essere compreso tra 0 e 360	n.d.
VELOCITÀ DEL VENTO	[m/s]	Il valore deve essere compreso tra 0 e 50	La differenza massima tra misure contigue non deve essere superiore a 10 (misure orarie) o 30 (misure triorarie)
COPERTURA NUVOLOSA		Il valore deve essere compreso tra 0 e 9	n.d.
SOLEGGIAMENTO	[ore e decimi di ora ]	Il valore deve essere compreso tra 0 e 24	n.d.

**Tabella 3.1:** Criteri di controllo degli errori assoluti e relativi adottati.

Esistono altri controlli, talora usati, per verificare l'attendibilità di un dato meteorologico. Sicuramente il più usato è un controllo cosiddetto "spaziale", che si basa sul confronto delle misure effettuate da stazioni contigue. Purtroppo, vista la distribuzione spaziale non uniforme delle stazioni acquisite nel presente progetto di ricerca, e la bassa densità delle stesse sul territorio italiano, allo stato attuale, la distanza fra le stazioni non è sufficientemente piccola da permettere un controllo di questo tipo.

Per quanto riguarda il controllo delle lacune presenti, non è stato necessario definire alcun criterio, perché si è semplicemente provveduto al conteggio dei dati mancanti, che vengono segnalati da ogni Ente in maniera diversa: alcuni Enti utilizzano un numero particolare (in genere -9999), altri semplicemente non riportano alcun valore, dove dovrebbe essere presente la misura. Bisogna mettere in evidenza, ancora una volta, che le misure possono essere orarie, triorarie, ed in alcuni casi (come per la radiazione solare delle stazioni fornite dall'Aeronautica Militare) giornaliera. Quindi nell'analisi dei conteggi delle lacune, assume molta importanza, oltre al valore assoluto dei dati mancanti, anche il valore percentuale, valutato in riferimento al totale delle rilevazioni effettuabili in un certo periodo di tempo (per esempio in un anno avremo 8760 rilevazioni orarie e 365 rilevazioni giornaliere).

### 3. Correzione e completamento dei dati acquisiti ed importati nel DataBase

---

Una volta individuati i dati mancanti (siano essi "buchi" o dati errati) si è provveduto, ove possibile, alla loro ricostruzione. I metodi utilizzati (illustrati analiticamente nei paragrafi successivi) per tale ricostruzione sono stati la spline cubica, per buchi al massimo di 5 ore consecutive, ed il polinomio di primo grado, per buchi di 6-24 ore e 25-72 ore. Per lacune di ampiezza maggiore il dato non è stato ricostruito

Le variabili meteo analizzate per la loro ricostruzione, sono state solo quelle di interesse per le applicazioni ambientali ed energetiche e sono riportate in Tabella 3.2, che mostra anche la percentuale di dati ricostruiti rispetto a quelli inizialmente mancanti.

VARIABILE	BUCHI ED ERRORI INIZIALI	RILEVAMENTI RICOSTRUITI	PERCENTUALE DI RICOSTRUZIONE
Radiazione Solare	38617	26555	68.8 %
Temperatura	19275	4320	22.4 %
Umidità relativa	24367	4848	20 %
Pressione atmosferica	51677	1131	2.2 %
Direzione del vento	29190	3858	13.2 %
Velocità del vento	25251	3970	15.7 %
Copertura nuvolosa	102830	618	0.6 %
Soleggiamento	71150	2856	4 %
<b>Media su tutte le variabili</b>	<b>45294</b>	<b>6019</b>	<b>13.9 %</b>

**Tabella 3.2:** Valori mediati su tutte le stazioni dei Buchi ed errori iniziali (BI), dei rilevamenti ricostruiti (RR) e valore percentuale tra RR e BI.

#### 3.1.1 Lacune 1-5 ore

Il metodo di interpolazione usato per la ricostruzione dei dati erronei e/o mancanti per lacune al massimo di 5 ore consecutive è la spline cubica. La decisione di scegliere le spline cubiche è giustificata dal fatto che i polinomi interpolanti classici, pur passando esattamente dai punti dati, all'aumentare del loro grado, diventano estremamente oscillanti. Le spline sono polinomi continui a tratti, hanno un carattere locale e presentano un comportamento meno oscillante rispetto ai polinomi. La letteratura offre una vasta scelta di testi e materiale didattico che spiegano le spline e le loro possibili applicazioni. Di seguito si riporta una breve spiegazione matematica di tali metodi di interpolazione.

Le spline sono polinomi a tratti il cui dominio risulta suddiviso in sotto domini all'interno dei quali la funzione viene rappresentata da un polinomio di ordine  $n$ . In particolare la spline cubica è formata da polinomi di terzo grado. Nei nodi interni del dominio verranno soddisfatte le condizioni di continuità della funzione e delle sue derivate fino all'ordine  $n-1$ . Supponendo di avere  $N$  punti, una volta ordinate le ascisse in modo crescente:  $x_1 < x_2 < x_3 < \dots < x_N$ , la spline cubica sarà formata dall'unione di  $N-1$  polinomi



di grado 3 (gli  $S_k(x)$ ) ed avrà la forma:

$$\begin{cases} S_1(x); & x_1 \leq x \leq x_2 \\ S_2(x); & x_2 \leq x \leq x_3 \\ \dots \\ S_{N-1}(x); & x_{N-1} \leq x \leq x_N \end{cases}$$

Tali polinomi dovranno soddisfare le seguenti condizioni:

$$\begin{aligned} I & S(x_k) = y_k & k = 1, 2, \dots, N \\ II & S_{k-1}(x_k) = S_k(x_k) & k = 2, 3, \dots, N-1 \\ III & S'_{k-1}(x_k) = S'_k(x_k) & k = 2, 3, \dots, N-1 \\ IV & S''_{k-1}(x_k) = S''_k(x_k) & k = 2, 3, \dots, N-1 \end{aligned}$$

che rappresentano rispettivamente:

- I: il passaggio dei polinomi dai nodi;
- II: la continuità delle funzioni nei nodi interni;
- III: la continuità delle derivate prime nei nodi interni;
- IV: la continuità delle derivate seconde nei nodi interni.

Essendo formata da polinomi di terzo grado, per ogni tratto della cubica vi saranno 4 parametri incogniti da determinare per un totale di  $4(N-1)$  incognite e le condizioni da I a IV forniscono solo  $4N-6$  equazioni. Le due condizioni aggiuntive che chiuderanno il sistema possono essere le seguenti:

$$V \quad S'(x_1) = f'(x_1), \quad S'_{N-1}(x_N) = f'(x_N)$$

oppure

$$VI \quad S''(x_1) = 0, \quad S''_{N-1}(x_N) = 0$$

che rappresentano:

- V: il soddisfacimento di una condizione sulla derivata prima agli estremi del dominio;
- VI: l'annullamento della derivata seconda agli estremi del dominio.

Ovviamente, l'utilizzo della condizione V implica la conoscenza del valore della derivata prima negli estremi dell'intervallo e quindi risulta più conveniente e veloce usare la condizione VI. In questo secondo caso si parla di spline cubica naturale. Tramite dei semplici calcoli, la  $S(x)$ , per  $x_k < x < x_{k+1}$ , può essere scritta nel seguente modo:

$$S(x) = Ay_k + By_{k+1} + CS''(x_k) + DS''(x_{k+1}) \tag{3.1}$$

### 3. Correzione e completamento dei dati acquisiti ed importati nel DataBase

---

dove i coefficienti A, B, C, D, sono:

$$A \equiv \frac{x_{k+1} - x}{x_{k+1} - x_k} \quad B \equiv 1 - A = \frac{x - x_k}{x_{k+1} - x_k}$$
$$C \equiv \frac{1}{6}(A^3 - A)(x_{k+1} - x_k)^2 \quad D \equiv \frac{1}{6}(B^3 - B)(x_{k+1} - x_k)^2$$

Per il calcolo delle derivate seconde da inserire nella precedente espressione, bisogna risolvere un sistema lineare costituito da N incognite (le  $S''(x_k)$ ) in N equazioni: N-2 equazioni, relative ai nodi interni, espresse nella forma:

$$\frac{x_k - x_{k-1}}{6} S''(x_{k-1}) + \frac{x_{k+1} - x_{k-1}}{3} S''(x_k) + \frac{x_{k+1} - x_k}{6} S''(x_{k+1}) = \frac{y_{k+1} - y_k}{x_{k+1} - x_k} - \frac{y_k - y_{k-1}}{x_k - x_{k-1}} \quad (3.2)$$

e le due relative ai nodi estremi che impongono l'annullamento della derivata seconda:

$$S''(x_1) = 0$$
$$S''(x_N) = 0$$

Una volta noti i valori delle derivate seconde nei nodi, è possibile calcolare, tramite la (4.7), il valore dell'incognita (dato mancante) della spline cubica in qualunque punto appartenente al dominio.

Per validare la metodologia di ricostruzione mediante la spline cubica, sono stati processati dei file orari di temperatura, umidità, velocità del vento e radiazione solare, dove sono state opportunamente create delle lacune da 1 fino a 5 ore consecutive. I dati mancanti sono stati quindi ricostruiti col metodo suddetto. I valori ricostruiti sono stati confrontati con quelli originali mediante il valore assoluto della differenza tra i due dati. Quindi dividendo tali differenze per il valore massimo orario della variabile considerata e facendo la media di tali rapporti, si sono trovate delle variazioni medie percentuali che vanno dal 1% (per lacune di 1 ora) fino ad un max del 3% (per lacune di 5 ore consecutive). Si può quindi concludere che la spline cubica dà una buona ricostruzione di dati mancanti fino a cinque ore consecutive.

#### 3.1.2 Lacune 6-24 ore

Per l'interpolazione lineare delle lacune di durata maggiore di cinque ore consecutive è stata usata la stessa procedura utilizzata nella generazione degli anni tipici Canadesi, chiamati IWEC [36].

I valori ricostruiti si ottengono mediante una semplice forma di interpolazione tra i valori reali che sono antecedenti o successivi alla lacuna da colmare, dando dei pesi a tali rilevazioni in maniera inversamente proporzionale alla distanza che le separa dal dato da

ricostruire. Intuitivamente, se per approssimare il dato del giorno 5 si sceglie il dato del giorno 4 (dg4) (distanza 1) e il dato del giorno 8 (dg8) (distanza 3), il valore ricostruito è del tipo:

$$\frac{dg4 \cdot 3 + dg8 \cdot 1}{3 + 1}.$$

In maniera più formale, posta  $x_1, \dots, x_n$  con  $n=1, \dots, 18$  una sequenza di lacune di lunghezza da 6 a 24 ore e  $gx$  il giorno in cui si trova tale sequenza, si va alla ricerca, nei giorni precedenti, della prima sequenza di dati reali o costruiti in cui non compaiano dati mancanti, di lunghezza analoga alla sequenza da ricostruire e le cui ore siano le medesime della sequenza da ricostruire (per esempio, se la lacuna da ricostruire va dalle 5 alle 18, si cercherà nei giorni precedenti una sequenza che va dalle 5 alle 18). Poniamo  $p_1, \dots, p_n$  i valori appena trovati e  $gp$  il giorno cui tali valori appartengono. Si effettua poi la stessa operazione per i giorni successivi fino ad ottenere  $s_1, \dots, s_n$ , che rappresentano la sequenza di valori appartenenti a  $gs$ , giorno successivo a  $gx$ . Se  $(gs - gp) \leq 4$ , un qualsiasi valore  $x_i$  sarà approssimato nel seguente modo:

$$\tilde{X}_i = \frac{(gs - gp) \cdot p_i + (gx - gp) \cdot s_i}{gs - gp}$$

Se  $(gs - gp) > 4$ , oppure se esiste solamente la sequenza antecedente o successiva alla lacuna da chiudere, si verifica che l'eventuale sequenza successiva o l'eventuale sequenza antecedente si trovino al più a distanza 1 dalla lacuna da ricostruire. Se tale condizione è rispettata, i valori approssimati per la sequenza di dati mancanti diventa la sequenza appena trovata, sia essa quella antecedente o quella successiva con distanza 1.

Se nessuna delle precedenti condizioni è rispettata, la lacuna non può essere colmata e si passa all'esame della lacuna successiva.

Una volta approssimati i valori, si procede all'eliminazione del trend lineare da destra e da sinistra. Per l'eliminazione del trend lineare da destra si procede all'individuazione del valore  $x_0$ , immediatamente precedente al primo rilevamento mancante. Supponendo il valore  $x_0$  mancante, si calcola il valore teorico della sua interpolazione usando il metodo visto al passo precedente; posto  $\tilde{X}_0$  tale valore, pongo  $\Delta x_0 = (x_0 - \tilde{X}_0)$ .

Viene quindi calcolata una differenza analoga per  $x_{n+1}$ , il primo valore non mancante successivo alla sequenza di valori mancanti  $x_1, \dots, x_n$  e pongo  $\Delta x_{n+1} = (x_{n+1} - \tilde{X}_{n+1})$ ; Se  $\Delta x_0$  oppure  $\Delta x_{n+1}$  non può essere calcolato, la lacuna non può essere chiusa e si passa all'esame della lacuna successiva. Nel caso in cui i due coefficienti possono essere calcolati, si modifica il valore di tutti i valori calcolati  $\tilde{X}_i$  nel seguente modo:

$$\tilde{X}_i = \tilde{X}_i + \frac{\Delta x_{n+1} \cdot i + \Delta x_0 \cdot (n + 1 - i)}{n + 1} \tag{3.3}$$

dove  $i = 1, \dots, n$ .

Tale metodo è stato applicato per tutte le variabili necessarie alla creazione dei vari anni tipici.

#### 3.1.3 Lacune 25-72 ore

L'idea per la ricostruzione delle lacune da 25 a 72 ore è logicamente simile a quella utilizzata per la ricostruzione delle lacune 6-24 ore. La differenza consiste nel fatto che, in questo caso, si cerca una qualunque sequenza di valori validi nelle 25 ore antecedenti alla lacuna in esame e una sequenza della stessa lunghezza successiva alla lacuna. Poniamo, quindi,  $x_n, \dots, x_{n+24}$  la sequenza di 25 ore consecutive successiva alla lacuna in esame e  $x_p, \dots, x_{p+24}$  la sequenza della stessa durata antecedente. Se  $(n - p) \leq 96$ , per le due sequenze ottenute viene effettuata una prima elaborazione per la rimozione del trend lineare secondo la seguente procedura.

Posto  $0 \leq i \leq 24$ , si calcola

$$x_{mod(i,24)i}^p = \frac{x_{p+1} - (x_{p+24} - x_p) \cdot i}{24} \quad (3.4)$$

Lo stesso viene fatto per la sequenza del futuro e il vettore di valore risultante viene chiamato  $x_i^n$ , con  $0 \leq i \leq 24$ . Viene quindi calcolata la sequenza di valori interpolati nel seguente modo: posto  $0 \leq i \leq length(buco)$ , con  $length(buco)$  che indica la lunghezza in ore della lacuna, si ha che:

$$x_i = \frac{x_{mod(i,24)i}^p \cdot \Delta n + x_{mod(i,24)i}^n \cdot \Delta p}{\Delta p + \Delta n} \quad (3.5)$$

dove  $mod(i, 24)$  indica il valore di  $i$  modulo 24 ed  $i$  è un valore compreso tra l'indice  $k$ , indice del primo elemento mancante della lacuna in esame e l'indice  $k+length(buco)$  cioè l'indice dell'ultimo valore mancante della lacuna. Una volta calcolata, tale sequenza è copiata nei record dei rilevamenti mancanti e viene effettuata la fase di rimozione del trend lineare in modo analogo a quanto descritto nel caso delle lacune 6-24 ore.

Se invece  $(n - p) > 96$ , viene allora scelta la sequenza più vicina alla lacuna, verificando che la stessa inizi (nel caso viene presa la sequenza del futuro) o finisca (nel caso venga presa la sequenza del passato) immediatamente prima o immediatamente dopo la lacuna; se ciò non si verifica la lacuna non può essere chiusa. Se la sequenza del passato (o del futuro) viene trovata, allora per la sequenza scelta viene operata la prima rimozione del trend:

$$x_{mod(i,24)i}^t = \frac{x_{t+1} - (x_{t+24} - x_t) \cdot i}{24} \quad (3.6)$$

con  $t=p,n$  in base a quale sequenza è stata scelta. La nuova sequenza calcolata viene copiata nei record dei rilevamenti mancanti e viene operata la fase di rimozione del trend lineare in maniera analogo a quanto descritto precedentemente.

### 3.2 Omogenizzazione dell'intervallo di acquisizione dei dati

Un altro problema affrontato nella importazione dei dati nel Data Base è stato l'intervallo di acquisizione. Infatti, per una stessa stazione alcune variabili erano state misurate ad intervalli temporali differenti da altre, ed in alcuni casi, per una stessa variabile l'intervallo di acquisizione cambiava da un certo anno in poi. Di seguito si riporta come sono state analizzate le differenti situazioni presenti e come si è uniformata la misura. I procedimenti esposti si riferiscono ai dati misurati ogni 10 minuti, ma sono gli stessi utilizzati per il passaggio dai dati orari a triorari. La direzione e la velocità del vento sono in alcuni casi misurate ogni dieci minuti, oppure con misure triorarie (e, da un certo anno in poi, orarie). È stato allora necessario trovare un metodo per portare le misure da ogni dieci minuti a misure orarie (per uniformarle con le altre misure della stessa stazione) oppure da orarie a triorarie, per avere una serie storica con le stesse caratteristiche per tutti gli anni.

Le sei misure ogni dieci minuti sono aggregate in un dato orario mediante la media vettoriale. La direzione  $dv$  (espressa in gradi) e la velocità  $vv$  (scalare) del vento vengono prima utilizzate per costruire il vettore vento  $W$ :

$$W = u \cdot \vec{i} + v \cdot \vec{j}, \quad (3.7)$$

dove  $\vec{i}$  e  $\vec{j}$  sono i versori diretti rispettivamente verso EST e verso NORD (che corrispondono rispettivamente a  $90^\circ$  e  $0^\circ$ ) Dei 6 vettori (relativi alle sei misure eseguite nell'intervallo di un'ora) viene fatta la media delle componenti come:

$$um = \left( \sum_{k=1}^6 u_k \right) / 6, \quad (3.8)$$

$$vm = \left( \sum_{k=1}^6 v_k \right) / 6, \quad (3.9)$$

Quindi, dal vettore medio risultante calcolato mediante le componenti medie:

$$Wm = um \cdot \vec{i} + vm \cdot \vec{j}, \quad (3.10)$$

si ricava la velocità oraria del vento come modulo delle componenti medie, e la direzione oraria come arcotangente delle componenti medie. Questo procedimento di scomposizione vettoriale del vento è stato applicato anche nella ricostruzione dei dati mancanti di queste due variabili.

Per la radiazione solare e la precipitazione, il passaggio dal dato ogni 10 minuti al dato orario è stato fatto sommando le 6 misure per ottenere un valore cumulato nell'ora seguente.

### 3. Correzione e completamento dei dati acquisiti ed importati nel DataBase

Per la temperatura, l'umidità e la pressione, essendo grandezze scalari, si è calcolata la semplice media matematica dei 6 valori misurati ogni 10 minuti.

### 3.3 Calcolo delle variabili meteorologiche derivate

Per la generazione del TRY ambientale è necessario avere a disposizione delle grandezze derivate la misura oraria della radiazione solare, problema questo presente nelle stazioni dell'Aeronautica Militare in cui tale variabile è misurata a cadenza giornaliera. Le grandezze derivate sono state valutate per generare un file completo per le applicazioni ambientali e sono le classi di stabilità orarie e le mixing height urbane e rurali orarie. I valori sono stati calcolati solo per i 12 mesi scelti per formare il TRY ambientale. Di seguito si riporta una breve descrizione del metodo di calcolo.

Per le classi di stabilità è stato utilizzato il metodo "solar radiation/delta-T" (SRDT) [37] che si basa sulla velocità del vento, sulla radiazione solare nelle ore diurne e sul gradiente di temperatura verticale ( $\Delta T$ ) nelle ore notturne. Il metodo è stato modificato in quanto in Italia le stazioni meteorologiche che misurano il gradiente di temperatura verticale sono in numero limitato e di recente attivazione e quindi tale variabile non è disponibile. Basandosi sul fatto che durante la notte l'atmosfera è generalmente stabile o neutrale e che la stabilità è principalmente dipendente dalla velocità del vento, nel caso delle ore notturne il calcolo delle classi di stabilità è stato effettuato basandosi solo sulla velocità del vento. Quindi utilizzando i criteri per il calcolo delle classi di stabilità di Pasquill-Gifford, mostrate in Tabella 3.3 originariamente definite e quelle presentate nel metodo SRDT, è stato possibile calcolare le classi in base ai criteri esposti in Tabella 3.4. Le classi di stabilità sono state identificate con le lettere A (estremamente instabile), B (moderatamente instabile), C (debolmente instabile), D (neutra adiabatica), E (debolmente stabile), F+G (molto stabile).

Velocità del vento al suolo	Radiazione solare diurna			Copertura nuvolosa notturna	
	Forte	Moderata	Debole	Coperto (> 4/8)	Sereno ( $\leq 4/8$ )
m/s					
<2	A	A-B	B	E	F
2-3	A-B	B	C	E	F
3-5	B	B-C	C	D	E
5-6	C	C-D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D

Tabella 3.3: Criteri per il calcolo delle classi di stabilità di Pasquill-Gifford, come originariamente definiti.

Una volta note le classi di stabilità, si è potuto procedere al calcolo della mixing height meccanica, valutata secondo le seguenti formule [38]:

$$h = 0.3 \cdot \frac{u'}{f}, \quad (3.11)$$

### 3. Correzione e completamento dei dati acquisiti ed importati nel DataBase

ORE DIURNE					ORE NOTTURNE	
Velocità del Vento (m/s)	Radiazione Solare (W/m <sup>2</sup> )				Velocità del Vento (m/s)	
	≥ 925	925–675	675–175	< 175		
< 2	A	A	B	D	<2	F
2–3	A	B	C	D	2–5	E
3–5	B	B	C	D		
5–6	C	C	D	D	≥6	D
≥6	C	D	D	D		

**Tabella 3.4:** Criteri usati per stimare le classi di stabilità di Pasquill-Gifford.

per le classi di stabilità A-D, e

$$h = 0.4 \cdot \left( \frac{u'L}{f} \right)^{0.5}, \quad (3.12)$$

per le classi di stabilità E e F, dove:

- h= mixing height (m),
- u'= velocità di frizione (m/s),
- f= parametro di Coriolis (s<sup>-1</sup>)
- L= lunghezza di Monin-Oblukhov (m).

Per maggiori dettagli si rimanda alla bibliografia.

Il passaggio dalla radiazione giornaliera a quella oraria è stato effettuato utilizzando l'eliofania, cioè le ore di insolazione giornaliere misurate dalle stazioni dell'Aeronautica Militare. Il procedimento usato è brevemente riassunto di seguito.

Prima di tutto si è calcolata l'ora di inizio e fine del soleggiamento, suddividendo l'eliofania in parti uguali intorno al mezzogiorno. Tali ore saono indicate come:

- ta: ora di inizio del soleggiamento,
- tt: ora di fine del soleggiamento.

Quindi è stata valutata la radiazione solare oraria extraterrestre, rexh [39]. Una volta nota rexh è stato possibile valutare la radiazione extraterrestre giornaliera, come:

$$rexp = \sum_{ta}^{tt} rexh, \quad (3.13)$$

e quindi la frazione di radiazione giornaliera extraterrestre effettivamente arrivata sulla Terra e misurata dalla stazione. Tale frazione è:

$$fraz = \frac{rg}{rexp}, \quad (3.14)$$

dove rg è la radiazione giornaliera misurata dalla stazione meteorologica. Infine il calcolo della radiazione oraria reale (rh) tra ta e tt è stato effettuato moltiplicando tale frazione per la radiazione oraria extraterrestre:

$$rh = fraz \cdot rexh. \quad (3.15)$$

#### 3.4 Algoritmi per alla ricostruzione dei dati mancanti

L'iter seguito per la costruzione del DataBase può essere schematizzato nel modo esposto in Figura 3.1.

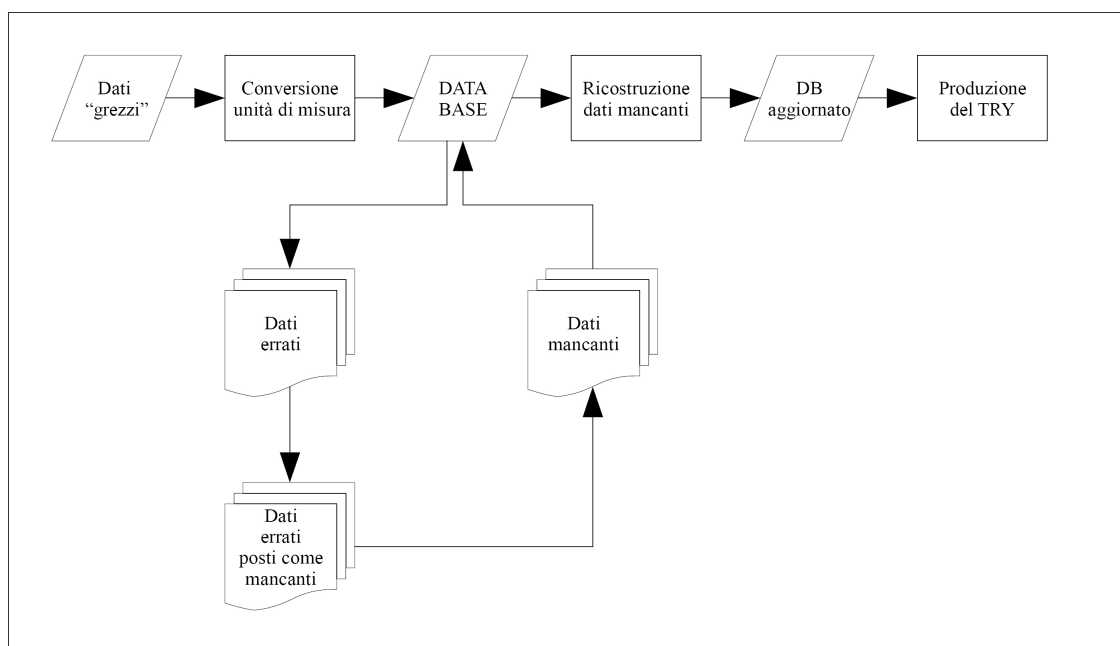


Figura 3.1: Schema di lavoro.

L'algoritmo di ricostruzione non deve solo provvedere all'analisi dei dati erronei o mancanti ed alla loro ricostruzione, ma ha il compito di creare un Data Base omogeneo da cui il programma per l'elaborazione del TRY riceverà le serie storiche di dati meteo da processare. La disomogeneità nei file attualmente ricevuti è dovuta a varie cause, tra cui quella principale è la mancanza di una normativa che regoli l'acquisizione e la diffusione dei dati meteorologici rilevati, per cui ogni ente privato e non, sceglie il formato e l'organizzazione soggettivamente più idonei per l'archivio dei dati.

Possiamo schematizzare le disomogeneità rilevate come segue:

- formato/organizzazione dei dati;
- variabili rilevate e unità di misura;
- periodo;
- campionamento.

Una volta terminata la procedura di importazione dei dati rilevati fisicamente dalle stazioni, si è posto il problema di trovare un metodo che permettesse, quando possibile, di ricostruire i dati mancanti a partire dai rilevamenti effettivi. Questo problema è stato



parzialmente risolto usando due metodi di approssimazione: per una sequenza di rilevamenti mancanti cronologicamente contigui da 1 a 5 ore, è stata usata l'approssimazione tramite l'utilizzo delle funzioni spline, mentre se tale sequenza va da 6 a 24 ore e da 25 a 72 ore, è stato usato il metodo dell'interpolazione lineare, come esposto nei paragrafi precedenti.

Alla fine del processo di ricostruzione delle lacune, preso un qualunque dato presente nella tabella dei rilevamenti di una certa stazione, è sempre possibile stabilirne l'origine osservando i valori di tre campi del record: "flag\_tipo", "valore" e "descrizione". Più in dettaglio, si ha:

- *campo "valore"*: il campo "valore" contiene il valore attuale assegnato alla variabile della stazione indicata dai campi "codice\_var" e "codice\_staz" del record corrispondente; il valore può essere reale (derivante da una rilevazione effettiva della stazione) o stimato (usando i vari metodi di interpolazione precedentemente descritti); quando il valore è "-999" significa che il dato in esame è mancante e non è stato possibile ricostruirlo.
- *campo "flag\_tipo"*: il campo "flag\_tipo" indica l'origine del dato; se "flag\_tipo" ha valore "reale" significa che il dato deriva da una rilevazione fisica, oppure il dato è mancante e non è stato possibile approssimarlo; se "flag\_tipo" ha valore "ric\_spline", significa che il dato era originariamente mancante e facente parte di una sequenza di dati mancanti di lunghezza inferiore o uguale alle 5 ore; tale dato è stato ricostruito utilizzando il metodo delle spline. Se "flag\_tipo" ha valore "ric\_int\_breve", significa che il dato ricostruito faceva parte di una sequenza di dati mancanti di lunghezza compresa tra 6 e 24 ore. Infine se "flag\_tipo" ha valore "ric\_int\_lunga", significa che il dato era originariamente mancante e facente parte di una sequenza di dati mancanti di lunghezza compresa tra le 25 e le 72 ore.
- *Campo "descrizione"*: tale campo per la variabile radiazione solare contiene la stringa "correzione ora notturna radiazione" nel caso in cui il valore sia stato posto uguale a 0 poiché mancante o errato e relativo alle ore notturne.

Gli algoritmi implementati sulla base di quanto descritto nei paragrafi precedenti sono descritti di seguito.

#### 3.4.1 Forzatura dei valori notturni della radiazione

Innanzitutto, per quanto riguarda la radiazione solare, per la quale si conosce il valore nelle ore notturne (nullo), si è proceduto a "forzare", solo per i valori mancanti, o i valori che evidentemente erano errati (come una misura diversa da zero nelle ore notturne), a 0 i valori nelle ore tra il tramonto e l'alba. Per l'ottenimento delle coordinate geografiche delle stazioni meteorologiche (latitudine e longitudine) si è utilizzato il servizio on line dell'NGA (National Geospatial intelligence Agency) disponibile al seguente link:

### 3. Correzione e completamento dei dati acquisiti ed importati nel DataBase

---

<http://gnswww.nga.mil/geonames/GNS/index.jsp>

I valori di latitudine e longitudine così ottenuti sono stati inseriti nel Data Base. Per il calcolo dell'ora di tramonto e alba si è utilizzato il servizio online dell'Astronomical Application Department dell'U.S. Naval Observatory disponibile al seguente link:

[http://aa.usno.navy.mil/data/docs/RS\\_OneYear.html](http://aa.usno.navy.mil/data/docs/RS_OneYear.html)

Non avendo a disposizione informazioni relative alla convenzione di orario per i rilevamenti, si è supposto che tutte le rilevazioni fossero riferite all'ora solare.

#### 3.4.2 Approssimazione tramite spline

Una volta forzati a zero i valori notturni della radiazione solare si è provveduto a ricostruire le variabili di interesse.

Il programma "spline8\_mod.exe", che implementa l'algoritmo per la chiusura delle lacune 1 a 5 ore mediante l'uso delle spline, è stato scritto in linguaggio fortran90 e successivamente compilato in ambiente windows; esso necessita l'input dei seguenti file, uno per ogni variabile che si intende approssimare:

- 1- File dei dati originali (dati reali compresi i valori mancanti identificati col valore -999); nel file di testo, ad ogni rilevamento sia esso mancante che effettivo, corrisponde una riga; i dati devono avere il seguente tracciato:

"giorno"/"mese"/"anno";"ora";"valore"

con i seguenti formati:

giorno → gg

mese → mm

anno → aaaa

ora → hh in formato 24 ore

Il "valore" conterrà il valore effettivo del rilevamento oppure -999 se il rilevamento è mancante.

- 2- File dei dati effettivi (dati reali che non comprendono i dati mancanti). Questo file contiene una riga per ogni rilevamento effettivo presente nel file descritto al punto 1; una riga di tale file sarà composta nel seguente modo:

"posizione";"valore"

dove per "posizione" si intende il numero della riga del file descritto al punto 1 in cui si trova il rilevamento in esame, per "valore" si intende invece il valore effettivo del rilevamento che si trova alla riga "posizione" del file descritto al punto 1.

- 3- File di identificazione delle lacune (file che per ogni dato mancante appartenente ad una lacuna di lunghezza da 1 a 5 ore, contiene il numero della riga in cui è memorizzato all'interno del file dei dati originali). Una riga di questo file è composta nel seguente modo:

"giorno"/"mese"/"anno";"ora";"posizione"

### 3. Correzione e completamento dei dati acquisiti ed importati nel DataBase

---

con i formati di cui al punto 1, dove "posizione" conterrà il numero della riga del file descritto al punto 1 nel quale si trova il rilevamento mancante.

Elaborando i tre file suddetti, il programma "spline8\_mod.exe" produce i due seguenti files per ogni variabile che è stata approssimata:

- file delle lacune ricostruite: file che, per ogni lacuna contenuta nel file descritto al punto 3 precedente, contiene il valore con cui è stata coperta la lacuna. Il file conterrà una riga per ogni lacuna precedentemente presente nel file descritto al punto 3 e tale riga avrà la seguente struttura:

"giorno"/"mese"/"anno";"ora";"valore\_ricostruito"

con i formati di cui al punto 1 precedente, dove "valore\_ricostruito" è semplicemente il valore ricostruito da "spline8\_mod.exe" per il rilevamento mancante in esame;

- file dei valori ricostruiti: file analogo al file dei dati originali dove, per ogni lacuna contenuta nel file delle lacune ricostruite, viene sostituito il valore -999 con quello calcolato dall'algoritmo.

Il procedimento per portare a termine il calcolo dei valori mancanti per lacune di 1-5 ore viene descritto qui di seguito.

Dapprima, per ogni stazione vengono generati i file da dare in input al programma fortran "spline8\_mod.exe".

Questo compito è eseguito dallo script "generaz\_file\_spline.php" al quale bisogna passare in input il numero delle stazioni di cui si vogliono chiudere le lacune da 1 a 5 ore (è inoltre possibile eseguire il calcolo per tutte le stazioni immettendo come input il valore "-1"); lo script si occuperà di estrarre i dati dal database per le 8 variabili ritenute significative (radiazione solare, temperatura, umidità relativa, direzione del vento e velocità del vento, pressione atmosferica, copertura nuvolosa e soleggiamento) e di creare una directory di lavoro per ogni stazione nella quale metterà il file dei dati originali, il file delle lacune e il file dei rilevamenti delle 8 variabili di interesse (si vedano punti descritti precedentemente). Inoltre, all'interno di tale directory viene copiato il file "spline8\_mod.exe" che approssimerà i dati mediante il metodo delle spline; infine viene aggiornato il file "spline3.bat", che, al termine dell'esecuzione dello script "generaz\_file\_spline.php", verrà utilizzato per lanciare in sequenza "spline8\_mod.exe" per ogni stazione.

Un discorso specifico va fatto per la variabile che identifica la direzione del vento; infatti per la natura del rilevamento, si è deciso di dividere la direzione del vento, espressa in gradi, nelle due componenti x e y e di gestire ciascuna componente come se fosse una variabile a se stante; sono cioè stati generati file dei rilevamenti, dei rilevamenti effettivi e delle lacune distinte per la componente x e la componente y della direzione. Si è poi operata la ricostruzione delle componenti ed infine si calcolata la direzione risultante.

Terminata l'esecuzione di "generaz\_file\_spline.php", si dovrà lanciare il file "spline3.bat",

### 3. Correzione e completamento dei dati acquisiti ed importati nel DataBase

---

che non farà altro che lanciare in sequenza i file "spline8\_mod.exe" per ogni stazione selezionata al passo precedente.

Una volta che il programma "spline8\_mod.exe" ha terminato la sua esecuzione per ogni stazione selezionata (vedi punto precedente), verranno prodotti, per ogni variabile, il file con i soli valori ricostruiti e il file che conterrà tutti i rilevamenti con i valori mancanti approssimati.

Infine, sarà necessario lanciare lo script "copia\_dati\_spline.php" che si occupa di prendere tali file dalla directory associata alla stazione e di trasferire i dati ricostruiti all'interno del database centrale, preoccupandosi di aggiornare correttamente i valori dei record dei rilevamenti ricostruiti e delle lacune ricostruite; tale compito viene eseguito sovrascrivendo il campo "valore" dei rilevamenti mancanti che sono stati ricostruiti con il loro nuovo valore preso dal file che contiene tutti i rilevamenti e modificando il valore del campo "flag\_tipo" che identifica la fonte del dato (rilevato o ricostruito); tale campo viene settato a "ric\_spline". Si veda nel seguito per ulteriori dettagli sul significato del campo.

Per quanto riguarda la direzione del vento, lo script prende i rilevamenti della componente x e di quella y, li combina in modo da riottenere la misura in gradi, ed eventualmente, se la misura originaria era mancante, viene effettuata la copia del nuovo valore sul database e l'aggiornamento della lacuna a cui il rilevamento mancante ricostruito apparteneva.

#### 3.4.3 Approssimazione tramite interpolazione lineare per lacune da 6 a 24 ore

Il metodo di approssimazione tramite interpolazione lineare viene realizzato dallo script "interp\_lineare\_buchi\_6\_24.php" scritto in linguaggio php.

Innanzitutto bisogna rilevare che la variabile della direzione del vento non è stata presa in considerazione nello svolgimento di questa operazione in quanto si è constatato che, data la variabilità estrema della grandezza e la sua bassa correlazione con i dati contigui, una ricostruzione di una sequenza di più di 5 ore di dati mancanti avrebbe avuto poco senso in termini di realistica dei risultati.

Lo script prende in input il numero della stazione per la quale si vogliono tentare di chiudere i buchi da 6 a 24 ore (è anche possibile, dando input il codice "-1" effettuare il calcolo su tutte le stazioni presenti nel database) e tenta, per le 7 variabili di interesse restanti (radiazione solare, temperatura, umidità relativa, velocità del vento, pressione atmosferica, soleggiamento e copertura nuvolosa) di chiudere il maggior numero possibile di buchi da 6 a 24 ore usando l'algoritmo descritto precedentemente.

Data una stazione, lo script interroga il database restituendo tutte le lacune di durata da 6 a 24 ore, di tutte le variabili di interesse, che sono i candidati alla chiusura e li memorizza in un array; analogamente, per la stazione in esame, memorizza in un altro array

tutti i rilevamenti di tutte le variabili di interesse compresi i dati mancanti.

Per ogni lacuna memorizzata nell'array delle lacune, individua i rilevamenti corrispondenti nell'array dei rilevamenti e va alla ricerca, per 3 giorni precedenti la prima sequenza completa di valori reali che corrisponda alle stesse ore della lacuna in esame; analogamente viene ricercata tale sequenza nei 3 giorni immediatamente successivi a quello della lacuna. Se viene trovata almeno una delle due sequenze ricercate, la sequenza viene approssimata secondo quanto descritto dall'algoritmo, altrimenti si passa all'esame della sequenza successiva senza modificare le informazioni presenti nel data base relative ai dati mancanti e alle lacune. Se è possibile anche eliminare il trend lineare e quindi chiudere il buco in esame, vengono aggiornati sul data base i valori dei rilevamenti mancanti (" -999") con i nuovi valori approssimati, calcolati secondo quanto descritto precedentemente e viene aggiornato il campo "flag\_tipo" di tali rilevamenti che viene impostato su "ric\_int.breve"; inoltre viene aggiornato il record della tabella dei buchi che indicava l'inizio e la fine del buco appena chiuso. Tale aggiornamento consiste nell'impostare il campo "status" del record relativo al buco chiuso con il valore "closed". Se invece non è possibile rimuovere il trend lineare sia a destra che a sinistra, non viene aggiornata nessuna informazione sul database e si passa all'esame della lacuna successiva<sup>1</sup>.

#### 3.4.4 Approssimazione tramite interpolazione lineare per lacune da 25 a 72 ore

L'ultimo passo nel ripristino dei dati mancanti consiste nel tentativo di chiudere le sequenze di rilevamenti mancanti di durata da 25 a 72 ore. Tale compito è eseguito dallo script "interp\_lineare.buchi\_25\_72.php", anch'esso scritto in linguaggio php.

Lo script prende in input la stazione per cui si vogliono tentare di chiudere le lacune e le variabili per le quali si vuole tentare la chiusura. Successivamente vengono creati due array, uno contenente la lista delle lacune da chiudere per la variabile e la stazione in esame e l'altro contenente la sequenza temporale dei rilevamenti memorizzati per la stazione e la variabile in esame. Quindi, per ogni lacuna estratta, ci si posiziona nell'array dei rilevamenti, sul primo rilevamento valido antecedente la lacuna e si va alla ricerca di una sequenza completa di 25 ore di rilevamenti validi antecedente la lacuna, allontanandosi dalla data di inizio della lacuna di al più 72 ore. La stessa cosa viene fatta con il primo rilevamento valido successivo alla lacuna, ricercando la sequenza di 25 ore consecutive nei giorni successivi la fine della lacuna. Una volta trovate le due sequenze, vengono calcolati i valori da assegnare ai rilevamenti mancanti secondo quanto specificato precedentemente. Se una delle due sequenze non viene trovata, si controlla che quella valida si trovi ad un numero di ore di distanza dalla lacuna pari a 0; se ciò accade la sequenza

---

<sup>1</sup>N.B.: lo script chiude le lacune da 6 a 24 ore; quindi, se la stazione effettua delle registrazioni orarie delle variabili, con "interp\_lineare.buchi\_6\_24.php" si potranno ricostruire da 6 a 24 rilevamenti mancanti consecutivi; nel caso la stazione effettui registrazioni triorarie, mediante lo script sarà possibile approssimare solamente sequenze che vanno da un minimo di 2 ad un massimo di 8 rilevamenti mancanti

### 3. Correzione e completamento dei dati acquisiti ed importati nel DataBase

viene copiata nelle celle dell'array che contenevano i rilevamenti mancanti, altrimenti la lacuna non può essere chiusa e si procede all'esame della lacuna seguente.

Successivamente si procede all'eliminazione del trend lineare da destra e da sinistra. Se tale operazione è possibile, allora i nuovi valori calcolati vengono memorizzati nel database e il record che conteneva la lacuna attualmente in esame viene aggiornato settando il campo "status" con il valore "closed", altrimenti si passa all'esame della lacuna successiva senza effettuare operazioni sul database.

Inoltre se la lacuna viene chiusa, vengono anche aggiornate tutte le rilevazioni mancanti settandone il valore con il nuovo valore ricostruito e modificandone il valore del campo "flag\_tipo" che viene impostato su "ric\_int\_lunga".

## Capitolo 4

# Generazione dei Test Reference Year

### 4.1 Metodologia per la generazione dei TRY

Come evidenziato nel Capitolo 1, il metodo scelto per la generazione dei TRY è quello sviluppato dal Sandia National Laboratories, denominato TMY. Di seguito si espone la procedura generale per l'estrazione dell'anno tipo dalla serie poliennale, e nei paragrafi seguenti viene analizzata, in dettaglio, la metodologia specifica per tipologia di applicazione.

In base ad un'analisi della qualità dei dati risultanti dopo la chiusura dei buchi, si sono selezionate le stazioni che risultavano avere la serie storica sufficientemente lunga ed il numero minore di dati mancanti per la corretta generazione dei TRY. La metodologia scelta per il processo di selezione dei TRY si articola in due passi:

- *Step 1*: basato sul calcolo della statistica di Finkelstein-Schafer;
- *Step 2*: basato sul confronto della media e mediana mensili, a breve e lungo termine.

Innanzitutto, per ciascun mese dell'anno viene costruita la funzione di distribuzione cumulativa (CDF) di alcuni indici giornalieri, relativi a ciascun parametro che entrerà nel criterio di selezione. Per esempio nel caso della generazione del "TRY solare-termico" (per le altre tipologie di TRY la procedura è del tutto analoga), il primo passo da seguire è il calcolo della media, del massimo, del minimo e del range giornalieri per le variabili di temperatura, umidità e velocità del vento; mentre per la radiazione solare totale verrà calcolata la somma giornaliera di tutti i valori orari. In tale modo abbiamo 13 parametri di cui bisogna calcolare la CDF mensile e poliennale. La CDF è una funzione sempre positiva definita, per le variabili aleatorie discrete, come:

$$CDF(n) = \sum_{k=1}^n P_k \quad (4.1)$$

dove  $P_k$  è la probabilità relativa alla variabile aleatoria discreta  $x_k$ . Si consideri, per esempio, la variabile "somma giornaliera della radiazione solare,  $R_g$ " e si voglia calcolare la CDF poliennale per tale variabile (per le altre variabile e per la CDF mensile il metodo è del tutto analogo), relativa al mese di Gennaio.

#### 4. Generazione dei Test Reference Year

---

Una volta trovato il valore massimo di  $R_g$ , fra tutti gli  $R_g$  dei mesi di Gennaio della serie storica, e la sua parte intera  $IR_g$ , si valuta lo step come:

$$STP = \frac{IR_g + 1}{30}. \quad (4.2)$$

Identificati i vari bin, definiti come:

$$Bin = k \cdot STP, k = 0, 1, \dots, 30,$$

sono contate le misure  $R_g$  minori di ciascun bin. Dividendo tale numero per la popolazione (cioè il numero totale di misure che sarà dato, se non ci sono giorni mancanti nella serie, da  $31 \cdot NA$ , dove  $NA$ = numero degli anni formanti la serie storica) si ottiene il valore della CDF poliennale per ogni bin, relativa al mese di Gennaio. Una volta noti i valori delle CDF poliennali e mensili ( $CDF_p, CDF_{m,y}$ ), per ognuno dei tredici indici scelti, si applica la statistica di Finkelstein-Schafer (FS), valutando la somma, su tutti i bin considerati (nella nostra scelta sono 31), dei valori assoluti delle differenze tra la  $CDF_p$  e le  $CDF_{m,y}$  e dividendo, infine, per il numero dei bin:

$$FS_{i,y} = \frac{1}{31} \cdot \sum_{k=1}^{31} |CDF_p(k) - CDF_{m,y}(k)|, \quad (4.3)$$

dove il pedice  $i$  identifica l'indice considerato, e  $y$  identifica l'anno.

Si ottengono quindi, per ogni anno, 13 valori delle FS, che sono sommati, tramite degli opportuni pesi, per ottenere un unico indice che identifica la vicinanza del mese, per ogni anno della serie storica, all'andamento poliennale:

$$WS_y = \frac{1}{13} \sum_{i=1}^{13} WF_i \cdot FS_{i,y}, \quad (4.4)$$

con

$$\sum_{i=1}^{13} WF_i = 1, \quad (4.5)$$

dove  $WF_i$  sono i pesi assegnati a ciascuno dei 13 indici.

I vari mesi di Gennaio verranno così ordinati in ordine crescente, in base al valore di  $WS_y$ , e verranno scelti i primi cinque.

Tale procedimento viene quindi applicato a tutti gli altri mesi restanti.

Dopo la selezione dei cinque mesi in base alla statistica di Finkelstein-Schafer, si procede all'analisi della vicinanza della media e della mediana di ciascuno dei cinque mesi candidati alla media e mediana del lungo termine. Le differenze relative sono calcolate



per uno o due indici considerati particolarmente importanti per l'applicazione energetica per cui si vuole costruire il TRY.

Per esempio, per applicazioni ad impianti solari, i due indici considerati sono la temperatura e la radiazione solare. Prima di tutto, si valutano le medie giornaliere delle variabili considerate. Se per esempio si considera la temperatura, una volta calcolate le medie giornaliere, i giorni di ciascun mese sono ordinati dal più freddo al più caldo in modo tale da poter trovare la media e la mediana per quel mese, relativamente alla variabile considerata. Lo stesso verrà quindi fatto per l'altra variabile scelta e per tutti i cinque mesi candidati.

In tale modo si ottengono, per ciascun mese candidato, 4 indici (media e mediana della prima variabile scelta e media e mediana della seconda variabile scelta). Procedendo in maniera analoga, si calcola la media e la mediana, per il mese in esame, di tutta la serie storica (ottenendo anche in questo caso quattro indici, analoghi ai precedenti).

Quindi si procede al calcolo del valore assoluto della differenza tra il valore calcolato per i cinque anni candidati ed il valore calcolato per tutta la serie storica di questi indici.

A questo punto si rende necessaria una normalizzazione, effettuata dividendo le differenze di ciascun indice per la differenza massima di quell'indice. Per esempio, se le differenze della media della temperatura per i cinque mesi di Gennaio candidati sono 0.7, 1.3, 1.5, 1.6, 1.8 allora si divideranno questi cinque valori per 1.8. Procedendo analogamente per gli indici restanti, si otterranno quattro valori (differenza tra breve e lungo termine delle medie e delle mediane della temperatura e differenza delle medie e mediane della radiazione solare) normalizzati. Di tali valori verrà fatta una somma pesata, con i pesi definiti nello step uno per ciascuna variabile, ed i cinque mesi candidati verranno nuovamente ordinati, in maniera crescente, in base al valore di tale somma (dalla somma più bassa alla più alta). Il primo mese verrà scelto come mese tipico.

L'algoritmo per la parte relativa alla selezione mediante la statistica di Filkestein-Schafer è quello sviluppato dal Prof. Petrakis nell'ambito del progetto PASCOOL, contratto J0U2-CT-0013 [34]. Tale algoritmo è scritto in linguaggio Q-Basic ed è stato opportunamente modificato per renderlo compatibile con il database costruito e per risolvere alcuni problemi che lo rendevano inutilizzabile con i dati acquisiti. Si è quindi provveduto ad inserire i pesi corretti e relativi alle varie tipologie di TRY generabili.

Il programma per la selezione basata sulle medie mediane a breve e lungo termine è stato invece scritto in linguaggio Fortran90 ed è stato compilato in ambiente Linux. Esso calcola la media e mediana a breve e lungo termine per una o più variabili giudicate particolarmente importanti per l'applicazione specifica del TRY da generare, e, procedendo prima ad una loro normalizzazione, le confronta e quindi seleziona il mese giudicato tipico.

Quindi, i mesi scelti sono uniti e posti nel formato richiesto dai programmi per le simulazioni, ed eventuali discontinuità presenti (dovute al passaggio da un mese al successivo, se questi appartengono ad anni diversi) sono eliminate mediante un semplice processo

## 4. Generazione dei Test Reference Year

---

di smooth.

Di seguito si riporta, per ciascuna tipologia di TRY sviluppata:

- il procedimento per la scelta delle variabili da processare ed i loro pesi relativi;
- i test condotti ed i risultati raggiunti.

### 4.2 TRY solare-termico

#### 4.2.1 Metodologia per la generazione del TRY solare-termico

Le variabili scelte per la generazione dei TRY per applicazioni ad impianti solari e per l'analisi di carichi termici di edifici, ed i pesi ad esse associati, sono quelli usati nella creazione dei TMY americani [7].

La Tabella 4.1 mostra le variabili utilizzate nelle due fasi di selezione con i relativi pesi.

VARIABILE	PESI PER LA STATISTICA F-S		PESI PER LA MEDIA-MEDIANA
Temperatura	media	2/24	2/24
	Max	1/24	non usata
	min	1/24	non usata
Radiazione	giornaliera	1/2	1/2
Umidità relativa	media	2/24	non usata
	Max	1/24	
	min	1/24	
Velocità del Vento	media	2/24	non usata
	Max	2/24	
	min	non usata	

**Tabella 4.1:** Variabili utilizzate nelle due fasi di selezione del TRY solare-termico e relativi pesi.

#### 4.2.2 Test di validazione del TRY solare-termico

Le stazioni scelte, in base alla completezza ed alla lunghezza della serie storica disponibile, per validare il TRY solare-termico sono riportate in Tabella 4.2. I test per validare il TRY prodotto si basano sulla simulazione di un impianto solare standard, valutando gli output ottenuti processando la serie storica ed il TRY generato.

STAZIONE	SERIE STORICA	N ° MESI MANCANTI
Belluno	01/03/92-30/09/04	12
Breda di Piave	01/03/92-30/11/04	10
Cavallino (Treporti)	01/03/92-30/11/04	15
Villafranca Veronese	01/07/92-30/11/04	11
Fossalon di Grado	01/01/92-28/02/02	3
Udine	01/01/92-31/01/02	3
Trento Sud	01/02/83-31/05/05	24

**Tabella 4.2:** Stazioni processate per la validazione del TRY solare-termico.

Tale impianto è mostrato in Figura 4.1.

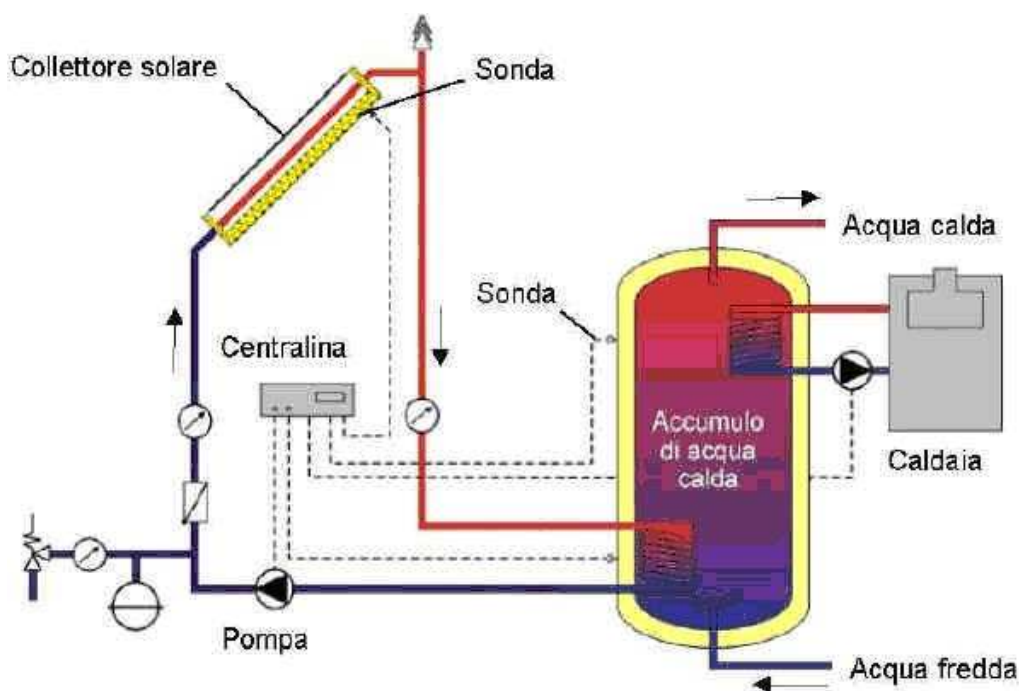


Figura 4.1: Schema dell'impianto solare.

L'impianto solare termico utilizzato per le simulazioni è costituito da 6 collettori solari piani che occupano una superficie di  $15.3 \text{ m}^2$ , uno scambiatore di by pass, un serbatoio d'accumulo in cui viene immagazzinata l'energia solare prodotta, una caldaia a gas naturale con un'efficienza di conversione termica dello 0.79 e che ha un T di setpoint (Temperatura di inizio funzionamento della caldaia) pari a  $50^\circ\text{C}$ , due pompe per garantire la circolazione del fluido e un controllore per mantenere la T all'interno del serbatoio sotto i  $90^\circ\text{C}$  e nei collettori al di sotto dei  $160^\circ\text{C}$ . Con tale modello ci si è calcolati oltre all'energia solare utile, anche l'energia solare termica che nel periodo ottobre-aprile potrebbe essere usata per il riscaldamento degli ambienti interni. Per ottimizzare la produzione solare durante i mesi invernali si sono orientati i collettori a sud e si è scelta un'inclinazione di  $50^\circ$ .

La Tabella 4.3 riporta le caratteristiche tecniche dei collettori solari usati per dimensionare l'impianto solare termico:

Nella Tabella 4.4 si riportano le caratteristiche tecniche dell'accumulatore usato per dimensionare l'impianto solare termico.

Infine, si riporta in Figura 4.2, il TRNSYS DECK FILE costruito per modellare il sopradetto impianto solare che include una serie di componenti.

La Tabella 4.5 contiene la descrizione dei componenti che servono per modellare le prestazioni del sistema energetico.

La Tabella 4.6 riporta i risultati complessivi per le stazioni processate dove la Potenza solare utile è la potenza in uscita dal collettore mentre la potenza solare effettiva è quella

#### 4. Generazione dei Test Reference Year

---

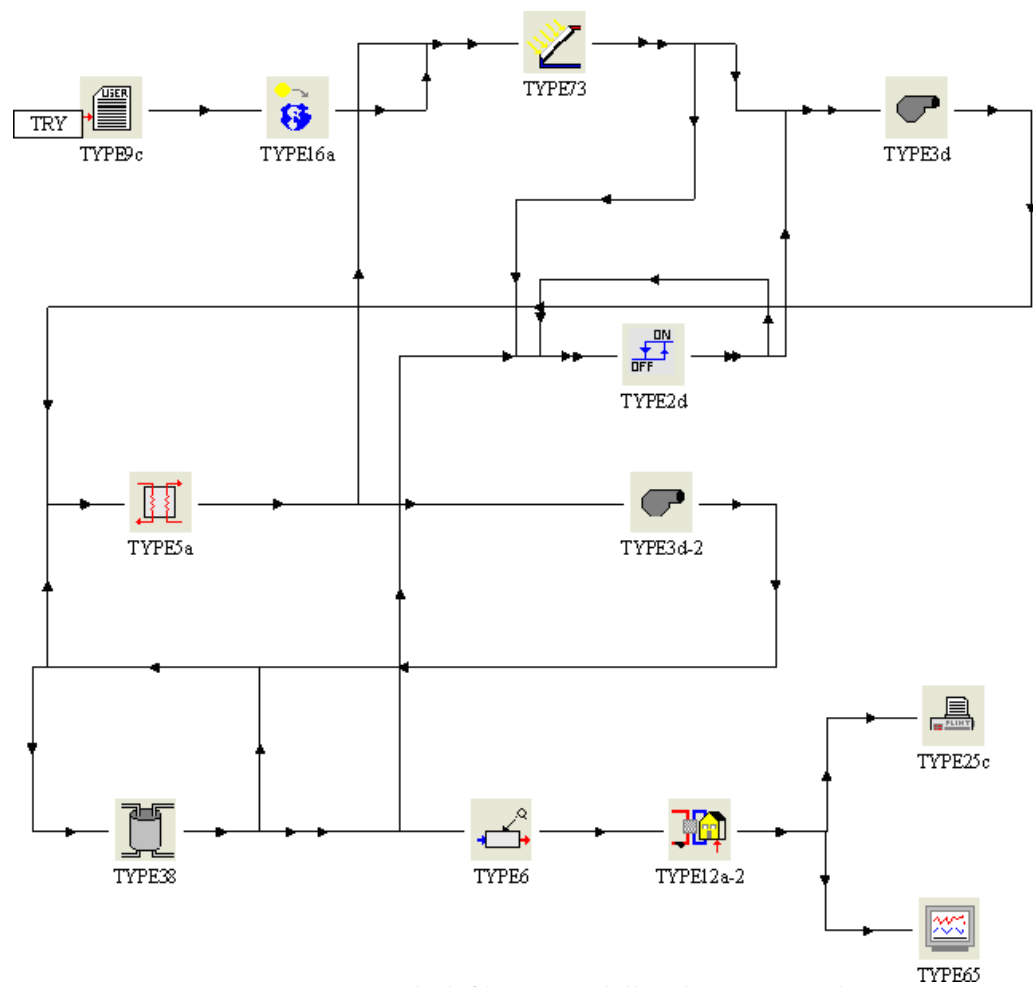


Figura 4.2: TRNSYS deck file per modellare l'impianto solare.

Superficie lorda	2.55 m <sup>2</sup>
Superficie assorbitore	2.26 m <sup>2</sup>
Pressione massima	10 bar
Capacità calore	25 kJ/°K
Fattore di conversione	0.783
Efficienza max del collettore A <sub>1</sub>	3.018 W/(°K m <sup>2</sup> )
Efficienza meno le perdite del collettore A <sub>2</sub>	0.013 W/(°K m <sup>2</sup> )
Temperatura d'arresto a 1000 W/m <sup>2</sup>	180°C
Fattore d'irraggiamento a 50°C	0.89
Assorbimento	95%
Emissione	5%
Portata nominale	40 l/(h m <sup>2</sup> )
Portata minima	30 l/(h m <sup>2</sup> )
Lunghezza	2179 mm
Larghezza	1170 mm
Spessore	107 mm

Tabella 4.3: Caratteristiche del collettore solare.

Volume	1.5 m <sup>3</sup>
Altezza	2 m
Pressione massima ammessa	4 bar
Capacità	1500 l
Massima temperatura ammessa	90°C
Perdite conduttive	0.15 kJ/(h m °K)
Peso	310 kg

Tabella 4.4: Caratteristiche dell'accumulatore.

in uscita dall'impianto.

La Tabella 4.7 mostra per la stazione di Udine la radiazione solare incidente, valutata mediante il TRY, sull'impianto solare-termico, confrontandola con quella poliennale.

Gli scostamenti dall'andamento poliennale della potenza solare incidente e utile sono ottimi. Meno buoni sono i risultati per la potenza solare effettiva, come si evince dalla Tabella 4.6, ma si può concludere che i risultati complessivi sono più che soddisfacenti.

Per quanto riguarda invece l'applicazione al carico termico sensibile, questo è calcolato con un modello che sfrutta il concetto dei "gradi giorno", necessario per mantenere la temperatura nell'ambiente interno tra [20 – 26]°C, per un edificio standard, con i valori di capacità e di coefficiente di scambio termico totale (UA) di seguito riportati:

- Capacità termica dell'edificio [J/°K]: 87297;
- U A [kJ/h°K]: 1080.

La Tabella 4.8 mostra lo scostamento percentuale del carico sensibile dall'andamento poliennale, in sei delle sette stazioni processate.

I risultati ottenuti mediante questo modello sono buoni nel range delle validazioni effettuate negli altri Paesi.

#### 4. Generazione dei Test Reference Year

COMPONENTE	NOME	FUNZIONE
Type 9	Data Reader	Serve per dare i file clima in input al modello
Type 16	Radiation Processor	Calcola e interpola la radiazione solare incidente sui collettori
Type 73	Solar Thermal Collectors	Modella l'impianto solare termico
Type 3	Pump	Il funzionamento della pompa (on/off) è regolato dal valore della funzione di controllo
Type 2	Differential Controller	Genera i valori della funzione di controllo in base ai valori limite (max e min) specificati e al valore di cut-off specificato per la variabile monitorato
Type 5	Heat Exchangers	Modella uno scambiatore di calore a superficie in controcorrente
Type 38	Thermal Storage	Serve per modellare il comportamento della temperatura dell'acqua in un accumulatore stratificato mediante segmenti di fluido di dimensioni variabili
Type 6	Auxiliary Heaters	Modella il comportamento di una caldaia azionata (on/off) mediante una funzione di controllo e in funzione della temperatura di output del fluido
Type 12	Energy Space Load	Serve per stimare il carico sensibile di una struttura mediante i gradi-giorno

**Tabella 4.5:** Componenti dell'impianto solare.

STAZIONE	DELTA % (Potenza solare incidente)	DELTA % (Potenza solare utile)	DELTA % (Potenza solare effettiva)
Belluno	2.2	2.5	4.3
Breda di Piave	0.6	1.3	4.8
Cavallino (Treporti)	1.7	5.1	9.3
Villafranca Veronese	2.3	3.3	8.2
Fossalon di Grado	3.3	3.1	10.0
Udine	2.8	3.5	5.0
Trento Sud	2.7	3.9	6.9

**Tabella 4.6:** Variazione media dei risultati ottenuti con il TRY e quelli ottenuti con la serie poliennale.

#### 4. Generazione dei Test Reference Year

Udine Q Incidente [kWh]											
Gennaio	Febbraio	Marzo	Aprile	Maggio	Giugno	Luglio	Agosto	Settembre	Ottobre	Novembre	Dicembre
1311	1818	1883	2042	2851	2369	2972	3185	2625	1461	1282	1441
1392	2509	2529	2386	2820	2583	2756	3106	1857	1672	1442	1262
1606	1600	2308	2150	2441	2509	3145	3113	2082	2494	1458	
1845		2506	2279	2303	2418	3061	2786	2158	2642	1640	943
1311	2020	2443	2191	2607	2861	2795	2951	2271	1677	1099	1171
1557	2023	2898	2910	2788	2278	2894	2915	3179	2207	1155	1037
1128	2428	2734	1831	2820	2665	2983	3045	2286	1874	1957	1631
1939	2035	2312	2397	2412	2744	2880	2583	2467	1908	1594	1219
1959	1874	2121	2060	2656	3056	2811	3107	2544	1493	909	853
995	1865	1329	2443	2725	2846	2839		1877	1954	1833	1918
1297											
16340	18172	23063	22690	26423	26329	29136	26791	23346	19382	14370	11476
Poliennale valore medio											
1485	2019	2306	2269	2642	2632	2913	2976	2334	1938	1437	1275
TRY											
1311	1889	2320	2283	2664	2665	2967	2936	2274	1861	1427	1259
Delta mensile %											
-11.75	-6.42	0.58	0.63	0.81	1.24	1.83	-1.38	-2.59	-3.98	-0.72	-1.30
Delta annuale %						2,77 %					

Tabella 4.7: kWh incidenti sull'impianto solare nel caso della stazione di Udine.

STAZIONE	DELTA % (HEATING)	DELTA % (COOLING)
Belluno	4.6	11.5
Breda di Piave	8.0	6.2
Cavallino (Treponti)	14.9	9.8
Villafranca Veronese	8.0	10.9
Fossaloni di Grado	6.3	4.8
Udine	8.4	9.2

Tabella 4.8: Scostamento del carico sensibile.

### 4.3 TRY fotovoltaico

#### 4.3.1 Metodologia per la generazione del TRY fotovoltaico

A differenza del caso solare-termico, per il fotovoltaico non esistevano dei pesi già adottati e convalidati. Si è reso necessario, pertanto, determinare i pesi in modo appropriato. L'idea seguita è stata quella di fare delle simulazioni utilizzando il programma di simulazione TRNSYS.

Il procedimento si basa sulla misura delle variazioni percentuali relative apportate alla variabile controllata del modello (indicatore di performance) dagli incrementi/decrementi di ciascuna variabile di input. In sostanza, si è calcolata la variazione indotta nei kWh prodotti dalla variazione di ciascuna variabile. Detta  $E_V(R, T)$  l'energia prodotta dall'impianto, funzione della Radiazione solare  $R$  e della temperatura  $T$ , si è stimato, in questo modo, il valore di  $\frac{\partial E_V / \partial R}{E_V}$ ,  $\frac{\partial E_V / \partial T}{E_V}$ . Per ogni variabile si è tenuto conto del suo "dominio" nel senso che si è imposto un limite "accettabile" (indipendentemente dal sito in analisi) alle sue variazioni così che, per esempio, si è imposto che le variazioni percentuali della  $T$  non portassero la temperatura stessa a eccedere il valore massimo della temperatura mai registrato sulla terra o che la radiazione solare non risultasse a seguito dell'incremento maggiore di quella extraterrestre e così via.

Il "dominio" di incremento/decremento di ciascuna variabile è così stato suddiviso in un uguale numero di intervalli finiti equivalenti. Ricavate le variazioni relative, rispetto all'output ottenuto con il TRY originale senza modifiche (calcolato cioè utilizzando lo stesso peso per la temperatura e la radiazione solare), per ciascun intervallo e variabile, dal valore medio del rapporto tra le variazioni apportate da due variabili si è dedotta l'importanza relativa di una variabile rispetto all'altra. Di seguito si riporta il calcolo dei pesi per il fotovoltaico: variazioni delle variabili d'ingresso portano ad incrementi della variabile d'uscita, come si evince dalla tabella 4.9 che riporta i valori ottenuti per un decremento della temperatura ed un incremento della radiazione solare.

kWh TRY originale			7813.36		
Decremento Temperatura (T)	1.5%	3.0%	4.5%	6.0%	7.5%
kWh prodotti	7990	8169	8347	8524	8702
Variazione relativa %	2.3	4.5	6.8	9.1	11.4
Incremento radiazione (R)	8%	16%	24%	32%	40%
kWh prodotti	8542	9224	9889	10546	11194
Variazione relativa %	9.3	18.1	26.6	35.0	43.3
Rapporto variazione R/T	4.1	4.0	3.9	3.8	3.8

**Tabella 4.9:** Variazioni relative all'output per un impianto fotovoltaico, al variare degli input.

In maniera analoga si valutano le variazioni causate dal un incremento della temperatura ed un decremento della radiazione solare. In questo caso il valore medio del rapporto delle variazioni  $R/T$  sarebbe pari a circa 4 il che significherebbe che la radiazione risulta essere 4 volte più importante della temperatura. Ricavata l'importanza relativa di ciascu-



na variabile rispetto all'altra si è passati a risolvere un sistema costituito da  $n$  equazioni in cui  $n-1$  equazioni sono ricavate dall'uguaglianza tra il rapporto tra i pesi di due variabili e tra le variazioni determinate sull'output dalle variabili d'ingresso (l'importanza relativa di una variabile rispetto all'altra sopra definita) mentre l'ennesima equazione impone la condizione che la somma dei pesi sia pari a uno. Risolvendo simultaneamente questo sistema di equazioni lineari si è ricavato il peso di ciascuna variabile. Il sistema di equazioni risolto per il sistema fotovoltaico è il seguente:

$$\begin{cases} W_R + W_T = 1 \\ W_R - 4.13W_T = 0 \end{cases}$$

da cui si ricava:

$$(4.13 + 1)W_T = 1$$

e quindi i pesi saranno:

$$\begin{cases} W_T = \frac{1}{5.13} \\ W_R = \frac{4.13}{5.13} \end{cases}$$

La Tabella 4.10 riassume le variabili utilizzate nelle due fasi di selezioni degli mesi tipici ed i loro pesi.

VARIABILE	STATISTICA F-S	MEDIA-MEDIANA
Temperatura	media	0.2
Radiazione	giornaliera	0.8
		non usata
		1

**Tabella 4.10:** Variabili utilizzate nelle due fasi di selezione del TRY fotovoltaico e relativi pesi.

### 4.3.2 Test di validazione del TRY fotovoltaico

Analogamente a quanto fatto per la validazione del TRY solare-termico, la validazione della procedura di selezione del TRY fotovoltaico è stata condotta processando le stazioni riportate in Tabella 4.11, che mostra anche la serie storica utilizzata per ciascuna stazione ed il numero di mesi mancanti per ciascuna serie.

Per i test di verifica è stato usato un impianto fotovoltaico grid-connected di Potenza nominale pari a 5.16 kWp, costituito da 24 moduli fotovoltaici e 1'inverter per una superficie complessiva occupata dal campo fotovoltaico di 8,217 m<sup>2</sup>; le prestazioni dell'impianto sono state ottimizzate inclinando i moduli di 30° rispetto all'asse orizzontale e orientandoli a sud.

#### 4. Generazione dei Test Reference Year

STAZIONE	SERIE STORICA	N ° MESI MANCANTI
Belluno	01/03/92-30/11/04	3
Legnaro	01/03/92-30/11/04	8
Breda di Piave	01/03/92-30/11/04	4
Cavallino (Treporti)	01/03/92-30/11/04	7
Villafranca Veronese	01/01/92-30/11/04	3
Quinto Vicentino	01/02/92-30/11/04	4
Fossalon di Grado	01/01/92-30/11/02	2
Puegnago	01/01/93-30/11/04	22
Udine	01/01/92-31/01/02	0
Trento Sud	01/02/83-31/05/05	19

Tabella 4.11: Stazioni processate per la validazione del TRY fotovoltaico.

La Figura 4.3 mostra la tipologia di impianto fotovoltaico utilizzata per i test di validazione.

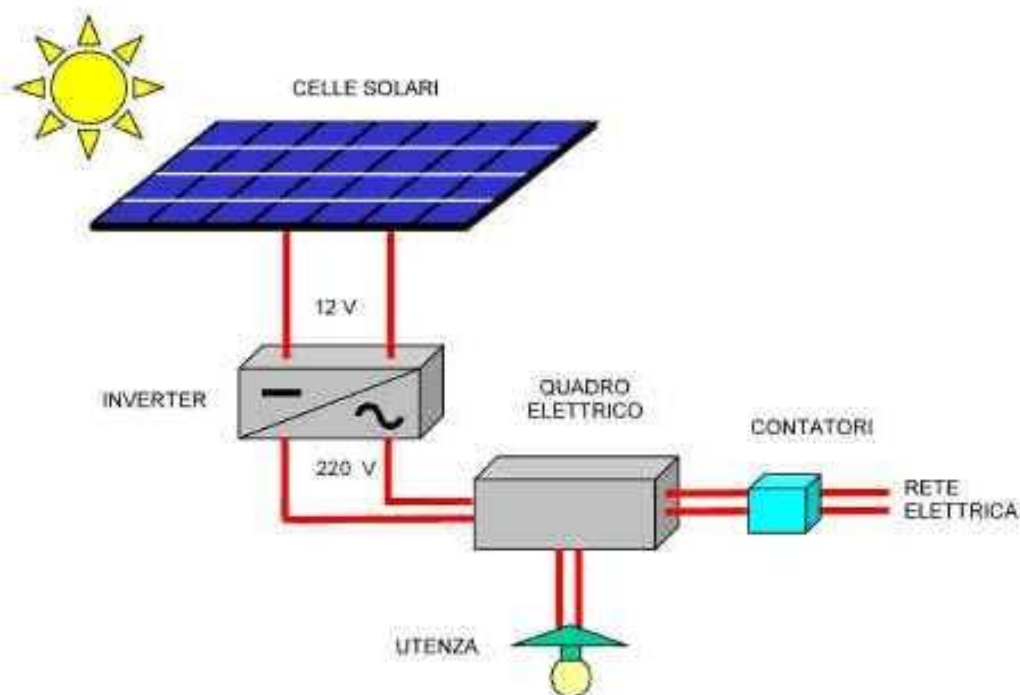


Figura 4.3: Schema dell'impianto fotovoltaico.

La Tabella 4.12 riporta le caratteristiche tecniche dei moduli fotovoltaici utilizzati per dimensionare il campo fotovoltaico.

La Tabella 4.13 riporta invece le caratteristiche tecniche dell'Inverter utilizzato per dimensionare il campo fotovoltaico.

Numero di celle	60
Massima potenza	215 W
Tolleranza (%) / potenza minima	+10/-5
Efficienza del modulo (%)	14.1
Tensione alla massima potenza	30 V
Corrente alla massima potenza	7.17 A
Tensione a vuoto	36.8 V
Corrente di corto circuito	7.75 A
Tensione massima di sistema	930 V
Minima potenza garantita	200 W
Temperatura nominale della cella NOCT	45°C
Lunghezza	1660 mm
Larghezza	990 mm
Spessore	42 mm

**Tabella 4.12:** Caratteristiche tecniche dei moduli (fotovoltaico).

Potenza FV massima consigliata	7000 W <sub>p</sub>
Potenza FV massima consigliata	7000 W <sub>p</sub>
Potenza massima DC	6300 W
Tensione massima d'ingresso DC	600 V
Range di tensione d'ingresso, MPPT	250-600 V
Corrente massima di ingresso	26 A
Ripple di tensione DC	< 10%
Numero massimo di stringhe	4
Potenza massima AC	6000 W
Potenza nominale AC	5500 W
Massimo rendimento	96%
Massimo rendimento	96%
Rendimento Euro-eta	91.5%
Consumo di potenza in funzione	< 7 W
Range temperatura di esercizio	-25/ + 60°C
Dimensioni	500 × 450 × 250 mm
Peso	Circa 63 kg

**Tabella 4.13:** Caratteristiche tecniche dell'Inverter (fotovoltaico).

#### 4. Generazione dei Test Reference Year

La Figura 4.4 riporta il TRNSYS DECK FILE costruito per modellare il sopradetto impianto fotovoltaico che include una serie di componenti.

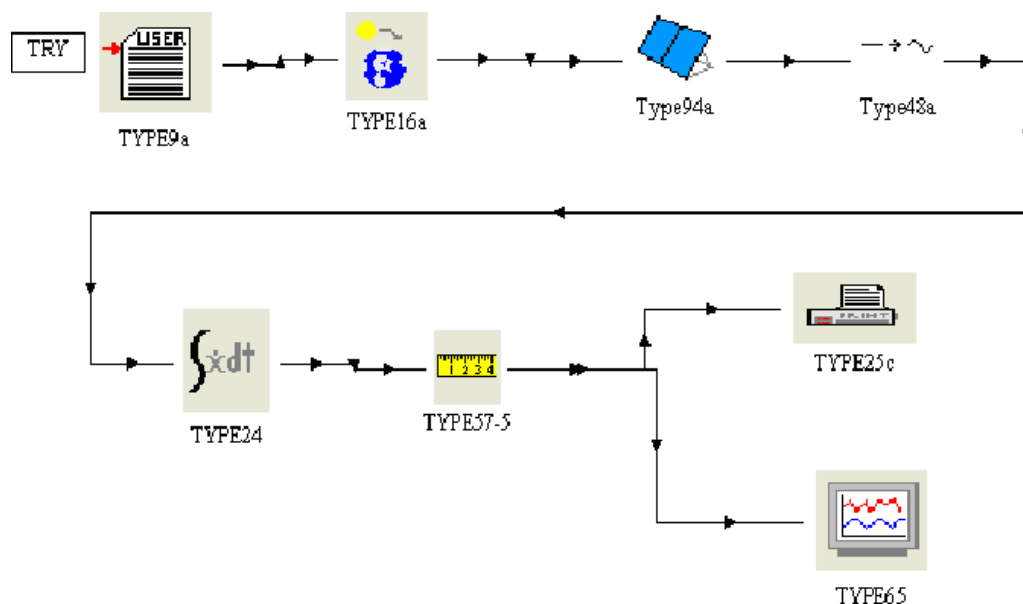


Figura 4.4: TRNSYS deck file per modellare l'impianto fotovoltaico.

La Tabella 4.14 riporta una breve descrizione dei principali componenti usati.

COMPONENTE	NOME	FUNZIONE
Type 9	Data Reader	Serve per dare i file clima in input al modello
Type 16	Radiation Processor	Calcola e interpola la radiazione solare incidente sui moduli del campo fotovoltaico
Type 94	Photovoltaic Panels	Modella il campo fotovoltaico
Type 48	Inverter	Modella l'inverter dell'impianto
Type 25	Printer	Permette di leggere i risultati delle simulazioni
Type 65	On line plotter	Permette di visualizzare graficamente i risultati delle simulazioni
Type 24	Integrator	Integra gli output voluti
Type 57	Unit Conversion Routine	Permette di effettuare la conversione di una grandezza nella qualsivoglia unit� di misura

Tabella 4.14: Componenti principali dell'impianto fotovoltaico.

#### 4. Generazione dei Test Reference Year

I risultati raggiunti sono riportati in sintesi nella Tabella 4.15 per tutte le stazioni processate.

STAZIONE	DELTA ANNUALE%
Belluno	1.9
Breda di Piave	1.8
Cavallino (Treporti)	1.3
Villafranca Veronese	3.1
Fossalon di Grado	4.2
Udine	2.7
Trento Sud	2.7
Puegnago	2.9
Quinto Vicentino	2.2
Legnaro	1.4

**Tabella 4.15:** Variazione media dei risultati ottenuti con il TRY fotovoltaico e quelli ottenuti con la serie poliennale.

La Tabella 4.16 riporta in dettaglio i risultati raggiunti per la stazione di Udine.

kWh Udine											
Gennaio	Febbraio	Marzo	Aprile	Maggio	Giugno	Luglio	Agosto	Settembre	Ottobre	Novembre	Dicembre
374	515	561	626	883	735	901	927	747	418	352	393
364	656	737	728	867	797	842	910	544	465	408	346
415	457	667	659	758	768	952	908	602	685	415	348
489	369	733	694	721	749	923	830	628	709	445	274
360	568	716	664	814	891	863	875	667	476	304	332
420	537	826	893	869	703	895	863	892	616	326	296
308	641	796	568	880	824	906	892	656	523	524	450
507	565	676	726	742	857	876	761	704	541	428	342
529	513	618	622	822	954	873	910	723	419	274	260
280	526	402	752	841	900	870	897	551	545	495	520
373	483	582	622	879	710	905	942	739	447	336	391
4419	5830	7314	7554	9076	8888	9806	9715	7453	5844	4307	3952
Poliennale valore medio											
402	530	665	687	825	808	891	883	678	531	392	359
TRY											
417	528	721	695	816	824	875	871	654	523	406	345
Delta mensile %											
3.95	-0.31	8.47	1.17	-1.10	1.97	-1.81	-1.33	-3.47	-1.63	3.59	-3.92
Delta annuale %						2.73 %					

**Tabella 4.16:** kWh in uscita dal campo fotovoltaico per la stazione di Udine.

Come si evince dai risultati riportati nelle tabelle precedenti, le simulazioni effettuate con la serie poliennale mostrano un ottimo accordo con quelle effettuate utilizzando il TRY. Questo fa pensare che la metodologia usata per la selezione dei TRY e i pesi scelti siano corretti.

## 4.4 TRY eolico

### 4.4.1 Metodologia per la generazione del TRY eolico

Il procedimento per il calcolo dei pesi delle variabili per la selezione del TRY eolico è analogo a quello usato per il fotovoltaico. La Tabella 4.17 riporta le variazioni sull'output per delle variazioni sulle variabili in ingresso. Le variabili scelte per la selezione del TRY per applicazioni ad impianti eolici sono la velocità del vento, ma anche la temperatura e la pressione.

GWh prodotti (TRY originale) = 1.502					
Incremento % velocità vento (V)	10%	20%	30%	40%	50%
GWh prodotti	1.9	2.3	2.8	3.2	3.7
$\Delta\%_1$ (dovuta alla velocità >)	26.9%	54.5%	83.7%	113.5%	144.0%
Incremento % pressione (P)	1.0%	2.0%	3.0%	4.0%	5.0%
GWh prodotti	1.518	1.526	1.534	1.542	1.551
$\Delta\%_2$ (dovuta alla pressione >)	1.1%	1.6%	2.1%	2.7%	3.3%
$\Delta\%_1\Delta\%_2$	24.4	33.4	39.1	42.5	44.12
Decremento % temperatura (T)	1.5%	3.0%	4.5%	6.0%	7.5%
GWh prodotti	1.515	1.519	1.523	1.527	1.532
$\Delta\%_3$ (dovuta alla temperatura <)	0.9%	1.1%	1.4%	1.7%	2.0%
$\Delta\%_1\Delta\%_3$	31.2	48.2	59.4	67.1	73.1

**Tabella 4.17:** Tabella riassuntiva per il calcolo dei pesi per la generazione del TRY eolico.

Dal valore medio del rapporto delle variazioni  $\Delta\%_1\Delta\%_2$  e  $\Delta\%_1\Delta\%_3$  si ricava quanto la velocità del vento è mediamente più importante della pressione e della temperatura (rispettivamente 36.73 e 55.81 nel caso delle variazioni sopra riportate); per il calcolo del valore medio bisogna considerare anche i rapporti delle variazioni % per una diminuzione di velocità e di pressione nel primo caso e per una diminuzione di velocità e aumento di temperatura per quanto riguarda il secondo caso. Ricavata l'importanza relativa di ciascuna variabile rispetto all'altra, si è passati a risolvere un sistema costituito da n equazioni in cui n-1 equazioni sono ricavate dall'uguaglianza del rapporto tra i pesi di due variabili e le variazioni determinate sull'output dalle corrispondenti variabili d'ingresso (l'importanza relativa di una variabile rispetto all'altra sopra definita), mentre l'n-esima equazione impone la condizione che la somma dei pesi sia pari a uno. Quindi avremo un'equazione con il rapporto tra i pesi della velocità del vento e della pressione eguagliata al valore medio di quel rapporto, un'altra con il rapporto tra i pesi della velocità del vento e della temperatura eguagliata al valore medio di quel rapporto e un'altra in cui la somma dei pesi è uguale a uno. Risolvendo simultaneamente questo sistema di equazioni lineari si è ricavato il peso di ciascuna variabile.

$$\begin{cases} W_V + W_P + W_T = 1 \\ W_V - 36.7W_P = 0 \\ W_V - 55.8W_T = 0 \end{cases}$$

La Tabella 4.18 mostra le variabili usate ed i loro pesi.

VARIABILE	STATISTICA F-S		MEDIA-MEDIANA
Velocità del Vento	media	0.96	1
Temperatura	media	0.01	non usata
Pressione	media	0.02	non usata

**Tabella 4.18:** Variabili utilizzate nelle due fasi di selezione del TRY eolico e relativi pesi.

Come si può notare la temperatura e la pressione hanno un peso molto basso, se paragonato a quello della velocità del vento, ma sono state comunque utilizzate nella selezione basata sulla statistica di Filkenstein-Schafer.

#### 4.4.2 Test di validazione del TRY eolico

I test di verifica del procedimento di selezione del TRY eolico sono stati condotti seguendo lo stesso procedimento di validazione adottato per il TRY solare-termico ed il TRY fotovoltaico, sulle sette stazioni riportate in Tabella 4.19

STAZIONE	SERIE STORICA	N ° MESI MANCANTI
Brindisi	01/01/82-30/11/04	4
Napoli Capodichino	01/01/82-31/10/04	53
Roma Ciampino	01/01/82-30/11/04	0
Falconara	01/01/82-30/11/04	97
Genova Sestri	01/01/82-29/02/04	38
Trieste	01/04/88-31/10/04	29
Catania Sigonella	01/01/82-30/11/04	1

**Tabella 4.19:** Stazioni processate per la validazione del TRY eolico.

Lo schema dell'impianto eolico utilizzato è mostrato in Figura 4.5.

L'impianto eolico usato per i test è un impianto grid-connected di potenza nominale pari a 18 MW, costituito da 9 aerogeneratori con rotore tripala; la Tabella 4.20 riporta le caratteristiche tecniche dell'aerogeneratore usato per dimensionare l'impianto eolico.

Potenza nominale [kW]	2000
Altezza del mozzo [m]	64 – 113
Diametro del rotore [m]	71
Numero di pale	3
Velocità di rotazione [rpm]	6 – 21.5
Velocità del vento di accensione [m/s]	2.5
Velocità del vento nominale [m/s]	13.5
Velocità del vento d'arresto [m/s]	28

**Tabella 4.20:** Caratteristiche dell'impianto eolico usato.

La Figura 4.6 riporta il TRNSYS DECK FILE costruito per modellare il sopraddetto impianto eolico che include una serie di componenti.

Una breve descrizione di questi componenti è riportata nella Tabella 4.22.

#### 4. Generazione dei Test Reference Year

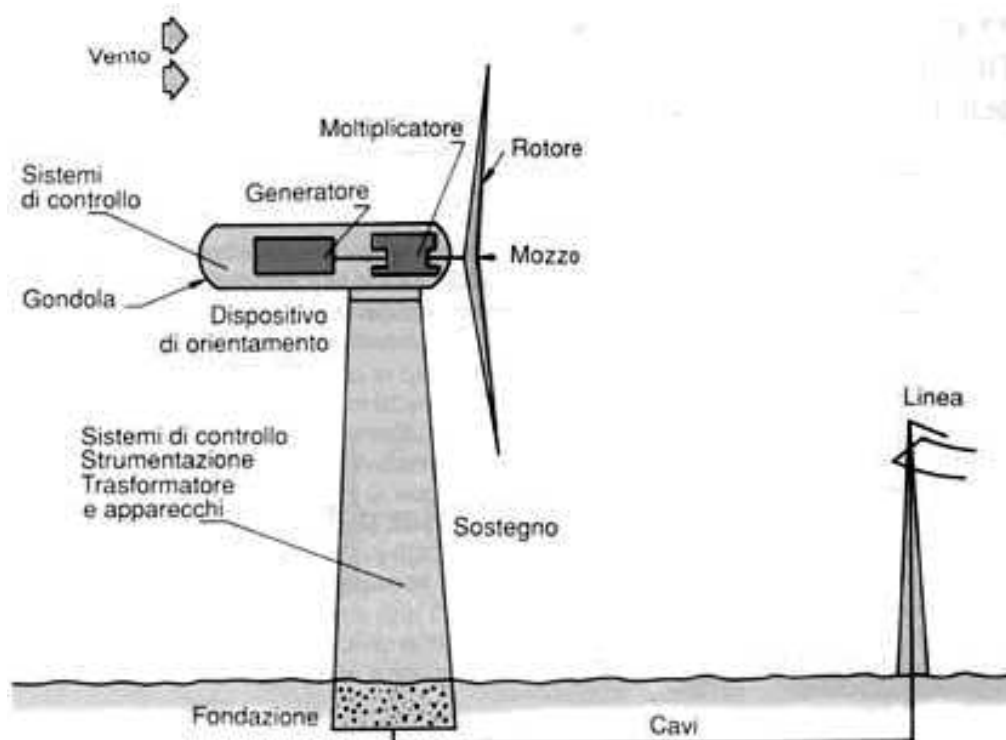


Figura 4.5: Schema dell'impianto eolico.

Velocità del vento [m/s]	Potenza calcolata[kW]	Curva di potenza (Densità dell'aria: $1,225 \text{ [Kg/m}^3\text{]})$
1	0.0	0.0
2	2.0	0.10
3	18.0	0.27
4	56.0	0.36
5	127.0	0.42
6	240.0	0.46
7	400.0	0.48
8	626.0	0.50
9	892.0	0.50
10	1223.0	0.50
11	1590.0	0.49
12	1830.0	0.44
13	1950.0	0.37
14	2050.0	0.31
15	2050.0	0.25
16	2050.0	0.21
17	2050.0	0.17
18	2050.0	0.14
19	2050.0	0.12
20	2050.0	0.11
21	2050.0	0.09
22	2050.0	0.08
23	2050.0	0.07
24	2050.0	0.06
25	2050.0	0.05

Tabella 4.21: Potenza e curva di potenza della turbina.



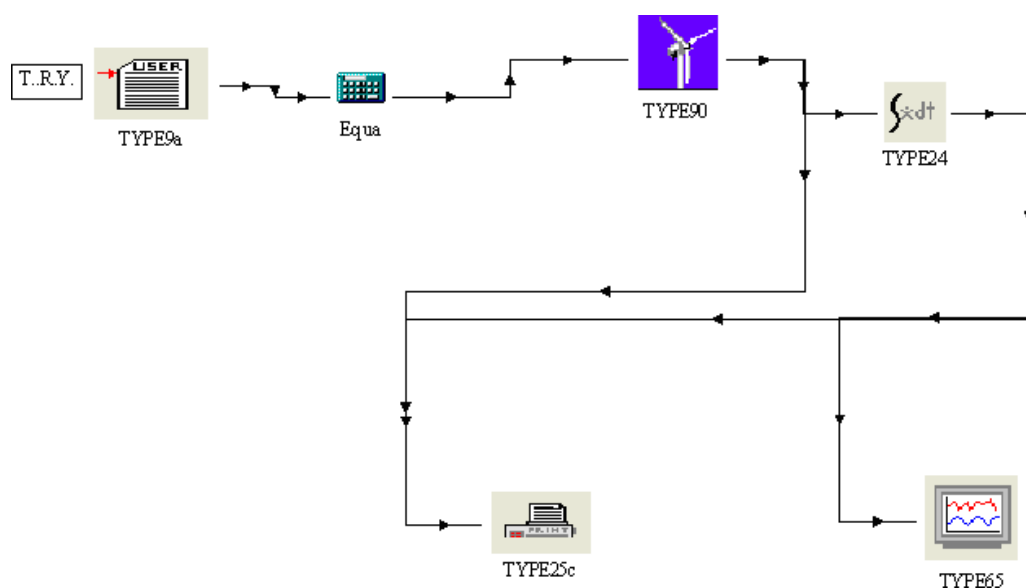


Figura 4.6: TRNSYS deck file per modellare l'impianto eolico.

Componente	Nome	Funzione
Type 9	Data Reader	Serve per dare i file clima in input al modello
Type 90	Wind Turbine	Modella l'impianto eolico

Tabella 4.22: Componenti dell'impianto eolico.

La sintesi dei risultati raggiunti con le simulazioni di tali impianti è riportati in Tabella 4.23.

STAZIONE	DELTA ANNUALE%
Brindisi	4.9
Trieste	2.2
Falconara	0.2
Genova-Sestri	2.6
Roma-Ciampino	10.4
Catania-Sigonella	7.7
Napoli-Capodichino	1.7

Tabella 4.23: Variazione media dei risultati ottenuti con il TRY eolico e quelli ottenuti con la serie poliennale.

Un esempio di risultati completi è dato in Tabella 4.24, dove si riportano i risultati completi per la stazione di Genova.

I risultati delle simulazioni mostrano l'ottimo accordo tra le simulazioni condotte utilizzando la serie storica e quelle condotte utilizzando il TRY.

#### 4. Generazione dei Test Reference Year

MWh Genova											
Gennaio	Febbraio	Marzo	Aprile	Maggio	Giugno	Luglio	Agosto	Settembre	Ottobre	Novembre	Dicembre
1.944	1.416	1.184	0.514	0.416	0.428	0.445	0.473	0.812	1.307	1.168	1.338
0.553	1.057	0.658	0.867	0.697	0.217	0.127	0.392	0.649	0.711	1.642	1.638
1.292	1.22	0.951	0.595	0.852	0.32	0.315	0.272	0.784	1.611	1.934	1.847
1.852	1.338	1.388	1.02	0.607	0.608	0.447	0.441	0.547	1.237	1.909	1.077
1.62	2.189	1.63	1.403	0.604	0.379	0.704	0.618	0.618	1.3	1.547	1.203
2.015	1.557	1.032	0.672	0.695	0.746	0.644	0.484	0.579	1.618	1.432	1.527
2.04	1.252	0.926	0.489	0.945	0.405	0.491	0.563	0.426	1.18	2.021	0.876
1.379	0.988	0.776	1.242	0.466	0.553	0.398	0.425	0.775	0.6	2.187	
1.756	0.854	0.896	0.647	0.279	0.761	0.803	0.885	0.57	1.695	1.698	2.018
2.131	1.585	1.067	0.845	0.315	0.65	0.401	0.344	1.053	1.471	1.312	1.495
1.999	1.022	1.051	1.061	0.909	0.827	0.572	0.741			1.059	
1.409	1.518	0.759	0.661	0.351	0.173	0.281	0.548	1.295	2.02	1.923	1.184
1.509	1.363	0.604	0.729	0.888	0.534	0.408	0.476	1.091	1.505	0.828	1.256
1.243	0.866	1.405	0.755	0.44	0.329	0.394	0.696	0.733		1.849	2.601
2.638	1.62	1.246	0.379	0.944	0.847	0.94	0.517	0.623	1.08		
	1.015		0.494	1.112	0.668	0.313	0.449	0.804	1.248	1.867	1.478
1.556	0.965	0.894	1.442	0.534	0.433	0.387	0.656	0.614	0.923	1.987	1.559
	0.611	0.918	0.97		0.284	0.509	0.502	0.681	0.349	1.567	1.908
1.342	1.319	0.861			0.491	0.522	0.504	0.456	0.746	1.259	1.232
1.207	1.25	0.474	1.02	0.698	0.269	0.557	0.51	0.647	1.27	1.889	2.161
1.557	1.212										
Poliennale valore medio											
1.634	1.248	0.985	0.832	0.653	0.496	0.508	0.525	0.724	1.215	1.636	1.553
TRY											
1.509	1.054	0.893	1.018	0.695	0.531	0.387	0.449	0.775	1.246	1.687	1.457
Delta mensile %											
-7.66	-15.52	-9.33	23.33	6.54	7.00	-23.89	-14.47	7.01	2.57	3.15	-6.16
Delta annuale %						2.56 %					

Tabella 4.24: GWh in uscita dall'impianto eolico per la stazione di Genova.

## 4.5 TRY ambientale

### 4.5.1 Metodologia per la generazione del TRY ambientale

La scelta delle variabili per la generazione del TRY ambientale è avvenuta tramite incontri con esperti del settore, analizzando i modelli usati per applicazioni ambientali ed, in particolare, per la diffusione di inquinanti in atmosfera. Il modello Gaussiano è stato scelto come modello di riferimento per il suo largo utilizzo in simulazioni di questo tipo. In tale modello le variabili meteorologiche utilizzate sono:

- temperatura dell'aria,
- velocità e direzione del vento,

insieme alle variabili derivate:

- classi di stabilità di Pasquill-Gifford,
- mixing height.

Per la valutazione delle classi di stabilità e delle mixing height è necessario conoscere la radiazione solare globale e la copertura nuvolosa nelle ore notturne. Dato che la copertura nuvolosa è un dato poco rilevato nelle stazioni meteorologiche, sono stati scelti tre indici per il processo di selezione. Essi sono:

- temperatura media giornaliera, T,
- radiazione solare globale, R,

- velocità media giornaliera del vento,  $W$ .

Usando un procedimento di confronto a coppie [40][41], il gruppo di esperti ha determinato il peso di ciascun indice, cioè l'importanza relativa di ogni variabile, dando un punteggio, da uno a dieci, riportati in Tabella 4.25.

	VELOCITÀ DEL VENTO	RADIAZIONE	TEMPERATURA
VELOCITÀ DEL VENTO	1	2	10
RADIAZIONE		1	5
TEMPERATURA			1

Tabella 4.25: Importanza relativa delle variabili per la selezione del TRY ambientale.

Il valore 10, per esempio, significa che gli esperti hanno considerato la velocità del vento dieci volte più importante della temperatura dell'aria  $T$ . I valori riportati in Tabella 4.25 possono essere convertiti in un sistema di equazioni lineari, dove  $W_W$ ,  $W_T$  e  $W_R$  rappresentano rispettivamente i pesi relativi alla velocità del vento, alla temperatura ed alla radiazione solare:

$$\begin{cases} W_W = 2 \cdot W_R \\ W_W = 10 \cdot W_T \\ W_R = 5 \cdot W_T \end{cases}$$

In aggiunta, vi è l'ovvia condizione:  $W_W + W_T + W_R = 1$

Risolvendo il sistema suddetto si ricavano i pesi per ciascun indice, che sono riportati in Tabella reftab25.

VARIABILE	STATISTICA F-S		MEDIA-MEDIANA
Velocità del Vento	media	10/16	1
Temperatura	media	1/16	non usata
Radiazione solare	giornaliera	5/16	non usata

Tabella 4.26: Variabili utilizzate nelle due fasi di selezione del TRY ambientale e relativi pesi.

#### 4.5.2 Test di validazione del TRY ambientale

Per la validazione della procedura di selezione dei TRY ambientali sono state processate le seguenti stazioni:

- San Michele (TN) (longitudine 45;55 N, latitudine 11;15 E, altezza sul livello del mare 205 m),
- Trento (longitudine 46;04 N, latitudine 11;08 E, altezza sul livello del mare 185 m),
- Arco (TN) (longitudine 45;55 N, latitudine 10;53 E, altezza sul livello del mare 91 m),
- Belluno (longitudine 46;10 N, latitudine 12;44 E, altezza sul livello del mare 396 m),
- Cascine (FI) (longitudine 43;47 N, latitudine 11;13 E, altezza sul livello del mare 42 m),

#### 4. Generazione dei Test Reference Year

---

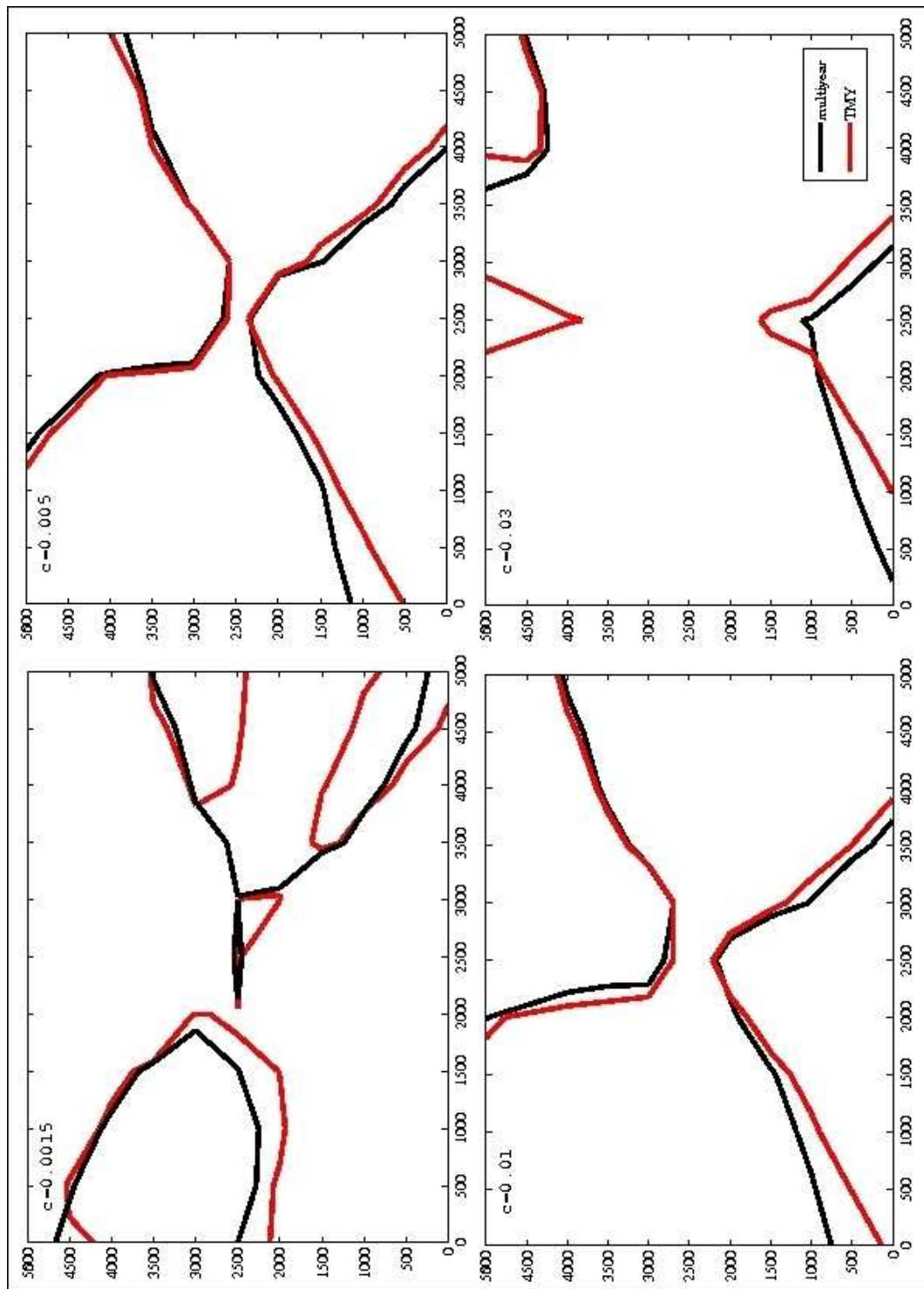
- Ala (TN) (longitudine 45;45 N, latitudine 11;00 E, altezza sul livello del mare 165 m).

I test sono stati effettuati comparando due simulazioni di gas in atmosfera differenti, utilizzando per entrambe il modello Gaussiano di diffusione. La prima simulazione è stata effettuata processando il TRY prodotto e la seconda utilizzando la serie storica da cui il TRY è stato generato. In entrambi i casi è stata simulata la diffusione in atmosfera di un inquinante ( $NO_x$ ) prodotto da una sorgente puntiforme con le seguenti caratteristiche:

- Tasso di emissione: 54.6 g/s,
- Altezza del camino: 60 m,
- Temperatura di uscita dei fumi: 357 °K,
- Velocità di uscita dei fumi: 18.3 m/s,
- Diametro del camino: 9.7 m.

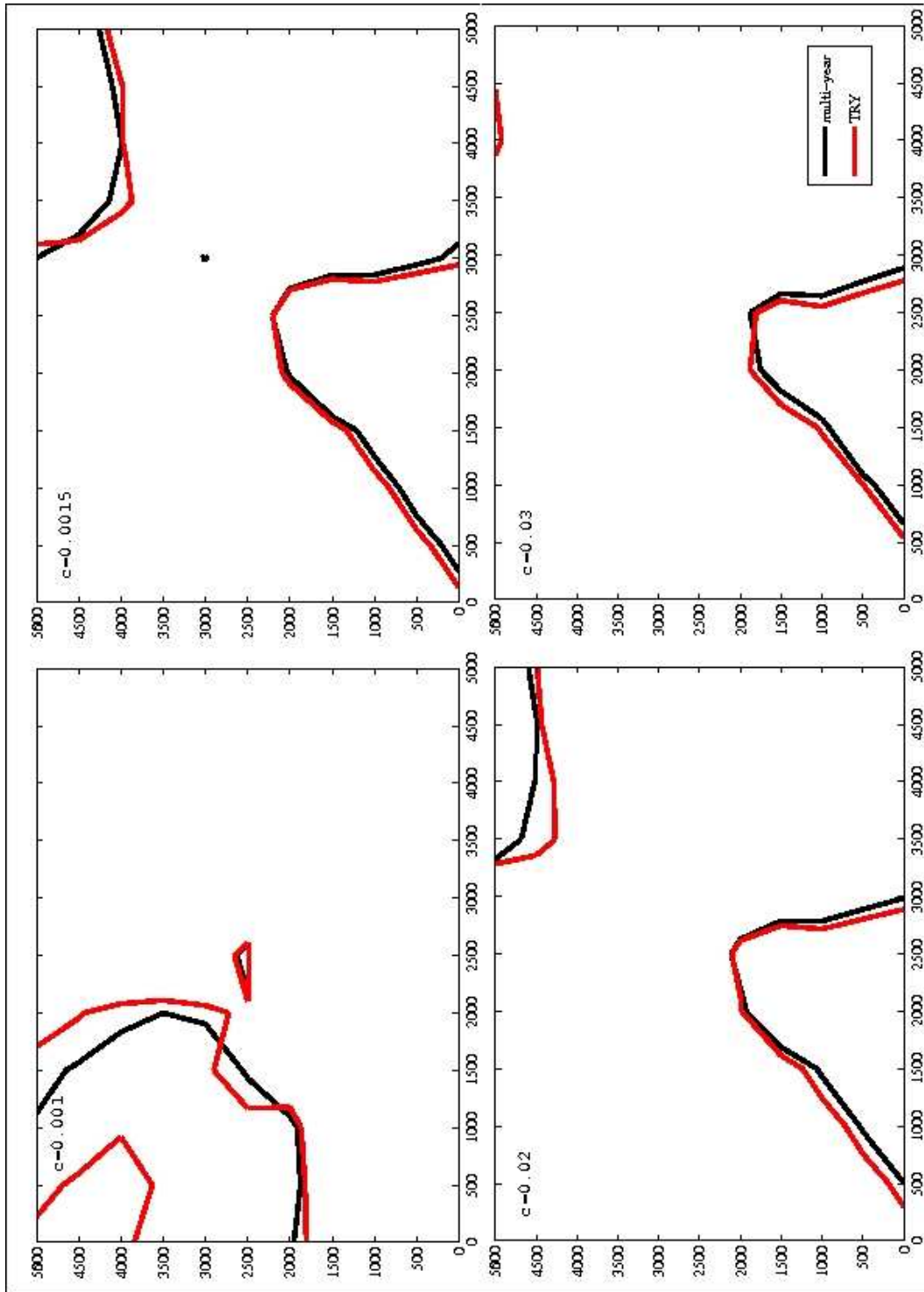
La sorgente è posizionata al centro di una griglia cartesiana di 121 recettori equamente spazati di 500 metri l'uno dall'altro. Il terreno è considerato piatto con caratteristiche rurali. L'output considerato per valutare l'affidabilità dei risultati ottenuti usando i TRY è la concentrazione media di inquinante in ciascun recettore.

Per avere una prima idea sui risultati delle due simulazioni - TRY vs serie storica - sono state plottate le isolinee relative ad alcune concentrazioni medie orarie. Di seguito si riportano le figure relative alle sei stazioni processate. È facile notare come vi sia un ottimo accordo tra le concentrazioni valutate usando il TRY e quelle ottenute processando la serie storica.

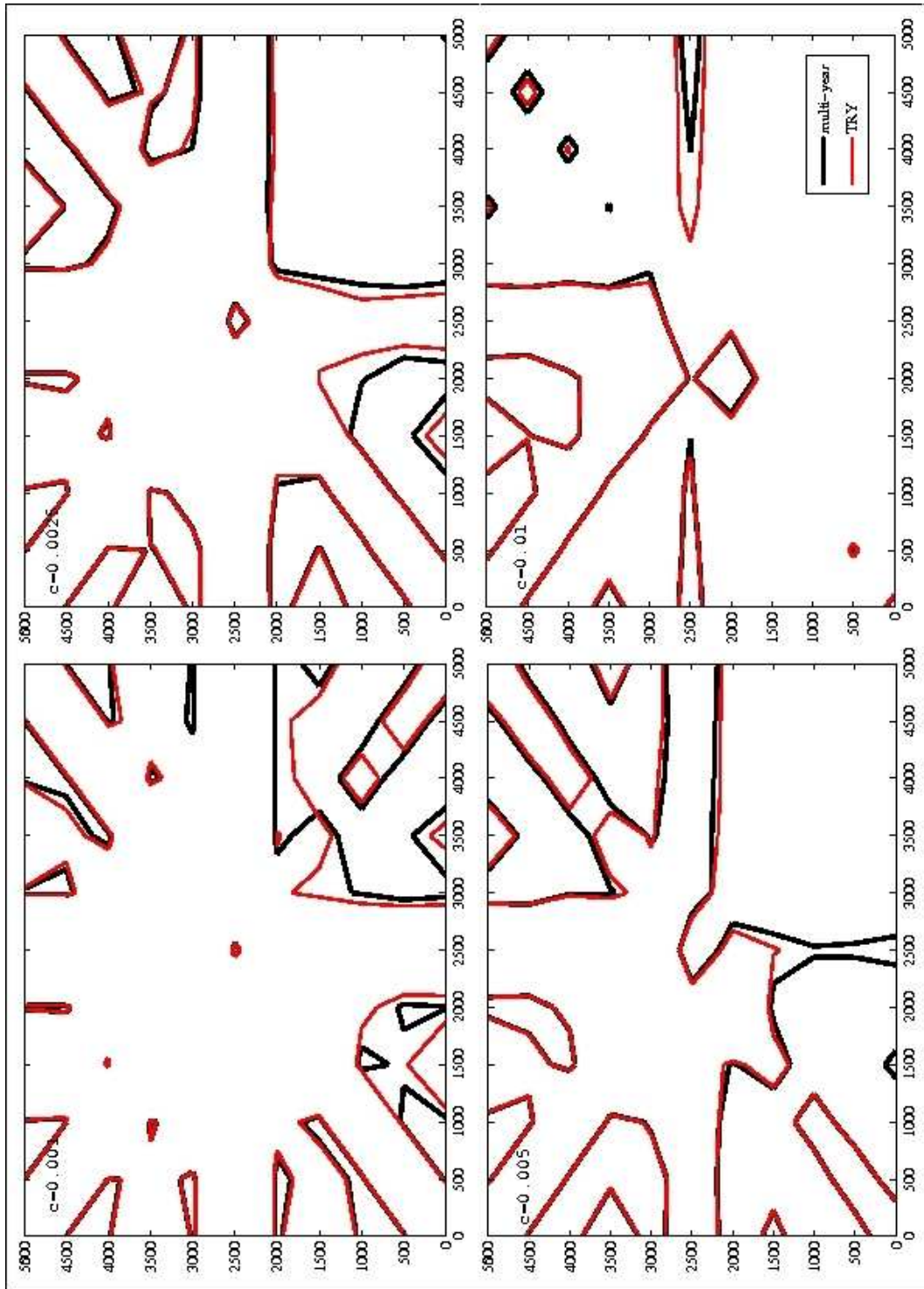


**Figura 4.7:** Isolinee relative a quattro concentrazioni medie ( $C1 = 0.0015$ ,  $C2 = 0.005$ ,  $C3 = 0.01$ ,  $C4 = 0.03 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), valutate in una griglia di 121 recettori equamente spaziate da 500 m, processando due differenti tipi di dati: i dati orari della serie storica (multyear), ed i dati orari del TRY (TRY), della stazione di Ala.

#### 4. Generazione dei Test Reference Year

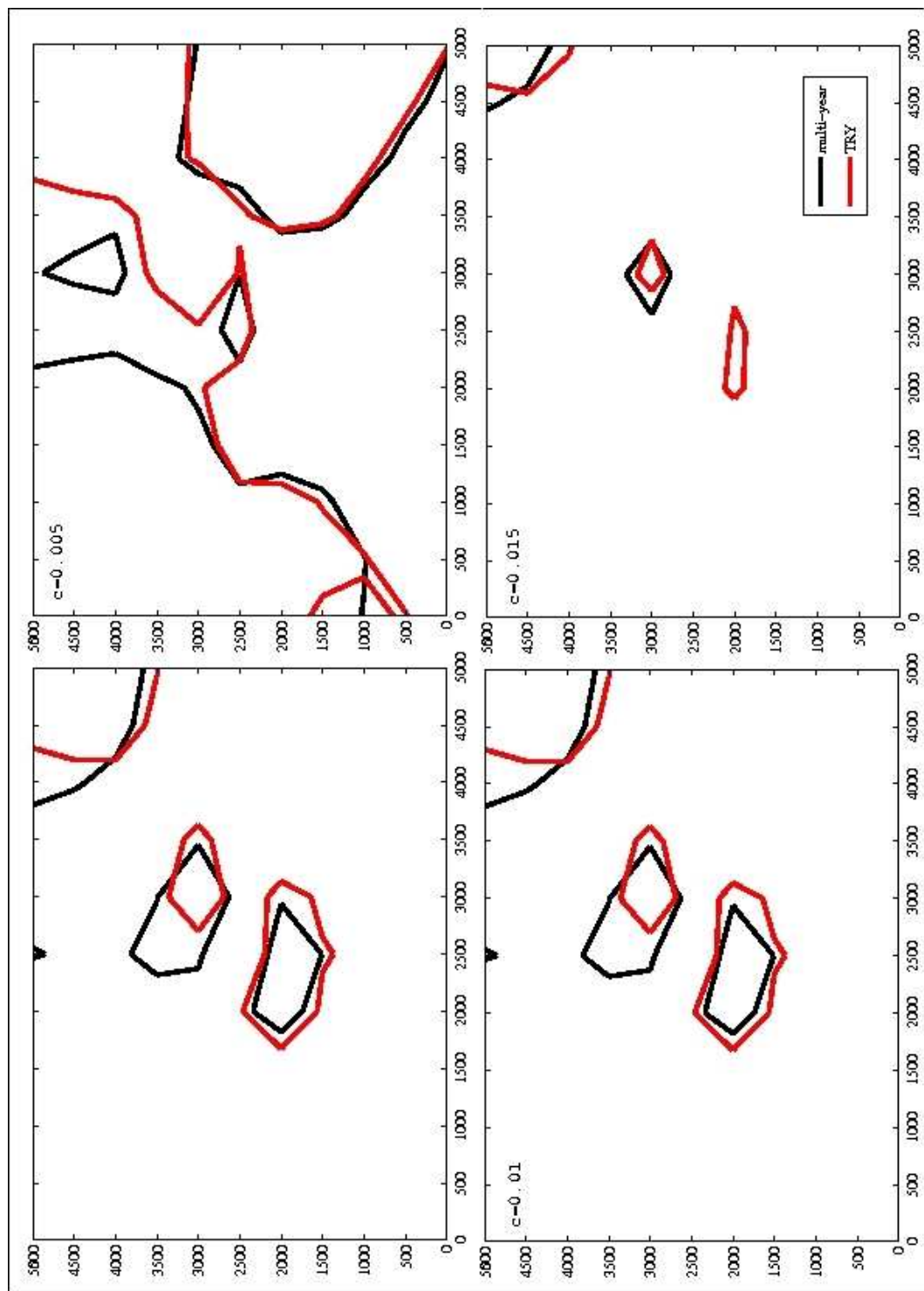


**Figura 4.8:** Isolinee relative a quattro concentrazioni medie ( $C1 = 0.001$ ,  $C2 = 0.0015$ ,  $C3 = 0.02$ ,  $C4 = 0.03 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), valutate in una griglia di 121 recettori equamente spaziate da 500 m, processando due differenti tipi di dati: i dati orari della serie storica (multiyear), ed i dati orari del TRY (TRY), della stazione di Arco.



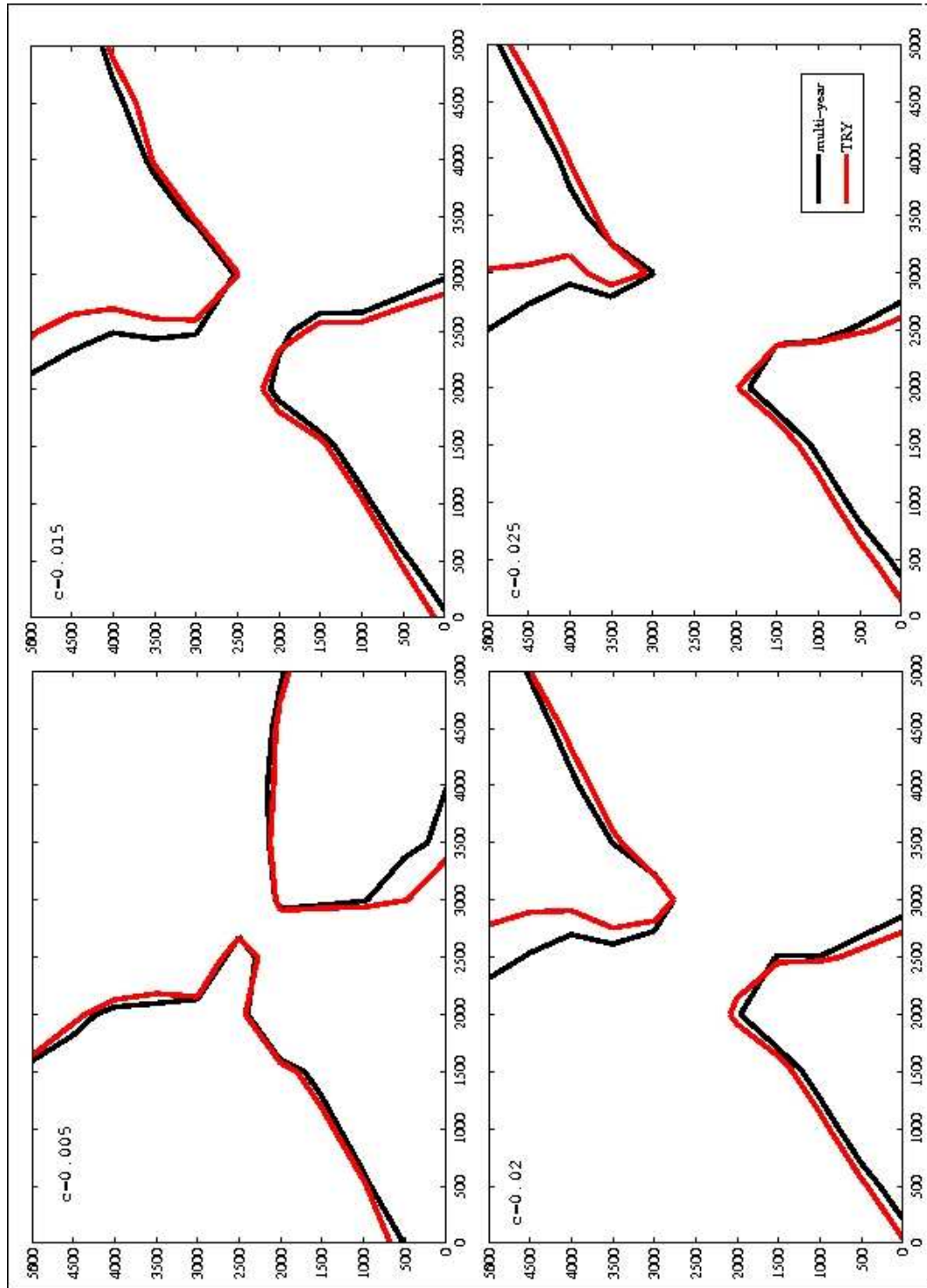
**Figura 4.9:** Isolinee relative a quattro concentrazioni medie ( $C1 = 0.002$ ,  $C2 = 0.0025$ ,  $C3 = 0.005$ ,  $C4 = 0.01 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), valutate in una griglia di 121 recettori equamente spazati da 500 m, processando due differenti tipi di dati: i dati orari della serie storica (multiyear), ed i dati orari del TRY (TRY), della stazione di Belluno.

#### 4. Generazione dei Test Reference Year

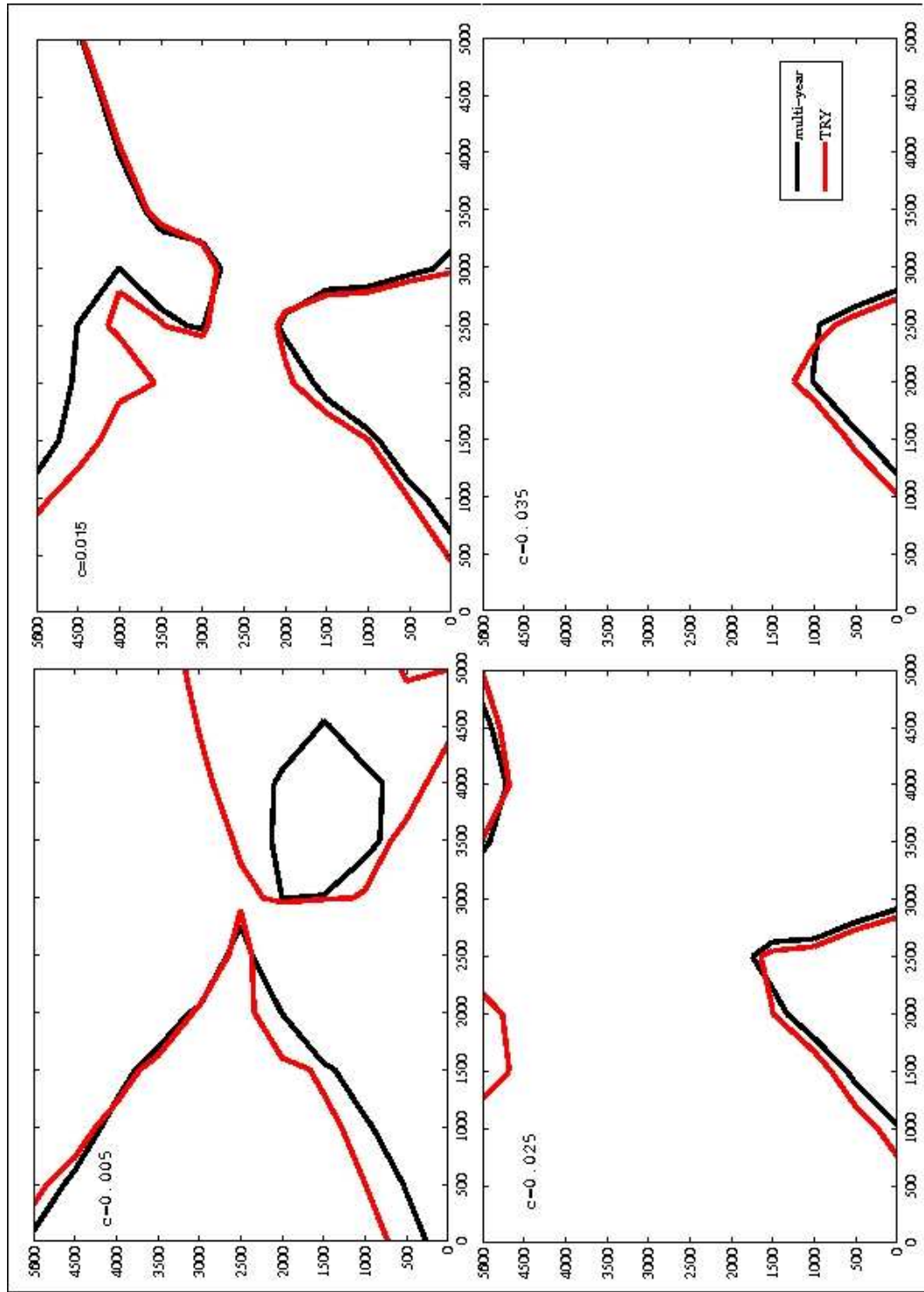


**Figura 4.10:** Isolinee relative a quattro concentrazioni medie ( $C1 = 0.001$ ,  $C2 = 0.005$ ,  $C3 = 0.01$ ,  $C4 = 0.015 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), valutate in una griglia di 121 recettori equamente spaziate da 500 m, processando due differenti tipi di dati: i dati orari della serie storica (multiyear), ed i dati orari del TRY (TRY), della stazione di Cascine.



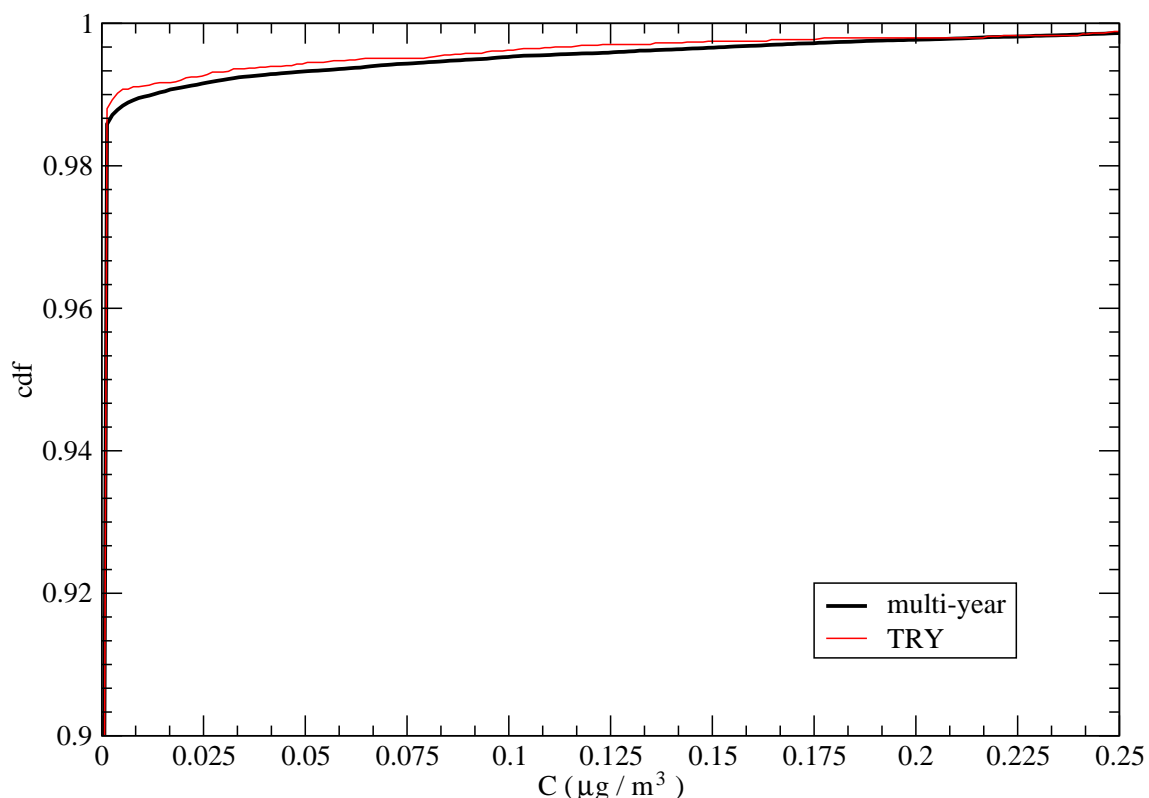


**Figura 4.11:** Isolinee relative a quattro concentrazioni medie ( $C1 = 0.005$ ,  $C2 = 0.015$ ,  $C3 = 0.02$ ,  $C4 = 0.025 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), valutate in una griglia di 121 recettori equamente spaziate da 500 m, processando due differenti tipi di dati: i dati orari della serie storica (multiyear), ed i dati orari del TRY (TRY), della stazione di San Michele.



**Figura 4.12:** Isolinee relative a quattro concentrazioni medie ( $C1 = 0.005$ ,  $C2 = 0.015$ ,  $C3 = 0.025$ ,  $C4 = 0.035 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), valutate in una griglia di 121 recettori equamente spaziate di 500 m, processando due differenti tipi di dati: i dati orari della serie storica (multiyear), ed i dati orari del TRY (TRY), della stazione di Trento.

Oltre al confronto diretto delle concentrazioni medie, per stimare la bontà del TRY generato, sono state valutate le funzioni di distribuzione cumulativa (CDF) per i due casi (serie storica e TRY), e per ogni nodo della griglia. Per comparare le CDF si è usato il coefficiente di correlazione tra le due curve, e si è visto che in quasi tutti i recettori, per tutte le sei stazioni processate, questi sono maggiori di 0.99 (perfetta correlazione). Un esempio delle due CDF è riportato nella figura 4.13, che mostra le due CDF per il recettore di coordinate  $x=2000$ ,  $y=2500$ , della stazione di Trento, e dove il coefficiente di correlazione è pari a 0.99.



**Figura 4.13:** Funzioni di distribuzione cumulative della concentrazione oraria nel recettore  $x=2000$ ,  $y=2500$ , per la stazione di Trento, valutate processando la serie storica ed il TRY.

Le Tabelle 4.27, 4.28 e 4.29 mostrano alcuni valori dei coefficienti di correlazione in punti scelti della griglia, per le tre stazioni: San Michele, Arco ed Ala.

#### 4. Generazione dei Test Reference Year

---

x	y	Coefficienti di correlazione
0	2500	0.999
500	2500	0.999
1000	2500	0.999
1500	2500	0.998
2000	2500	0.997
3000	2500	0.999
3500	2500	0.999
4000	2500	0.999
4500	2500	0.999
5000	2500	0.999
2500	0	0.992
2500	500	0.994
2500	1000	0.997
2500	1500	0.998
2500	2000	0.996
2500	3000	0.999
2500	3500	0.998
2500	4000	0.998
2500	4500	0.998
2500	5000	0.998

**Tabella 4.27:** Coefficienti di correlazione lineare tra le due funzioni di distribuzione cumulative delle concentrazioni orarie, per la stazione di San Michele, valutate processando la serie storica ed il TRY.

x	y	Coefficienti di correlazione
0	2500	0.999
500	2500	0.999
1000	2500	0.999
1500	2500	1.000
2000	2500	0.997
3000	2500	1.000
3500	2500	1.000
4000	2500	1.000
4500	2500	1.000
5000	2500	1.000
2500	0	0.995
2500	500	0.996
2500	1000	0.997
2500	1500	0.998
2500	2000	0.999
2500	3000	0.999
2500	3500	1.000
2500	4000	1.000
2500	4500	0.999
2500	5000	0.998

**Tabella 4.28:** Coefficienti di correlazione lineare tra le due funzioni di distribuzione cumulative delle concentrazioni orarie, per la stazione di Arco, valutate processando la serie storica ed il TRY.

x	y	Coefficienti di correlazione
0	2500	0.999
500	2500	0.999
1000	2500	0.999
1500	2500	1.000
2000	2500	1.000
3000	2500	1.000
3500	2500	1.000
4000	2500	1.000
4500	2500	1.000
5000	2500	1.000
2500	0	0.991
2500	500	0.990
2500	1000	0.992
2500	1500	0.993
2500	2000	0.996
2500	3000	0.982
2500	3500	0.968
2500	4000	0.960
2500	4500	0.953
2500	5000	0.949

**Tabella 4.29:** Coefficienti di correlazione lineare tra le due funzioni di distribuzione cumulative delle concentrazioni orarie, per la stazione di Ala, valutate processando la serie storica ed il TRY.

Per avere un'analisi globale su tutta la griglia, è stato condotto il test del  $\chi^2$  [42][43]. L'applicazione di tale test al presente caso è stata condotta calcolando una distribuzione delle concentrazioni medie annuali, valutate usando l'intero periodo di dati orari disponibile. In ogni recettore è stata calcolata la media e la varianza, che caratterizzano la distribuzione delle medie annuali. Per verificare se le concentrazioni calcolate usando il TRY sono coerenti con tale distribuzione poliennali, in ogni recettore sono state comparate le due distribuzioni trovate e le deviazioni standard sono state sommate sull'intera griglia come segue:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{121} \frac{(C_i - \mu_i)^2}{\sigma_i}, \quad (4.6)$$

dove:

- $i$  indica il recettore considerato,
- $C_i$  è la concentrazione media di inquinante valutata nel recettore  $i$  usando il TRY generato,
- $\mu_i$  è la distribuzione media annuale di inquinante nel recettore  $i$ ,
- $\sigma_i$  è la varianza della distribuzione delle medie annuali, nel recettore  $i$ .

I risultati del  $\chi^2$  test sono riportati nella Tabella 4.30.

#### 4. Generazione dei Test Reference Year

Stazione	Valore del $\chi^2$	p-value
San Michele	39	1
Trento	96	0.9477
Arco	41	1
Belluno	118	0.5346
Cascine	26	1
Ala	92	0.973

**Tabella 4.30:** Valori del  $\chi^2$  nella griglia di recettori della concentrazione media risultante usando il TRY, rispetto a quelli ottenuti utilizzando la serie storica. Il p-value è la probabilità che le concentrazioni valutate con il TRY appartengano al set di concentrazioni valutate con la serie storica.

I valori bassi del  $\chi^2$  indicano che le concentrazioni sono coerenti con quelle calcolate con tutta la serie storica, e, conseguentemente, la probabilità di commettere un errore nel rigettare tale ipotesi è prossima a 1 in tutti i casi (p-value).

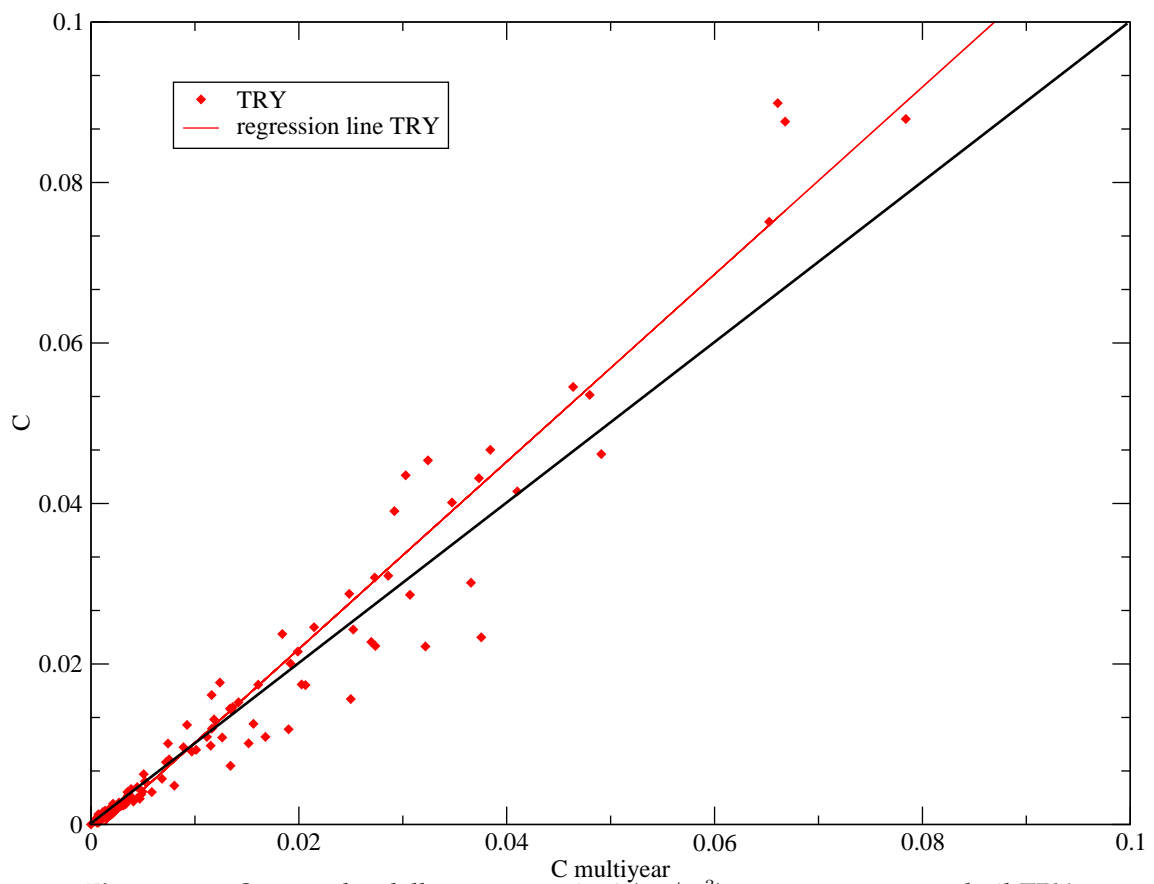
Infine, le Figure 4.14, 4.15 e 4.16 mostrano gli "scatter-plots" delle concentrazioni medie orarie ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) nei 121 recettori, ottenute processando il TRY contro quelle ottenute processando tutta la serie storica da cui il TRY è stato generato. Nella Tabella 4.31 sono riportati i coefficienti angolari (coefficiente di regressione) e l'ordinata all'origine (costante di regressione) della retta di regressione calcolata.

	Coefficiente di correlazione	Coefficiente di regressione	Costante di regressione
San Michele	0.98	1.17	-0.0015
Arco	0.98	1.34	-0.0019
Ala	0.93	0.99	0.0002
Trento	0.97	1.17	-0.0012
Cascine	0.85	0.94	-0.0002
Belluno	0.99	1.03	-0.0003

**Tabella 4.31:** Coefficienti di correlazione, coefficienti di regressione e costanti di regressione della retta di regressione delle concentrazioni valutate usando il TRY, contro le concentrazioni valutate usando la serie storica, su tutta la griglia di recettori per le sei stazioni processate.

I risultati appena esposti mostrano il notevole accordo tra le simulazioni condotte utilizzando la serie storica e quelle condotte utilizzando il TRY da essa generata. Possiamo quindi concludere che il TRY ambientale prodotto è effettivamente rappresentativo della serie storica.

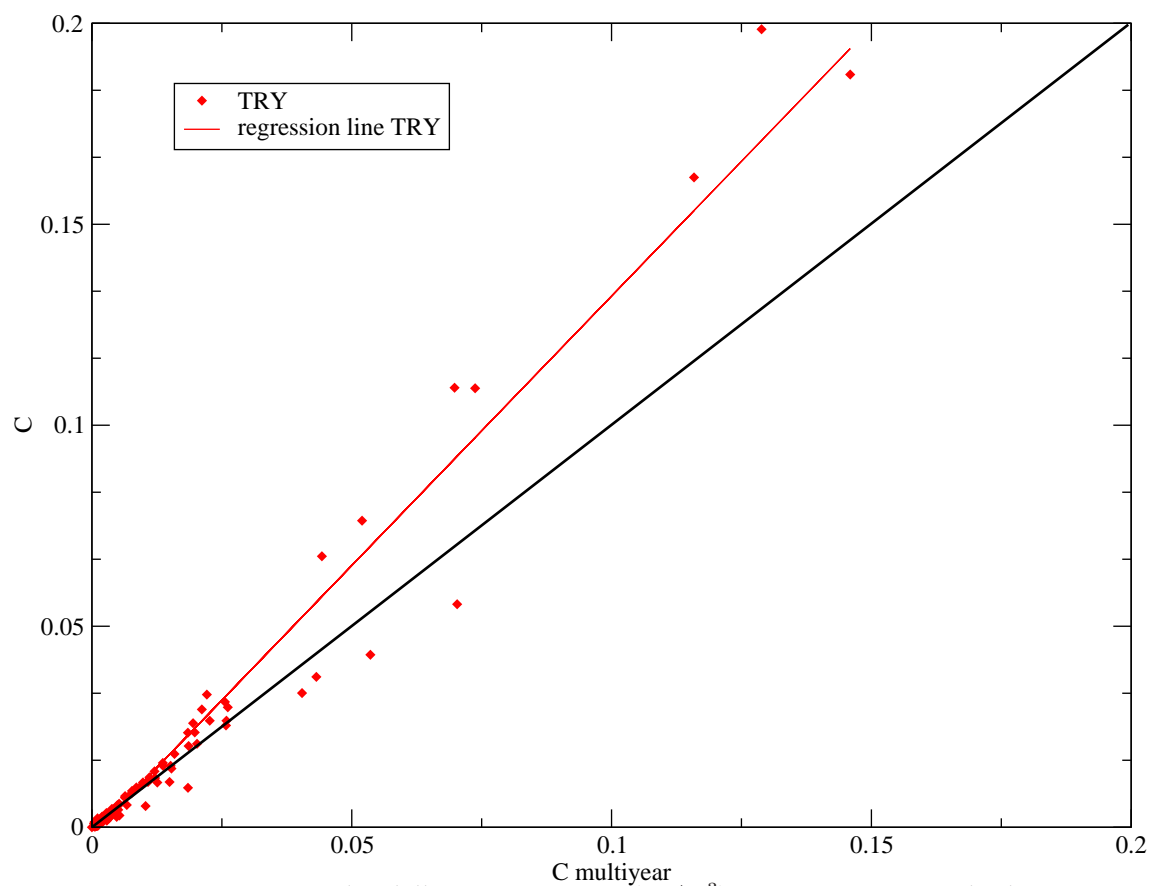
Parte integrante la generazione del TRY ambientale è stata la verifica dell'affidabilità dei dati meteorologici attualmente utilizzati per tali tipi di applicazioni, questo per verificare l'effettiva utilità di un TRY per tali scopi. L'approccio attualmente seguito per simulare la diffusione degli inquinanti in atmosfera è quello fornito dal programma Industrial Source Complex (ISC3) Dispersion Models", sviluppato dall'EPA (U.S. Environmental Protection Agency). ISC3 ha due differenti versioni: la "short-term" (ISCST3) e la "long-term" (ISCLT3) [44], [45]. Entrambe le versioni utilizzano un modello Gaussiano di diffusione, ma mentre lo short-term utilizza in input dei file meteorologici orari, il long-term usa delle distribuzioni di frequenza della velocità del vento, in funzione di settori di direzione



**Figura 4.14:** Scatter-plot delle concentrazioni ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) ottenute processando il TRY contro le concentrazioni ottenute processando la serie storica e linea di regressione, su tutti i recettori della griglia, per la stazione di San Michele.

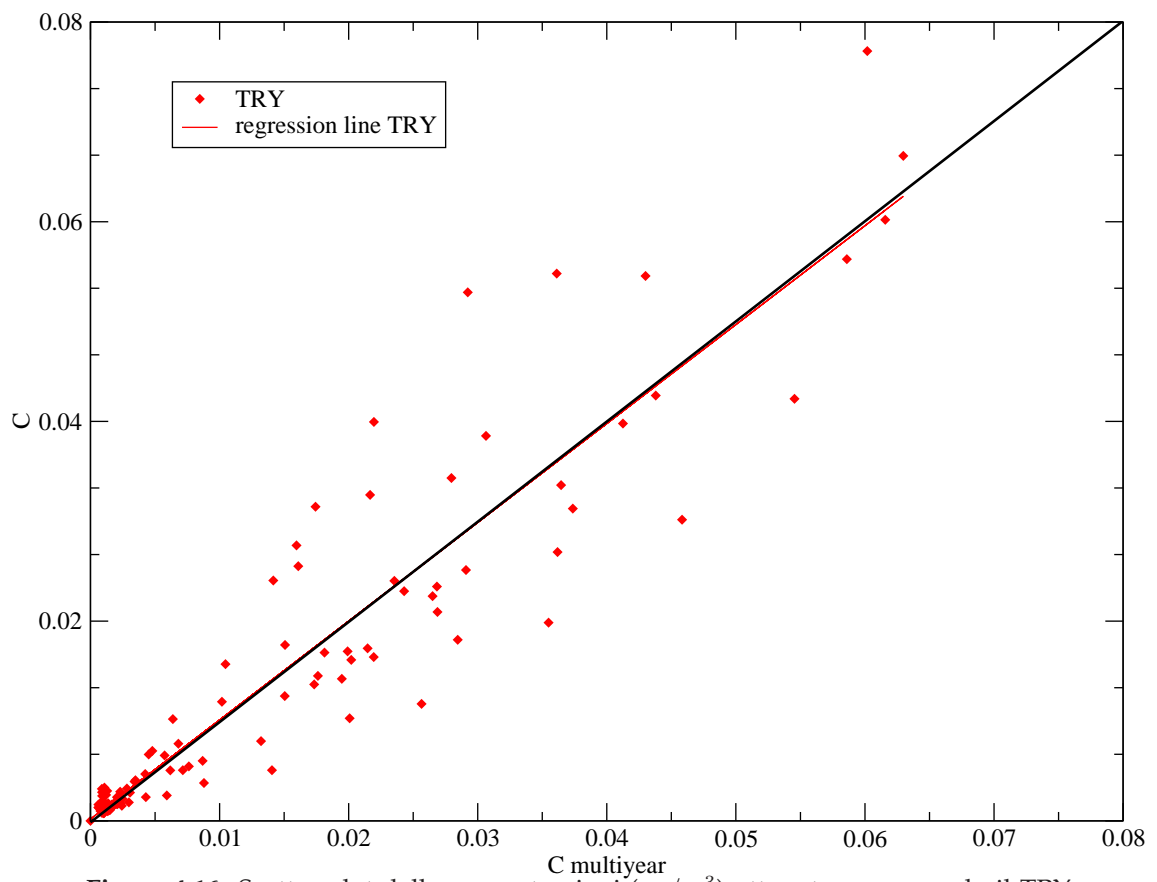
#### 4. Generazione dei Test Reference Year

---



**Figura 4.15:** Scatter-plot delle concentrazioni ( $\mu g/m^3$ ) ottenute processando il TRY contro le concentrazioni ottenute processando la serie storica e linea di regressione, su tutti i recettori della griglia, per la stazione di Arco.





**Figura 4.16:** Scatter-plot delle concentrazioni ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) ottenute processando il TRY contro le concentrazioni ottenute processando la serie storica e linea di regressione, su tutti i recettori della griglia, per la stazione di Ala.

#### 4. Generazione dei Test Reference Year

del vento e categorie di stabilità. In altri termini, per evitare di avere una serie storica poliennale di dati orari, si usa una elaborazione statistica degli stessi come quella rappresentata in Tabella 4.32, relativa alla sola classe di stabilità A, dove le colonne si riferiscono alle sei categorie di velocità del vento (esprese in nodi) e le righe ai 16 settori di direzione del vento.

	0-1	2-4	5-7	8-12	13-23	24-99
0.22.5	.000000000	.000000000	.000000000	.000000000	.000000000	.000000000
22.5-45	.000000000	.000000000	.000000000	.000000000	.000000000	.000000000
45-67.5	.000000000	.000000000	.000000000	.000000000	.000000000	.000000000
67.5-90	.000000000	.000000000	.000000000	.000000000	.000000000	.000000000
90-112.5	.000000000	.000000000	.000000000	.000000000	.000000000	.000000000
112.5-135	.000000000	.000000000	.000000000	.000000000	.000000000	.000000000
135-157.5	.000000000	.000000000	.000000000	.000000000	.000000000	.000000000
157.5-180	.000000000	.000000000	.000000000	.000000000	.000000000	.000000000
180-202.5	.007819883	.015640000	.000000000	.000000000	.000000000	.000000000
202.5-225	.006842625	.013685455	.000000000	.000000000	.000000000	.000000000
225-247.5	.007819883	.015640000	.000000000	.000000000	.000000000	.000000000
247.5-270	.006842625	.013685455	.000000000	.000000000	.000000000	.000000000
270-292.5	.000977713	.001955455	.000000000	.000000000	.000000000	.000000000
292.5-315	.000000000	.000000000	.000000000	.000000000	.000000000	.000000000
315-337.5	.000000000	.000000000	.000000000	.000000000	.000000000	.000000000
337.5-360	.000000000	.000000000	.000000000	.000000000	.000000000	.000000000

**Tabella 4.32:** Esempio di dati statistici utilizzati nella versione "long-term" di ISC3 relativi alla Classe di stabilità A.

Il modello Gaussiano per lo short-term utilizza l'equazione 4.7 per il calcolo della concentrazione oraria di inquinante in atmosfera.

$$C = \frac{QKV D(x)}{2\pi u_s \sigma_y \sigma_z} e^{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}} \quad (4.7)$$

dove

- x è la distanza "downwind" (m), positiva nella direzione verso cui soffia il vento;
- y è la distanza "crosswind", (m);
- Q è il tasso di emissione dell'inquinante (massa per unità di tempo);
- K è un coefficiente scalare per convertire la concentrazione calcolata dell'unità; di misura desiderata;
- V è il termine verticale (adimensionale);
- D(x) è il termine di decadimento (adimensionale) (assunto nel caso presente pari a uno);
- $\sigma_y$  e  $\sigma_z$  sono rispettivamente la standard deviation laterale e verticale della distribuzione di concentrazione (m);
- $u_s$  è la velocità media del vento all'altezza di rilascio.

L'equazione 4.7 è fortemente dipendente dalle condizioni meteorologiche, non solo attraverso la dipendenza diretta da  $u_s$ , che appare esplicitamente nella formula. Infatti, deve essere messo in evidenza che:

- il termine verticale  $V$  è una funzione della mixing height  $h$  (m), dell'altezza del pennacchio  $\Delta H$  (m) e di  $\sigma_z$ ;
- $H = H(SC, u, x)$ , dove  $SC$  (adimensionale) è la classe di stabilità e  $u$  è la velocità del vento;
- $\Delta h = \Delta h(T, u_s, SC)$ , dove  $T$  ( $^{\circ}C$ ) è la temperatura dell'aria;
- $\sigma_z = \sigma_z(SC, x)$ ;
- $\sigma_y = \sigma_y(SC, x)$ ;
- $SC = SC(u, RS)$ , dove  $RS$  ( $W/m^2$ ) è la radiazione solare sul piano orizzontale.

Bisogna inoltre evidenziare anche il fatto che il modello Gaussiano (Eq. 4.7) dipende dal tempo  $t$  solo attraverso le variabili meteorologiche (ed eventualmente attraverso  $Q$ ). In aggiunta, il modello è un modello stazionario, in quanto gli effetti transitori sono considerati trascurabili per ogni step temporale che, in questo caso, è preso pari ad un'ora.

Il modello long-term usa un'equazione Gaussiana mediata sui settori [45]. Vi sono sei categorie di velocità del vento, usualmente definite dal limite superiore come segue: 1.54, 3.09, 5.14, 8.23, 10.8 m/s; la sesta categoria è assunta non avere limite superiore. Quindi vi sono 16 settori di direzione del vento corrispondenti ai 16 settori standard della circonferenza. In aggiunta a questi file statistici ISCLT ha bisogno anche di valori medi per la temperatura e per la mixing height. In genere, questi valori medi dovrebbero essere calcolati anche in funzione delle classi di stabilità ed alle categorie della velocità del vento. Il modo usuale di procedere è quello di usare la massima temperatura media giornaliera per le classi di stabilità A, B e C, la minima temperatura media giornaliera per le classi E ed F, mentre per la classe D dovrebbe essere usata la temperatura media oraria. Ancora più complesso è il calcolo dei valori medi della mixing height. Tali medie dovrebbero essere calcolate, per una data classe di stabilità per ognuna delle sei categorie di velocità del vento [44]. Dato che si hanno sei classi di stabilità e sei categorie della velocità del vento, le mixing height medie saranno 36. L'equazione usata nel modello Gaussiano long-term è la 4.8

$$\chi_l = \frac{K}{\sqrt{2\pi R \Delta \vartheta^l}} \sum_{i,j,k} \frac{Q_{i,k} f_{i,j,k} S V_{i,k} D_{i,k}}{u_{s;i,k} \sigma_{z;k}} \quad (4.8)$$

dove:

- $\chi_l$  è la concentrazione stagionale di inquinante;
- $l$  è la  $l$ -esima stagione;
- $j$  è la  $j$ -esima categoria di direzione del vento;
- $k$  è la  $k$ -esima categoria di stabilità;

#### 4. Generazione dei Test Reference Year

---

- $i$  è la  $i$ -esima categoria di velocità del vento;
- $f$  è la frequenza di occorrenza della  $i$ -esima categoria di velocità del vento, la  $j$ -esima categoria di direzione del vento e la  $k$ -esima categoria di stabilità per la stagione  $l$ -esima;
- $\Delta\vartheta'$  è la distanza radiale dalla sorgente puntiforme virtuale (per il calcolo del building downwash) dei recettori, considerata pari a 1 nelle simulazioni effettuate;
- $S$  è una funzione di smoothing per eliminare le discontinuità della concentrazione all'interfaccia di settori adiacenti.

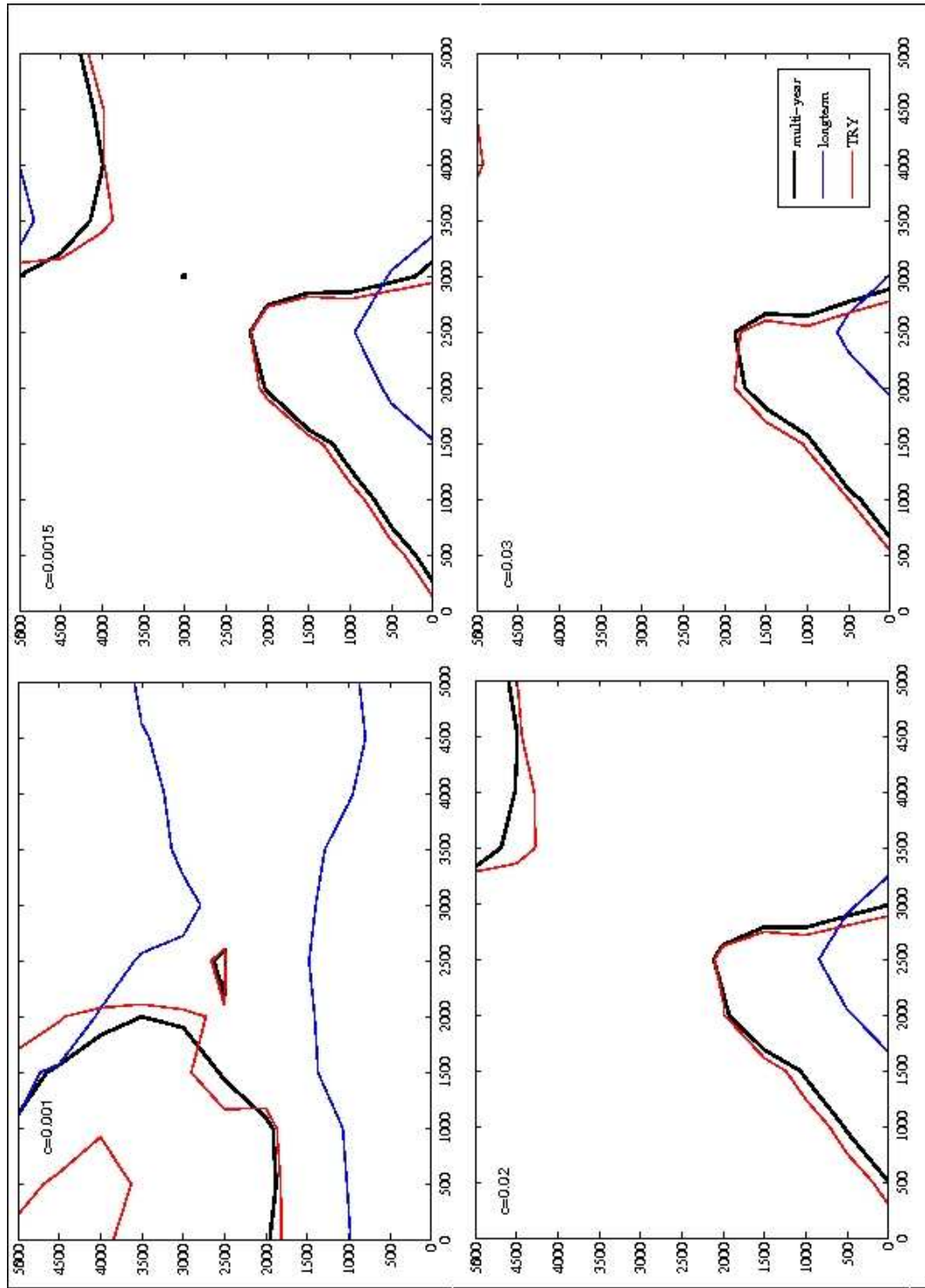
Gli altri parametri sono gli stessi dell'equazione Gaussiana short-term (Eq. 4.7), ma sono ora definiti per categorie discrete di velocità e direzione del vento, stabilità e stagione.

I test condotti per valutare se i risultati ottenuti il modello long-term, cioè processando i dati meteorologici statistici, fossero assimilabili a quelli ottenuti processando la serie storica oraria da cui i dati statistici sono stati calcolati, sono gli stessi di quelli usati per valutare il TRY ambientale. Le stazioni processate sono le stesse e la Figura 4.17 mostra un esempio delle concentrazioni medie orarie valutate utilizzando i tre set di dati (serie storica, dati statistici e TRY) per la stazione di Arco. In tale figura sono riportate anche le isolinee di concentrazione calcolate utilizzando il TRY: è immediato notare come le isolinee relative alle concentrazioni valutate utilizzando il set di dati statistici, a differenza di quelle valutate usando il TRY ambientale, si discostino molto da quelle della serie storica. Inoltre, anche in questo caso è stato condotto il test del  $\chi^2$ . I risultati del  $\chi^2$  e del "p-value" sono riportati in Tabella 4.33.

Stazione	Valore del $\chi^2$	p-value
San Michele	1172	0
Trento	453	0
Arco	314	0
Belluno	25765	0
Cascine	227	0
Ala	602	0

**Tabella 4.33:** Valori del  $\chi^2$  nella griglia di recettori della concentrazione media risultante usando i dati meteorologici statistici, rispetto a quelli ottenuti utilizzando la serie storica. Il p-value è la probabilità che le concentrazioni valutate con il TRY appartengano al set di concentrazioni valutate con la serie storica.

Il "p-value" è, in tutti i casi, pari a zero e quindi possiamo concludere che il set di concentrazioni medie valutate usando i dati meteorologici statistici non appartiene al set di concentrazioni medie valutate utilizzando tutta la serie storica.



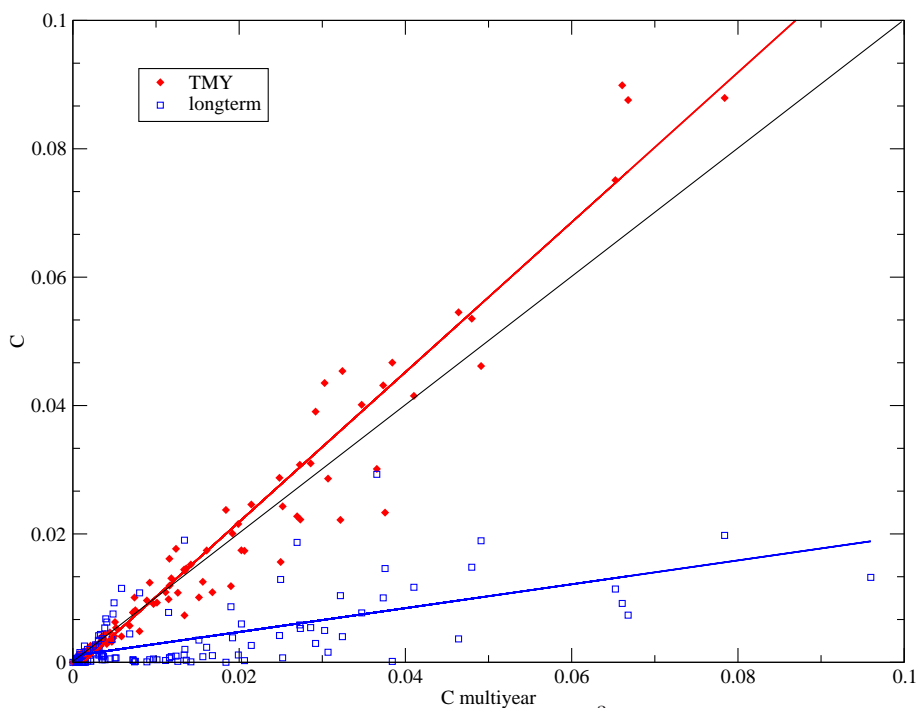
**Figura 4.17:** Isolinee relative a quattro concentrazioni medie ( $C1 = 0.001$ ,  $C2 = 0.015$ ,  $C3 = 0.02$ ,  $C4 = 0.03 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), valutate in una griglia di 121 recettori equamente spaziate da 500 m, processando tre differenti tipi di dati: i dati orari della serie storica (multiyear), i dati orari del TRY (TRY) ed i dati statistici (longterm) della stazione di Arco.

#### 4. Generazione dei Test Reference Year

Per completezza sono stati anche graficati gli “scatter-plots” delle concentrazioni medie orarie ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) nei 121 recettori, ottenute processando i dati statistici contro quelle ottenute processando tutta la serie storica da cui il TRY è stato generato. Nella Tabella 4.34 sono riportati i coefficienti angolari (coefficiente di regressione) e l’ordinata all’origine (costante di regressione) della retta di regressione calcolata, mentre la Figura 4.18 mostra le rette di regressione valutate mediante il TRY ed i dati statistici. Anche in questo caso, mentre il TRY ambientale è in ottimo accordo con i risultati ottenuti con la serie storica, la retta di regressione relativa ai risultati ottenuti processando i dati statistici si discosta molto da quella della poliennale.

	Coefficiente di correlazione	Coefficiente di regressione	Costante di regressione
San Michele	0.63	0.19	0.0010
Arco	0.63	0.21	0.0015
Ala	0.80	0.56	0.0008
Trento	0.70	0.33	0.0008
Cascine	0.56	0.60	-0.0012
Belluno	0.18	0.02	0.0007

**Tabella 4.34:** Coefficienti di correlazione, coefficienti di regressione e costanti di regressione della retta di regressione delle concentrazioni valutate usando i dati statistici, contro le concentrazioni valutate usando la serie storica, su tutta la griglia di recettori per le sei stazioni processate.



**Figura 4.18:** Scatter-plot delle concentrazioni ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) ottenute processando i dati statistici e il TRY contro le concentrazioni ottenute processando la serie storica e linea di regressione, su tutti i recettori della griglia, per la stazione di San Michele.

I dati statistici in input sono circa 600, mentre quelli del TRY, essendo un anno di dati orari, sono 8760. Sebbene il numero di dati da usare nel caso del TRY sia di un ordine di grandezza maggiore rispetto a quello dei dati statistici appare evidente che l'utilizzo di dati meteorologici statistici, sebbene sia ad oggi la pratica comune seguita, non dà risultati accettabili per descrivere la diffusione di un inquinante in atmosfera e che il TRY ambientale generato sia un'ottima alternativa, in quanto i risultati ottenuti processando tale TRY sono molto rappresentativi della serie storica da cui esso è stato generato.

#### 4.6 Generazione del TRY per 102 località italiane

Da una prima analisi dei dati disponibili si è compilata la Tabella 4.35 che riporta il numero di TRY generabili, suddivisi per applicazioni energetiche ed ambientali. Ovviamente questi valori sono stati rivisti perché non tengono conto dei dati sicuramente mancanti nelle serie storiche e quindi dell'effettiva disponibilità di un numero sufficiente di anni per una corretta generazione dei TRY.

TIPI DI TRY	TRY GENERABILI
Solare termico	118
Fotovoltaico	127
Eolico	106
Ambientale	127
<b>TOTALE</b>	<b>478</b>

**Tabella 4.35:** Numero di TRY generabili, suddivisi per tipologia.

Infatti, una volta completata l'importazione dei dati e la loro pulizia, si è potuto procedere alla selezione delle stazioni che presentavano le caratteristiche necessarie per la produzione dei TRY. Tale selezione è stata condotta, analizzando, per ogni stazione, quanti mesi completi di tutte le variabili necessarie alla selezione dei vari tipi di TRY erano disponibili. Quindi, si sono scartate tutte quelle stazioni che avevano almeno un mese del calendario con un numero di anni inferiore a sette. Anche se la selezione ottimale prevede almeno 10 anni per ogni mese del calendario da cui estrarre il TRY, si è deciso di abbassare questo limite per potere generare un numero di TRY soddisfacente. In futuro, il Data Base potrà essere aggiornato inserendo degli ulteriori anni e rifacendo la selezione dei TRY, per quelle stazioni che verranno aggiornate.

La Tabella 4.36 mostra effettivamente quanti e quali TRY sono stati prodotti.

TIPI DI TRY	TRY GENERATI
Solare termico	78
Fotovoltaico	91
Eolico	71
Ambientale	51
<b>TOTALE</b>	<b>291</b>

**Tabella 4.36:** Numero di TRY generati, suddivisi per tipologia.

#### 4. Generazione dei Test Reference Year

Nella Tabella 4.37 sono riportati i TRY prodotti per ciascuna stazione presente nel Data Base (la prima colonna riporta il codice con cui la stazione è stata memorizzata nel Data Base). Le stazioni non riportate nella tabella presentano o una serie storica troppo corta, oppure i loro dati, anche dopo la pulizia e la ricostruzione delle lacune, risultano essere insufficienti per una corretta generazione dei TRY.

Tabella 4.37: Tipologie dei TRY prodotti suddivisi per stazione.

Codice	Denominazione (località)	TRY ambientale	TRY eolico	TRY fotovoltaico	TRY solare-termico
1	Belluno Viale Europa	X		X	X
2	Legnaro			X	
3	Villadose	X		X	X
4	Breda di Piave	X		X	X
5	Cavallino (Treporti)	X		X	X
6	Villafranca Veronese	X		X	X
7	Quinto Vicentino			X	
8	Fossalon di Grado	X		X	X
9	Udine	X		X	X
10	Puegnago			X	
14	San Michele	X	X	X	X
15	Borgo Valsugana	X	X	X	X
16	Trento Sud	X	X	X	X
17	Arco	X	X	X	X
18	Cles	X	X	X	X
19	Argenta			X	
20	Martorano			X	
21	Fiorenzuola			X	X
23	Cascine	X		X	X
24	Ala	X	X	X	X
26	Messina	X	X	X	X
27	Palermo Boccadifalco		X		
28	Lecce		X		
29	Brindisi	X	X	X	X
31	Napoli Capodichino	X	X	X	X
32	Roma Ciampino	X	X	X	X
33	Falconara		X		
35	Bologna Borgo Panigale			X	X
36	Genova Sestri	X	X	X	X
37	Trieste	X	X	X	X
38	Catania Sigonella		X		
39	Torino Caselle	X	X	X	X
40	Cagliari Elmas	X		X	X



Tabella 4.37: Tipologie dei TRY prodotti suddivisi per stazione.

Codice	Denominazione (località)	TRY ambientale	TRY eolico	TRY fotovoltaico	TRY solare-termico
42	CNR scienze marine	X	X	X	
45	Porto	X	X	X	X
47	Vivaro	X	X	X	X
48	San Vito	X	X	X	
50	Faedis	X	X	X	X
51	Tolmassons	X	X	X	X
52	Palazzolo	X	X	X	X
53	Capriva	X	X	X	X
54	Fagagna	X	X	X	X
55	Gradisca	X	X	X	X
56	Cervignano	X	X	X	X
57	Sgonico	X	X	X	X
59	Enemonzo	X		X	X
61	Verzuolo	X	X	X	X
62	Carpeneto	X	X	X	X
63	Piubega	X	X	X	X
64	Montanaso Lombardo	X	X	X	X
65	Susegana	X	X	X	X
66	Cividale		X	X	
67	Fiume Veneto		X	X	X
68	San Casciano		X	X	X
69	San Piero a Grado		X	X	X
70	Santa Fista	X	X	X	X
71	Marsciano		X	X	X
72	Monsampolo	X	X	X	X
73	Caprarola		X	X	X
74	Borgo San Michele		X	X	X
75	Campochiaro		X	X	X
76	Piano Cappelle	X	X	X	X
77	Pontecagnano	X	X	X	X
78	Palo del Colle		X	X	X
80	Sibari	X	X	X	X
81	Pietranera		X	X	X
82	Santo Pietro		X	X	X
83	Libertinia		X	X	X
84	Chilivani	X	X	X	X
85	Santa Lucia	X	X	X	X
86	Baselga	X		X	
87	Caldonazzo		X	X	X
89	Paneveggio		X	X	X

#### 4. Generazione dei Test Reference Year

Tabella 4.37: Tipologie dei TRY prodotti suddivisi per stazione.

Codice	Denominazione (località)	TRY ambientale	TRY eolico	TRY fotovoltaico	TRY solare-termico
90	Passo Brocon		X	X	X
91	Passo Tonale		X	X	X
94	Polsa		X	X	X
95	Rabbi		X	X	X
96	Riva del Garda		X	X	X
98	Tovel		X	X	X
99	Tremalzo		X	X	X
100	Bema			X	X
101	Bergamo via Goisis			X	X
102	Bergamo via S. Giorgio		X	X	X
103	Bormio		X		
104	Busto Arsizio		X		
105	Capralba			X	
106	Carate Brianza		X	X	X
107	Colico		X		
108	Costa Volpino	X		X	X
110	Filago	X		X	X
111	Gambara		X		
112	Lonate		X	X	X
113	Milano via Juvara		X	X	X
115	S. Angelo Lod			X	
116	Stezzano			X	X
117	Varese		X		
148	Metaponto	X		X	X
149	Villa Agri			X	
151	Pisticci			X	
152	Policoro			X	

##### 4.6.1 La creazione del Data Base complessivo dei TRY prodotti

Lo schema per la produzione dei TRY può essere schematizzato come in Figura 4.19.

Una volta terminata la fase di chiusura buchi, i dati di ogni stazione sono stati analizzati, per individuare le stazioni che presentavano una serie storica sufficiente per la produzione dei TRY. La scelta è stata fatta in base alla quantità di rilevamenti temporalmente contigui, senza, cioè, la presenza di buchi al loro interno. Si sono contati quanti anni completi, cioè senza dati mancanti al loro interno, erano disponibili per ogni mese del calendario.

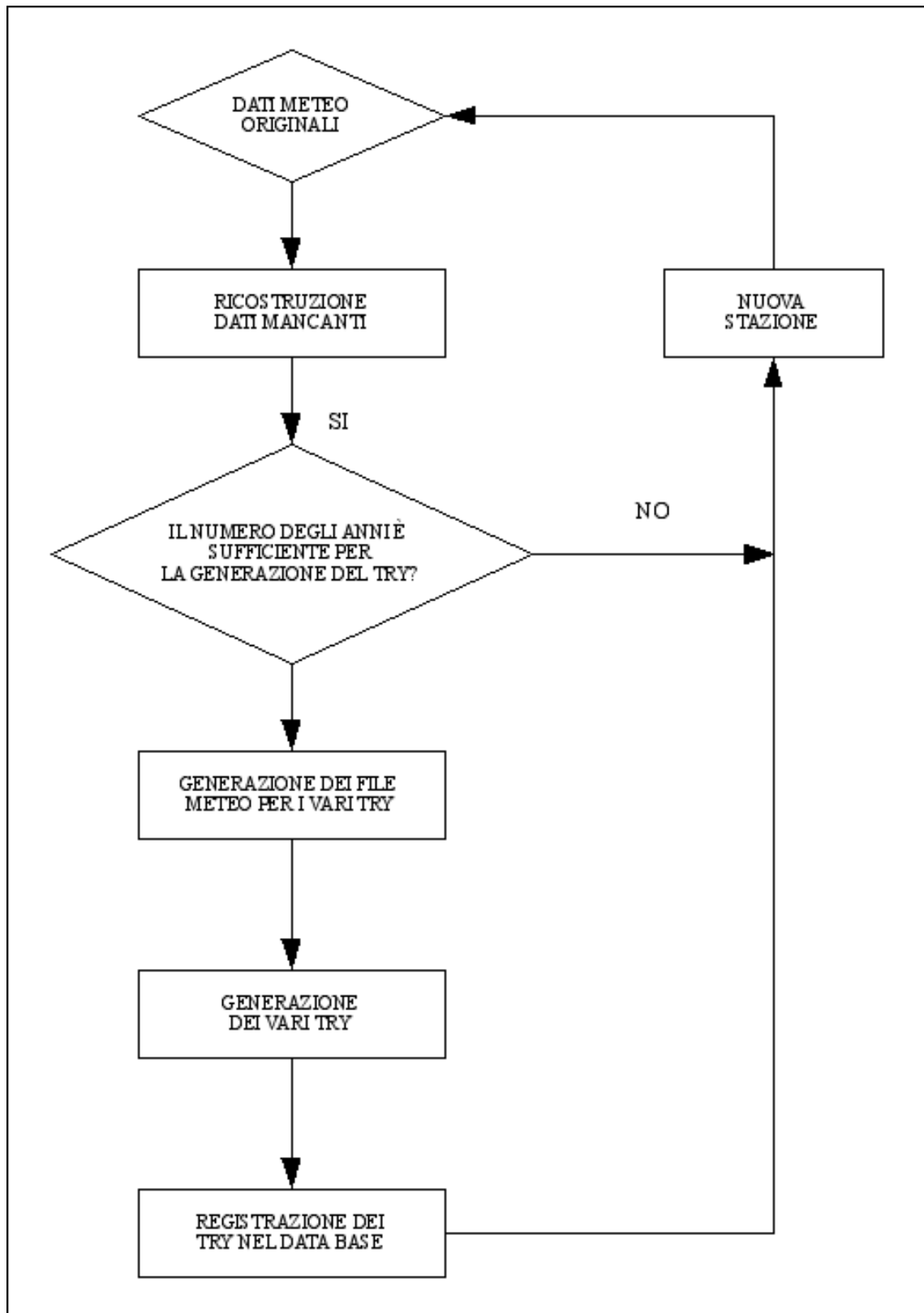


Figura 4.19: Procedura seguita per la produzione dei TRY.

#### 4. Generazione dei Test Reference Year

---

Una volta individuati i TRY da produrre, per le stazioni ed i TRY selezionati, sono stati estratti i dati da usare nel programma di generazione del TRY. Tali dati sono stati elaborati e il programma per la generazione del TRY ha prodotto un file contenente, per ogni mese, l'anno tipico selezionato. Infine tale file è stato utilizzato per estrarre dal Data Base i mesi selezionati creando il TRY come una sequenza di dati.

Le 12 ore all'interfaccia tra i due mesi contigui ma appartenenti ad anni differenti (ultime 6 ore del mese precedente e prime 6 ore del mese successivo, se appartenenti ad anni differenti) sono quindi stati poste come mancanti ed interpolate, per garantire la continuità nel passaggio da un mese al successivo. Tale operazione è stata effettuata per tutte le variabili ad eccezione della radiazione e della direzione del vento, indipendentemente dall'altezza della misurazione. Ovviamente per la radiazione solare non è necessario, in quanto le misure notturne sono tutte nulle, mentre la direzione del vento è una misura velocemente variabile, e quindi avendo anche deciso di evitare la ricostruzione di tale variabile per lacune maggiori di cinque ore consecutive, si è deciso di non effettuare lo smooth. Se invece viene importato un TRY di tipo ambientale, la procedura di interpolazione delle variabili all'interfaccia di mesi appartenenti ad anni diversi, non viene effettuata su nessuna delle variabili, in quanto, dovendo calcolare anche delle variabili derivate, si è deciso di mantenere la veridicità dei dati e non procedere alla smooth.

Il TRY così costruito viene quindi importato nelle tabelle nel Data Base relative ai TRY prodotti e reso disponibile in linea agli utenti. Il sito internet da cui sarà possibile accedere al Data Base e scaricare i TRY generati è descritto in Appendice B.

## Capitolo 5

# Conclusioni

Un gran numero di valutazioni ambientali ed energetiche necessitano di adeguati dati meteorologici da dare in input ai modelli di analisi e previsione. Basti pensare alla dispersione in atmosfera di inquinanti gassosi dove la velocità del vento e la direzione sono fondamentali per avere le concentrazioni dell'inquinante in punti precisi del sito in interesse, o alla valutazione del potenziale fotovoltaico di un sito, dove è necessario avere dati di radiazione solare. In Italia vi è carenza di dati meteorologici direttamente utilizzabili per tali applicazioni, ed i dati presenti, risultano essere incompleti, errati o anche estremamente costosi per una valutazione a lungo termine (con l'utilizzo cioè di serie di dati meteorologiche decennali).

Una possibile soluzione è la creazione di anni tipo (i Test Reference Year, TRY), che siano rappresentativi per la particolare applicazione per cui essi sono stati creati. Attualmente gli anni tipo sono stati sviluppati seguendo differenti criteri statistici solo per lo studio di impianti solari e l'analisi dei carichi termici di edifici, applicandoli poi anche agli impianti fotovoltaici, sebbene non specificatamente creati per essi. La presente ricerca ha portato, a definire la metodologia per la creazione di TRY con applicazioni differenti da quelle fino a oggi esplorate. In particolare si sono generati i TRY ambientali ed eolici, aspetto innovativo di questa ricerca finora mai affrontato in studi precedenti. I risultati raggiunti sono molto buoni ed i TRY prodotti per queste applicazioni si sono dimostrati affidabili per caratterizzare la situazione climatica della località sul lungo periodo ed essere quindi utilizzati per studi energetici ed ambientali. Inoltre si è anche raffinata la procedura per la creazione di un TRY fotovoltaico.

Parte integrante della ricerca è stata anche l'analisi dei metodi di interpolazione dei dati mancanti e/o erronei. La letteratura propone numerose alternative, e fra tutte sono state scelte quelle che, compatibilmente ai dati a disposizione, sono risultate essere le più adatte per ottenere delle serie storiche sufficientemente lunghe e prive di lacune.

Il presente progetto di ricerca ha permesso inoltre la creazione di un Data Base nazionale che contiene 291 TRY di differenti tipologie, per 102 località, che potrà essere reso liberamente consultabile e scaricabile on-line.

## 5. Conclusioni

---

Purtroppo un problema è rimasto ancora aperto: sebbene i TRY prodotti siano numerosi, la copertura dell'intero territorio nazionale non è stata raggiunta sia perché fuori agli obiettivi della ricerca sia a causa delle difficoltà incontrate nel recupero dei dati meteorologici. Per potere veramente affermare di avere un Data Base nazionale completo è necessario importare nuove stazioni (specialmente per l'Italia meridionale ed insulare) e procedere alla creazione dei TRY per le nuove località importate. Una volta raggiunta la copertura nazionale, con stazioni meteorologiche sufficientemente vicine, si potrà anche pensare di modificare la metodologia di "pulizia" dei buchi, utilizzando dei metodi di interpolazione spaziali, basati sulle misure effettuate da stazioni vicine fra di loro, metodi che nella presente ricerca non sono stati adottati vista la notevole distanza tra le stazioni a disposizione.

## Appendice A

# Censimento dei metodi di stima delle variabili meteorologiche mancanti

### A.1 Metodi di stima generici

Un'esigenza fondamentale per la costruzione di un TRY è quella di avere a disposizione delle serie storiche di dati meteorologiche complete. Questa esigenza, però, è spesso non soddisfatta a causa di possibili inconvenienti di funzionamento delle stazioni con periodi, a volte anche abbastanza lunghi, in cui manca la misura, o, più semplicemente, a causa dell'intervallo di acquisizione delle variabili registrate che sovente risulta essere triorario (o, in taluni casi, giornaliero) e non orario, come richiesto per la generazione del TRY. Un altro problema che si incontra spesso è la mancanza totale dei dati di radiazione solare, perché solo alcune stazioni misurano tale parametro; quindi, nasce l'esigenza di ricostruire tali valori da altri misurati, quali l'eliofania e la nuvolosità o di estrapolarli da stazioni vicine.

Le tecniche per la stima di valori climatici mancanti possono essere raggruppate in tre gruppi [46]:

- metodi empirici,
- metodi statistici,
- interpolazione mediante funzioni.

Negli *approcci empirici*, i valori mancanti sono calcolati da una somma pesata sulla distanza dei dati e la funzione peso è generalmente predeterminata. Essi includono semplici medie aritmetiche, interpolazione sull'inverso della distanza e tecniche basate su differenze e percentuali.

Nelle *tecniche statistiche* i valori mancanti sono ancora stimati con una somma pesata dei dati in ingresso, ma in questo caso i pesi sono basati su statistiche di covarianza spaziale dei dati. Tali tecniche includono: analisi di regressione multipla, analisi di discriminazione multipla, analisi di componenti principali e analisi dei cluster, tecniche di kriging e interpolazione ottimale.

Per quanto riguarda la stima utilizzando delle funzioni, i dati sono interpolati usando una funzione che in genere è “thin-plate spline”. Per ogni variabile di interesse per la generazione del TRY sono stati sviluppati differenti *metodi di interpolazione*. Alcuni di essi sono applicabili indifferentemente qualunque sia la variabile meteorologica da stimare, basandosi però più spesso sulle misure in stazioni vicine.

Di seguito verranno esposti brevemente questi ultimi metodi e quindi verranno analizzati, variabile per variabile, i restanti.

Il primo e più semplice metodo di interpolazione è l’interpolazione lineare, usata sovente quando è necessario stimare le variabili orarie da misure triorarie. Un miglioramento a tale metodo è dato dall’interpolazione cubica (o spline cubiche) che fornisce una stima migliore del dato mancante, ed è anche efficiente per concatenare i mesi scelti, appartenenti ad anni diversi, per formare l’anno tipico. In tale caso si usa un polinomio di terzo grado per interpolare i dati mancanti, che viene calcolato ponendo condizioni di continuità in ogni punto per il polinomio stesso e le sue derivate.

Altri metodi, che sfruttano i dati registrati da stazioni vicine a quella in cui manca il dato, sono [46]:

- *Media aritmetica semplice*: i dati mancanti sono ottenuti da una media aritmetica dei dati registrati dalle cinque stazioni più vicine.
- *Inverse distance interpolation*: in questo caso il valore mancante viene calcolato mediante la seguente formula:

$$V_0 = \frac{\sum_{i=1}^n (V_i/d_i)}{\sum_{i=1}^n (1/d_i)}, \quad (\text{A.1})$$

dove  $V_0$  è il valore stimato del dato mancante,  $V_i$  è il valore della  $i$ -esima stazione più vicina e  $d_i$  è la distanza tra la stazione con il dato mancante e la  $i$ -esima più vicina. Un tale metodo suggerisce che la scelta appropriata del raggio di influenza sia più importante di un eventuale peso da assegnare nella determinazione della qualità della stima.

- *Normal ratio method*: tale metodo di interpolazione spaziale stima dati mancanti mediante una combinazione di variabili con differenti pesi:

$$V_0 = \frac{\sum_{i=1}^n W_i \cdot V_i}{\sum_{i=1}^n W_i}, \quad (\text{A.2})$$

dove  $W_i$  è il peso della  $i$ -esima stazione più vicina e  $V_i$  è il dato misurato in tale stazione.

- *Analisi di regressione multipla, criterio delle deviazioni assolute minime*: l’analisi di regressione multipla è un approccio di interpolazione tradizionale. Il dato mancante  $V_0$



viene stimato mediante la seguente formula:

$$V_0 = a_0 + \sum_{i=1}^n (a_i \cdot V_i), \quad (\text{A.3})$$

dove i coefficienti  $a_0, a_1, \dots, a_n$  sono i coefficienti di regressione e  $V_i$  è il valore della variabile misurato dalla  $i$ -esima stazione.

I paragrafi seguenti riportano una breve descrizione dei metodi specifici per ogni singola variabile meteorologica maggiormente utilizzati.

### A.2 Metodi di stima della Temperatura

Un primo esempio di interpolazione è dato dal calcolo dei valori mancanti utilizzato dall'NSRDB (National Solar Radiation Data Base), che calcola solo quei dati mancanti usati per la stima della radiazione solare (vengono quindi anche tralasciati i valori notturni). Tali dati sono, oltre alla temperatura di bulbo asciutto, anche:

- copertura del cielo totale o parziale,
- pressione atmosferica,
- umidità relativa.

Se i dati mancanti non superano le cinque ore consecutive la NSRDB li calcola usando una semplice interpolazione lineare. Per intervalli dalle 6 alle 47 ore consecutive, i dati mancanti vengono riempiti usando i dati rilevati di giorni adiacenti per le stesse ore di quelli mancanti ed aggiustandoli in modo da evitare dei bruschi cambiamenti tra i dati ricostruiti e quelli misurati. Se il gap supera le 48 ore, fino ad un massimo di un anno, i dati vengono ricostruiti scegliendo da un altro anno i dati relativi allo stesso periodo mancante. La scelta dell'anno da cui prendere i dati viene fatta basandosi sulla somiglianza dei dati prima e dopo il gap dei due anni considerati (quello con il gap e quello da cui prendere i dati).

Un altro modello per la stima della temperatura di bulbo asciutto nel caso in cui manchino due misure triorarie consecutive (sei ore) è il seguente [47]:

$$T_t = T_{min} + a_t(T_{max} - T_{min}) \quad (\text{A.4})$$

dove  $T_t$  è la temperatura all'ora  $t$ ,  $T_{max}$  e  $T_{min}$  sono il massimo ed il minimo giornalieri e  $a_t$  è una funzione di  $t$ . Da un breve esame di alcuni dati triorari appare ragionevole assumere  $a_t$  costante per un dato mese ed ora.

In tale modo la relazione precedente può essere usata per stimare il secondo dei valori mancanti, usando un valore medio precalcolato per  $a_t$  per un dato mese ed una data ora, e quindi stimare il primo dei valori mancanti mediante un'interpolazione lineare. Ovvia-

mente una tale procedura può essere usata qualunque sia il numero di valori mancanti.

Esistono, inoltre, altri metodi, particolarmente complessi, che utilizzano delle analisi in serie temporali [48]. Per esempio una trasformata di Fourier [49] può essere utilizzata per identificare i cicli importanti da utilizzare in una serie di Fourier che quindi rappresenta la funzione media per il dato. L'equazione che si può usare è la seguente:

$$y_i = \beta_1 + \beta_2 \cos\left(\frac{2\pi}{24}t\right) + \beta_3 \sin\left(\frac{2\pi}{24}t\right) + \beta_4 \cos\left(\frac{4\pi}{24}t\right) + \beta_5 \sin\left(\frac{4\pi}{24}t\right) + \beta_6 \cos\left(\frac{6\pi}{24}t\right) + \beta_7 \sin\left(\frac{6\pi}{24}t\right) \quad (\text{A.5})$$

dove  $\beta_1$  genera la media giornaliera. Per determinare i valori ottimali dei coefficienti è possibile usare il metodo di regressione QR [50]. Tale procedura può essere usata anche per il calcolo di valori mancanti di radiazione solare globale. Per maggiori dettagli su tale metodo si rimanda alla bibliografia.

### A.3 Metodi di stima dell'Umidità relativa

Per il calcolo dell'umidità relativa i valori mancanti possono essere stimati usando relazioni psicometriche e le temperature di bulbo asciutto e del punto di rugiada, per esempio utilizzando la seguente relazione [40]:

$$RH = \left( \frac{173 - 0.1Tdb + Tdp}{173 + 0.9Tdb} \right)^8 [\%] \quad (\text{A.6})$$

dove RH indica l'umidità relativa, Tdb la temperatura di bulbo asciutto, Tdp la temperatura del punto di rugiada.

In alternativa, è possibile procedere mediante una regressione lineare multipla su radiazione globale e umidità relativa oraria precedente [28]:

$$RH_{i,h} = a_m + b_m \cdot G_{i,h} + c_m \cdot RH_{i,h-1}, \quad (\text{A.7})$$

dove  $RH_{i,h}$  è l'umidità relativa all'ora h del giorno i,  $G_{i,h}$  è la radiazione globale all'ora h del giorno i e  $a_m, b_m, c_m$  sono i parametri del modello per il cui valore si rimanda alle referenze. Il pedice "m" denota il mese.

### A.4 Metodi di stima della Radiazione solare

Per quanto riguarda la radiazione solare è necessario distinguere tra radiazione globale, diffusa e diretta. Se si ha a disposizione la radiazione globale e una tra la diffusa e la diretta è possibile stimare la terza variabile mediante le seguenti formule [48]:

$$\begin{cases} D_N = \frac{G+D}{\sin \alpha} \\ D = G - D_N \sin \alpha \end{cases}$$

dove  $\alpha$  è l'altitudine solare e  $G$ ,  $D$ ,  $D_N$  rappresentano rispettivamente la radiazione globale, quella diffusa e la diretta.

In alternativa si possono utilizzare i metodi di interpolazione seguenti suddivisi per tipo di Radiazione solare [28].

### Radiazione globale

Un modo di procedere è eseguire l'interpolazione lineare di valori orari della radiazione globale:

$$G_{i,h} = G_{0,h} + \frac{(G_{N+1,h} - G_{0,h}) \cdot i}{N + 1} \quad (\text{A.8})$$

dove  $G_{i,h}$  è la radiazione globale per l'ora "h" del giorno "i",  $G_{0,h}$  è la radiazione globale per l'ora "h" dell'ultimo giorno prima del gap,  $G_{N+1,h}$  è la radiazione globale per l'ora "h" del primo giorno dopo il gap, "i" è il numero del giorno all'interno del gap e "N" è il numero totale di giorni mancanti.

L'interpolazione lineare può essere anche "pesata", usando come fattore di peso la durata di insolazione giornaliera:

$$G_{i,h} = S_i \cdot \left[ \frac{G_{0,h}}{S_0} + \frac{\left( \frac{G_{N+1,h}}{S_{N+1}} - \frac{G_{0,h}}{S_0} \right) \cdot i}{(N + 1)} \right], \quad (\text{A.9})$$

dove  $G_{i,h}$ ,  $G_{0,h}$ ,  $G_{N+1,h}$ ,  $i$  e  $N$  sono quelli definiti precedentemente,  $S_0$  è la durata di insolazione per l'ultimo giorno prima del gap,  $S_{N+1}$  è la durata di insolazione del primo giorno dopo il gap.

Usando come fattore di peso il seno dell'altitudine solare, l'interpolazione lineare può essere eseguita nel seguente modo:

$$G_{i,h} = \sin(a_{i,h}) \cdot \left[ \frac{G_{0,h}}{\sin(a_{0,h})} + \frac{\left( \frac{G_{N+1,h}}{\sin(a_{N+1,h})} - \frac{G_{0,h}}{\sin(a_{0,h})} \right) \cdot i}{(N + 1)} \right], \quad (\text{A.10})$$

dove  $G_{i,h}$ ,  $G_{0,h}$ ,  $G_{N+1,h}$ ,  $i$  e  $N$  sono quelli definiti precedentemente,  $a_{i,h}$  è l'altitudine per l'ora h del giorno i,  $a_{0,h}$  l'altitudine solare per l'ora h dell'ultimo giorno prima del gap,  $a_{N+1,h}$  è l'altitudine solare per l'ora h del primo giorno dopo il gap.

Un modello di regressione lineare della radiazione globale sul seno dell'altitudine solare è il seguente:

$$G_{i,h} = b_m \cdot \sin(a_{i,h}), \quad (\text{A.11})$$

dove  $G_{i,h}$  è la radiazione globale per l'ora  $h$  del giorno  $i$ ,  $a_{i,h}$  è la rispettiva altitudine solare e il pedice  $m$  indica il mese. Per i valori dei parametri del modello  $b_m$  si rimanda alla bibliografia.

Il modello di regressione lineare multipla della radiazione solare sul seno dell'altitudine e la corrispondente radiazione diffusa è, invece, dato da:

$$G_{i,h} = b_m \cdot a_{i,h} + c_m \cdot D_{i,h}, \quad (\text{A.12})$$

dove  $D_{i,h}$  è la radiazione diffusa per l'ora  $h$  del giorno  $i$ . Ancora una volta si rimanda alla bibliografia per i valori dei parametri del modello.

#### Radiazione diffusa

L' interpolazione lineare dei valori orari della radiazione diffusa è ottenibile mediante l'equazione A.13

$$D_{i,h} = D_{0,h} + \frac{(D_{N+1,h} - D_{0,h}) \cdot i}{N + 1}, \quad (\text{A.13})$$

dove il significato delle varie variabili è lo stesso di quelle usate per la radiazione globale solo che adesso  $D$  rappresenta la radiazione solare diffusa.

Analogamente a quanto già presentato, l'interpolazione lineare pesata, usando come un fattore di peso il seno dell'altitudine solare, è data dall'equazione A.14:

$$D_{i,h} = \sin(a_{i,h}) \cdot \left[ \frac{D_{0,h}}{\sin(a_{0,h})} + \frac{\left( \frac{D_{N+1,h}}{\sin(a_{N+1,h})} - \frac{D_{0,h}}{\sin(a_{0,h})} \right) \cdot i}{N + 1} \right]. \quad (\text{A.14})$$

Ancora una volta del tutto analoga alla relazione usata per la radiazione globale, il modello di regressione lineare sul seno dell'altitudine solare è:

$$D_{i,h} = b_m \cdot \sin(a_{i,h}). \quad (\text{A.15})$$

Infine il modello di regressione lineare multipla, sul seno dell'altitudine solare e la

corrispondente radiazione globale, si ottiene da:

$$D_{i,h} = b_m \cdot a_{i,h} + c_m \cdot G_{i,h} \quad (\text{A.16})$$

#### A.4.1 Metodi di stima della radiazione solare da altre variabili meteorologiche

Particolare attenzione va data, inoltre, ai differenti metodi per la generazione del dato di radiazione solare a partire da altre misure quali l'eliofania o la copertura del cielo. Infatti la maggior parte delle stazioni meteorologiche non ha il sensore per la radiazione, oppure le serie storiche disponibili di tale variabile non sono sufficientemente lunghe per una corretta generazione del TRY, in quanto le misure sono cominciate in tempi relativamente recenti.

Tali metodi si possono suddividere in due categorie [51]:

- modelli parametrici, che necessitano di dettagliate informazioni delle condizioni atmosferiche, come l'ammontare e la distribuzione delle nuvole, eliofania, turbolenza atmosferica, precipitazioni,
- modelli a decomposizione, che generalmente utilizzano informazioni relative alla sola radiazione globale, per la stima della radiazione diretta e diffusa.

Uno dei primi modelli ad essere sviluppati è stato quello di Angström [52] che mette in relazione il tasso giornaliero di radiazione globale  $G_t$  e la radiazione "a cielo sereno"  $G_c$  con la frazione giornaliera media mensile di possibile insolazione  $S_f$  (adimensionale):

$$\frac{G_t}{G_c} = a_1 + b_1 S_f, \quad (\text{A.17})$$

dove,  $a_1$  e  $b_1$  sono delle costanti, dipendenti dalla località ed  $S_f$  è data da

$$S_f = \frac{S}{S_0}, \quad (\text{A.18})$$

con  $S$  che rappresenta il numero medio mensile di ore di sole misurate dallo strumento ed  $S_0$  la lunghezza media del giorno, cioè le ore di sole extraatmosferiche. In tale modello  $a_1 + b_1 = 1$  in quanto si suppone che nei giorni sereni  $S_f$  sia pari ad uno.

Questo modello fu perfezionato da Prescott nel 1940, a causa della difficoltà del calcolo di  $G_c$ :

$$\frac{G_t}{G_0} = a_1 + b_1 \frac{S}{S_0}, \quad (\text{A.19})$$

dove  $G_t$  e  $G_0$  sono la radiazione giornaliera media mensile rispettivamente globale ed extraterrestre.

Il significato fisico dei coefficienti  $a_1$  e  $b_1$  è immediato:

- $a_1$  rappresenta la percentuale di radiazione solare extraatmosferica che giunge a terra (sul piano orizzontale) in un giorno senza ore di sole ( $S=0$ ),

## A. Censimento dei metodi di stima delle variabili meteorologiche mancanti

-  $a_1 + b_1$  è la percentuale che arriva in un giorno completamente sereno.

Per il calcolo dei coefficienti  $a_1$  e  $b_1$  sono stati sviluppati numerosi metodi (che in realtà sono tentativi di sofisticazione del modello puramente regressivo), di cui si riportano alcuni esempi nella Tabella A.1 [51].

Referenze	$a_1$	$b_1$	Località
Rietveld [53]	$0.1 + 0.24 \langle \frac{S}{S_0} \rangle$	$0.38 + 0.008 \langle \frac{S}{S_0} \rangle$	World-wide (42 località) $6^\circ < \Phi < 69^\circ$
Rietveld semplificato [53]	0.18	0.62	World-wide (42 località) $6^\circ < \Phi < 69^\circ$
Iqbal [54]	$0.29 \cos \Phi$	0.52	$\Phi < 60^\circ$
Bahel et al.[55]	0.175	0.552	Dhahran, Saudi Arabia, $17^\circ < \Phi < 27^\circ$
Gopinathan [56]	$-0.309 + 0.539 \cos \Phi$ $-0.0693h + 0.29 \frac{S}{S_0}$	$1.527 - 1.028 \cos \Phi$ $+0.0926h - 0.359 \frac{S}{S_0}$	World-wide $5^\circ < \Phi < 54^\circ$
Alnaser [57]	0.2843	0.4509	Bahrain $\Phi = 27^\circ$
Louche et al.[58]	0.206	0.546	Southern France $\Phi = 42^\circ$
Srivastava et al. [59]	0.2006	0.5313	Northern India $\Phi = 27^\circ$

**Tabella A.1:** Alcuni esempi dei coefficienti di regressione  $a_1$  e  $b_1$  usati in differenti modelli.

Il modello Angström-Prescott diventa la base per gli sviluppi futuri che portano all'aggiunta di variabili ulteriori quali la latitudine, l'elevazione della località sul livello del mare, le proprietà ottiche della copertura nuvolosa e così via.

Una correlazione, supposta come valida per qualunque località, è data dall'equazione A.20 [60]:

$$\frac{G_t}{G_0} = \frac{0.1572 + 0.556 \left( \frac{S}{S_{om}} \right)}{1 - \rho_g \left[ \rho_a \left( \frac{S}{S_{om}} \right) - \rho_c \left( 1 - \frac{S}{S_{om}} \right) \right]}, \quad (\text{A.20})$$

dove  $\rho_g$  (adimensionale) è l'albedo a livello del suolo,  $\rho_a$  è l'albedo in condizioni di cielo completamente libero da nuvole e preso pari a 0.25 e  $\rho_c$  è l'albedo delle nuvole preso pari 0.6.  $S_{om}$  (h) è la lunghezza giornaliera modificata per l'angolo solare di zenit  $\theta_z$  maggiore di  $85^\circ$  ed è data dalla seguente relazione:

$$S_{om} = \frac{1}{7.5} \cos^{-1} \left( \frac{\cos 85 - \sin \Phi \sin \delta_c}{\cos \Phi \cos \delta_c} \right), \quad (\text{A.21})$$

dove  $\delta_c$  (in gradi) è la declinazione della caratteristica, cioè la declinazione alla quale l'irradiazione extraterrestre è identica al suo valore medio mensile.

Esiste, inoltre, un modello quadratico basato sulla relazione data dall'equazione A.22 [61]:

$$\frac{G_t}{G_0} = 0.145 + 0.845R_s - 0.280R_s^2, \quad (\text{A.22})$$

dove  $R_s$  è il rapporto tra  $S$  e  $S_0$ , rispettivamente la durata di insolazione giornaliera misurata e teorica.

Tale metodo si è dimostrato particolarmente indicato per la stima della radiazione solare per stazioni in Italia [62].

Il modello trigonometrico sviluppato da Coppolino [63] è dato dall'equazione A.23:

$$\frac{G_t}{G_0} = 0.67R_s^{0.45} \sin^{0.05}(h_\alpha) \quad (\text{A.23})$$

per  $0.15 \leq R_s \leq 0.90$

dove  $h_\alpha$  è l'angolo di altitudine solare a mezzogiorno del sole il 15 del mese. L'angolo di altitudine solare è il complementare dell'angolo di zenit e può essere calcolato mediante la relazione  $h_\alpha = 90 - \Phi + \delta$ . Questo modello è stato verificato usando dati di 34 stazioni italiane.

Infine va citato il modello logaritmico-lineare [64]:

$$\frac{G_t}{G_0} = 0.34 + 0.40R_s + 0.17 \ln(R_s). \quad (\text{A.24})$$

Tra i modelli parametrici figurano anche il modello Iqbal [54] ed il modello ASHRAE [65] per la cui analisi si rimanda alla bibliografia.

## A.5 Generazione stocastica di dati meteorologici

È possibile, inoltre, procedere ad una generazione stocastica di dati meteorologici mancanti. Esistono attualmente numerosi generatori di dati meteorologici riconosciuti [66]. Tra questi, quelli più usati sono:

- WGEN [67],
- LARS-WGEN [68],[69], [70],
- WXGEN [71], [72],
- CLIGEN [73], [74] [75].

Il modello WGEN è uno dei primi generatori stocastici di dati meteorologici. Esso si basa sul fatto che per sviluppare un modello di simulazione per le variabili meteo di interesse, bisogna sviluppare delle relazioni stocastiche per caratterizzare i processi meteorologici basilari. I processi sono dipendenti dal tempo per ciascuna variabile ed interdipendenti tra le quattro variabili considerate in tale modello: temperatura dell'aria giornaliera massima e minima, precipitazione giornaliera e radiazione solare giornaliera. L'approccio fondamentale di tale modello è quello di considerare la precipitazione giornaliera come la variabile principale e quindi assegnare delle condizioni sulle altre tre variabili restanti in relazione se il giorno considerato è "bagnato" o "asciutto".

Nel modello WGEN, una catena di Markov al primo ordine è usata per descrivere l'alternarsi di giorni bagnati o asciutti e la probabilità di pioggia per un dato giorno è condizio-

## A. Censimento dei metodi di stima delle variabili meteorologiche mancanti

nata dallo stato asciutto o bagnato dei giorni precedenti. Nei giorni piovosi, viene usata una distribuzione esponenziale per calcolare l'ammontare totale di pioggia. Per quanto riguarda gli altri modelli citati si rimanda alla bibliografia.

È inoltre necessario ricordare anche il modello GEM (Generation of weather Elements for Multiple applications) sviluppato dalla NRCS (National Water and Climate Center a Portland, Oregon), che mostra molti miglioramenti significativi rispetto ai modelli precedentemente citati, quali, per esempio, l'aggiunta di nuove variabili meteorologiche, come il vento, e metodi per la generazione di dati ad intervalli orari.



## Appendice B

# Consultazione on-line dei TRY generati

I TRY generati verranno presto resi disponibili agli utenti mediante la creazione di un sito internet da cui sarà possibile scaricarli.

L'homepage del sito per scaricare i TRY generati è riportata in Figura B.1



Done

**Figura B.1:** Homepage del sito da cui è possibile scaricare i TRY generati.

Le stazioni sono suddivise per regione.

## B. Consultazione on-line dei TRY generati

La scelta può essere effettuata in base alla regione, oppure in base al TRY di interesse, o entrambi, o ancora essere specifica per una stazione e per un tipo di TRY.

Se, per esempio si seleziona “Trentino” e “tutti i TRY”, cliccando sul pulsante “estrai” si accede alla pagina mostrata in Figura B.2. Le stazioni sono riportate in ordine alfabetico. Come si può vedere da qui è possibile scaricare direttamente il TRY di interesse oppure accedere, utilizzando i link attivi su ogni TRY generato, all’anagrafica della stazione con le specifiche del TRY selezionato.

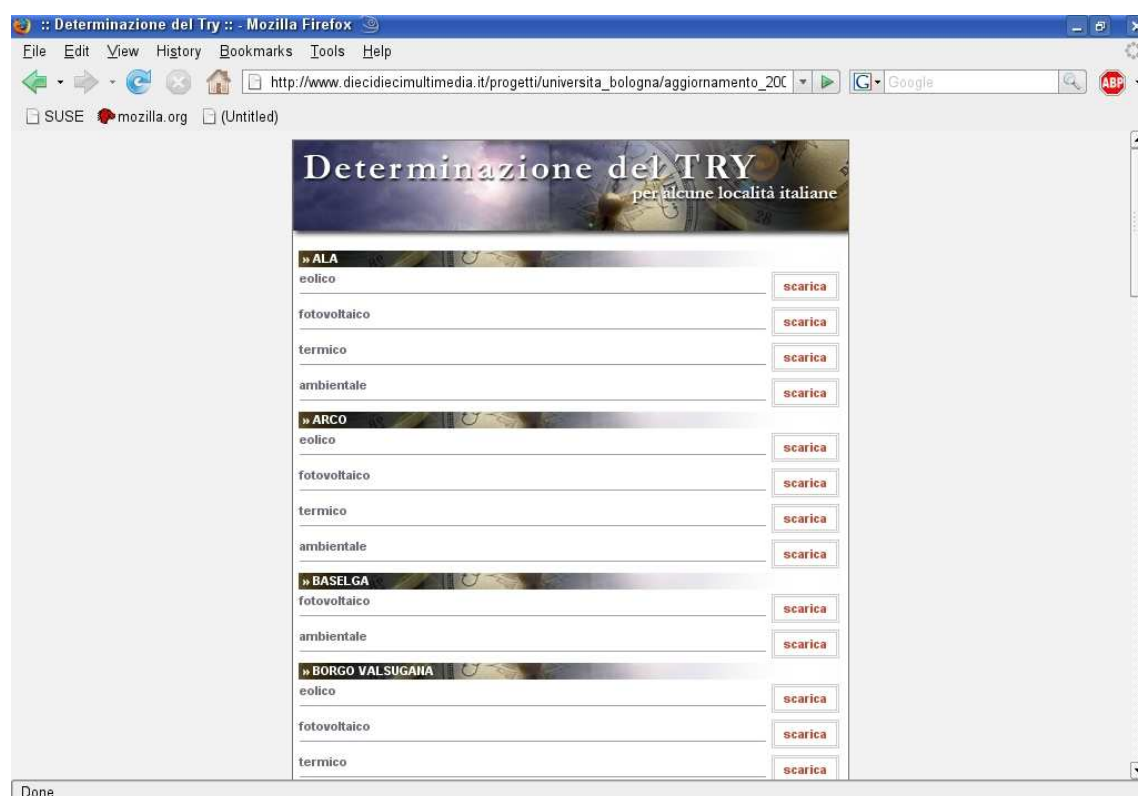


Figura B.2: Esempio di selezione di tutti i TRY prodotti per un'intera regione.

Per esempio, se si seleziona il TRY fotovoltaico della stazione di Metaponto si accede alla pagina mostrata in Figura B.3.

Nell’anagrafica sono riportati i dati geografici relativi alla stazione selezionata, cioè latitudine, longitudine e altezza sul livello del mare; quindi il tipo di TRY selezionato con le variabili che saranno fornite; gli anni da cui sono stati estratti i mesi tipici, il totale dei rilevamenti forniti, specificando quanti di questi sono stati ricostruiti, ed infine, per ogni mese tipico l’anno da cui esso è stato estratto. Anche da questa pagina è possibile scaricare il file, semplicemente cliccando sul pulsante “scarica file”. Il file è un file di testo denominato in genere “nomestazione.tipoTRY.txt” (in questo caso “Metaponto\_fotovoltaico.txt”). I file sono di dimensione contenuta, dell’ordine dei 450 Kb. In essi sono riportate le variabili di interesse per la particolare applicazione selezionata, e sono elencate, come già detto, nella pagina anagrafica. La prima riga del file è una riga di inte-

**Determinazione del TRY**  
per alcune località italiane

**METAPONTO**

Regione: basilicata

Altitudine:

Longitudine: 16° 47' direzione E

Latitudine: 40° 23' direzione N

Descrizione: Dati forniti da A.L.S.I.A.

Try selezionato: fotovoltaico

Codice Nome Variabile

- 1 Radiazione orizzontale.
- 8 Temperatura

Mesi usati per la selezione del try

Mese	Anni
1	1996, 1997, 1998, 1999, 2001, 2002, 2003, 2004, 2005,
2	1997, 1998, 1999, 2001, 2002, 2003, 2004, 2005,
3	1996, 1997, 1998, 1999, 2001, 2002, 2003, 2004, 2005,
4	1996, 1997, 1998, 1999, 2001, 2002, 2003, 2004, 2005,
5	1996, 1997, 1998, 1999, 2000, 2001, 2002, 2003, 2004, 2005,
6	1996, 1997, 1998, 1999, 2000, 2001, 2002, 2003, 2004, 2005,
7	1996, 1997, 1998, 1999, 2000, 2001, 2002, 2003, 2004, 2005,
8	1996, 1997, 1998, 1999, 2000, 2001, 2002, 2003, 2004, 2005,
9	1996, 1997, 1998, 1999, 2000, 2001, 2002, 2003, 2004, 2005,
10	1996, 1997, 1998, 1999, 2000, 2001, 2002, 2004, 2005,
11	1996, 1997, 1998, 1999, 2000, 2001, 2002, 2003, 2004, 2005,
12	1996, 1997, 1998, 1999, 2001, 2002, 2003, 2004, 2005,

Totale rilevamenti 17520

Totale rilevamenti ricostruiti 5

Mese	Anno
1	1999
2	2003
3	1997
4	2004
5	2001
6	2005
7	2002
8	2002
9	2002
10	2000
11	2004
12	2002

scarica file

Indietro

DIENCA  
Dipartimento di Ingegneria Energetica, Nucleare  
e del Controllo Ambientale

ALMA MATER STUDIORUM  
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

Figura B.3: Schermata dell'anagrafica relativa al TRY fotovoltaico della stazione di Metaponto.

## B. Consultazione on-line dei TRY generati

---

stazione, che riassume le variabili con le unità di misura utilizzate. Quando una variabile non è utilizzata per quella applicazione, essa non viene riportata nel file e la sua colonna contiene la sigla -999. Un estratto di tale file è riportato in Tabella B.1.

"mese"	"giorno"	"ora"	"global solar (kJ/hr)"	"dry bulb T (decimi (gradi C))"	"humidity ratio (%)"	"wind velocity (V10) (dm/s)"	"wind direction (D10) (gradi)"	"Pressure (station)"
1	1	0	0	12.47	-999	-999	-999	-999
1	1	1	0	18.79	-999	-999	-999	-999
1	1	2	0	14.91	-999	-999	-999	-999
1	1	3	0	13.08	-999	-999	-999	-999
1	1	4	0.0172236	15.71	-999	-999	-999	-999
1	1	5	0.056949	26.47	-999	-999	-999	-999
1	1	6	0.106953	34.08	-999	-999	-999	-999
1	1	7	0.106953	39.28	-999	-999	-999	-999
1	1	8	1.44373	51.32	-999	-999	-999	-999
1	1	9	8.03398	55.38	-999	-999	-999	-999
1	1	10	17.4681	61.93	-999	-999	-999	-999
1	1	11	28.5301	85.9	-999	-999	-999	-999
1	1	12	6.28939	85.9	-999	-999	-999	-999

**Tabella B.1:** Estratto del file "Metaponto\_fotovoltaico.txt".

Se, invece, viene selezionata una stazione specifica e tutti i TRY si accederà ad una pagina analoga a quella mostrata in Figura B.4 dove ora saranno visibili solo i TRY relativi alla stazione selezionata, come mostrato in Figura B.4, in cui è stata selezionata la stazione di Piubega (MN).

In tutte le pagine è ovviamente presente il pulsante "indietro" che permette di tornare alla pagina precedente. Come si può facilmente notare la procedura per il download dei TRY è estremamente semplice, e la struttura del sito permette di selezionare il TRY desiderato in base alle differenti esigenze dell'utente.

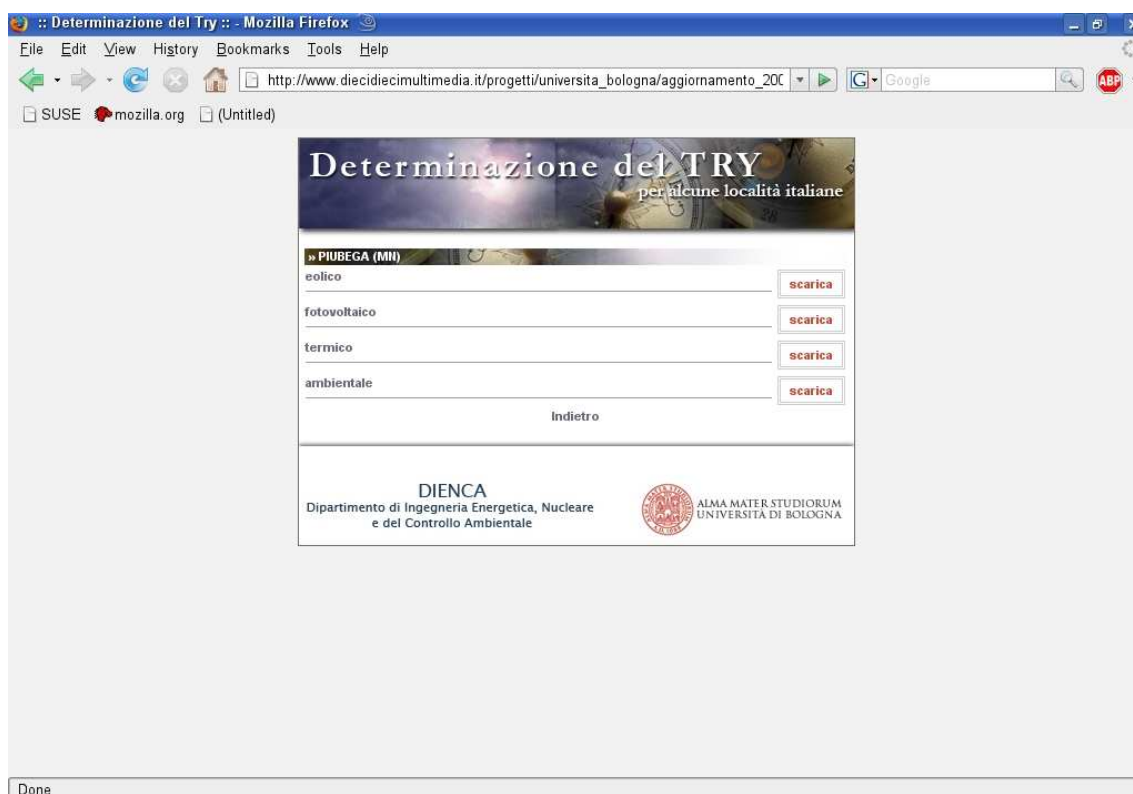


Figura B.4: Esempio di selezione di tutti i TRY prodotti in una stazione specifica.



# Ringraziamenti

Parte di questo lavoro è stato possibile grazie al Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare.

Per la grande disponibilità dimostrata, i numerosi consigli e la dettagliata revisione di tutto il presente lavoro, merita un ringraziamento particolare il Prof. Vestrucci, che, nonostante i suoi numerosi impegni, ha sempre trovato il tempo di seguirmi e guidarmi nella presente ricerca.

Un ringraziamento speciale va alla mia famiglia per il costante supporto ed affetto che mi dà incondizionatamente: grazie perché non mi avete mai lasciato sola.

Infine ringrazio Francesca: mia amica "dalla culla" che nel corso degli anni è diventata per me come una sorella e ha avuto la pazienza di ascoltare i miei interminabili resoconti su come procedeva il lavoro; Boob, Marc, K+: amici più recenti ma non per questo meno affezionati; il piccolo Daniele che, sebbene sia con noi solo da pochi mesi, con i suoi sorrisi è capace di fare splendere sempre il sole.





# Bibliografia

- [1] Lam J.C., Hui S.C.M., and Chan A.L.S. A statistical approach to the development of a typical meteorological year for Hong Kong. *Architectural Science Review*, 39:201–209, 1996.
- [2] Hui S. C. M. *Energy performance of air-conditioned buildings in Hong Kong*. PhD thesis, City University of Hong Kong, 1996.
- [3] Crow L.W. Development of hourly data for weather year for energy calculations (WYEC), including solar data, at 21 stations throughout the U.S. *ASHRAE Trans*, 87(Part 1):896–906, 1981.
- [4] Holmes M.J. and Hitchin E.R. An example year for the calculation of energy demand in buildings. *Building Services Engineer*, 45(10):186–189, 1978.
- [5] National Climatic Center, Asheville, North Carolina. *Test Reference Year (TRY) Tape Reference Manual*, September 1976.
- [6] National Climatic Center, Asheville, North Carolina. *Typical Meteorological Year User Manual*, May 1981. Hourly Solar Radiation Surface Meteorological Observations.
- [7] Marion U. and Urban K. *User's manual for TMY2s typical meteorological years*. USA National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, USA, 1995.
- [8] Wilcox S. and Marion W. *Users Manual for TMY3 Data Sets*. USA National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, USA, May 2008.
- [9] Crow L.W. Weather year for energy calculations. *ASHRAE Journal*, 26(61):42–47, 1984.
- [10] Siurna D.L., D'Andrea L.J., and Hollands K.G.T. A Canadian representative meteorological year for solar system simulation. In *Proc. of the 10th Annual Conference of the Solar Energy Society of Canada (SESCI)*, pages 85–88, 2-6 August 1984. Calgary, Alberta.
- [11] Lund H. and Eidorff S. Selection methods for production of Test Reference Years Final Report, Short Version. Technical report, Thermal Insulation Laboratory, Technical University of Denmark, 1980.

- 
- [12] Gabriellsson J. and Wiljanen H. A weather model for indoor thermal calculations. *Building and Environment*, 29(3):345–351, 1994.
- [13] Lund H. Short reference years and test reference years for EEC countries: Final report, EUR 10208 EN. Technical report, Thermal Insulation Laboratory, Technical University of Denmark, 1985.
- [14] Lund H. The Design Reference Year. In *IBPSA Proceedings of Building Simulation '91*, pages 600–606, 1991.
- [15] Pissimanis D., Karras G., Notaridou V., and Gavra K. The generation of a typical meteorological year for the city of Athens. *Solar Energy*, 40(5):405–411, 1988.
- [16] Baizhan L. and Shegyuan T. A method of forming China meteorological data used for analyzing building annual energy consumption. *ASHRAE Trans*, 95(Part 2):259–262, 1989.
- [17] Fagbenle R.L. Generation of a test reference year for Ibadan, Nigeria. *Energy Conversion and Management*, 36(1):61–63, 1995.
- [18] Matsuo Y.H., Akasaka H., Ishino H., and Takizawa H. Study of standard weather data. *Journal of the Society of Heating, Air-Conditioning and Sanitary Engineers Japan*, 48(7):85–107, 1972. In Japanese.
- [19] Said S.A.M. and Kadry H.M. Generation of representative weather-year data for saudi arabia. *Applied Energy*, 48:131–136, 1994.
- [20] Benseman R.F. and Cook F.W. Solar radiation in New Zealand - the standard year and radiation on inclined slopes. *New Zealand Journal of Science*, 12:697–708, December 1969.
- [21] Wong W.L. and Ngan K.H. Selection of an example weather year for Hong Kong, (Technical Note). *Energy and Buildings*, 19:313–316, 1993.
- [22] Hui S.C.M. and Lam J.C. Test Reference year (TRY) for comparative energy study. *Hong Kong Engineer*, 20(2):13–16, 1992.
- [23] Lam J.C., Hui S.C.M., and Yuen R.K.K. Typical weather year for building energy simulation in Hong Kong. *Hong Kong Meteorological Society Bulletin*, 2(1):36–44, 1992.
- [24] Hall I.J., Prairie R.R., Anderson H.E., and Boes E.C. Generation of a typical meteorological year for 26 SOLMET stations. Technical Report SAND 78-1601, Sandia Laboratories, Albuquerque, New Mexico, USA, 1978.
- [25] Watsun Simulation Laboratory, University of Waterloo, Ontario. *User Manual: Engineering Data Sets of Hourly Weather Observations in WYEC2 Format (WYEC2 Files) and Canadian Weather for Energy Calculations (CWEC Files)*, 20 October 1992.

## Bibliografia

---

- [26] Argiriou A. CSHPSS systems in Greece: Test of simulation software and analysis of typical systems. *Solar Energy*, 60(3/4):159–170, 1997.
- [27] Pilatte A. and Nicolas P. Meteorological data-treatment of radiation data- Test upperc Reference Year, January 28-February 1 1980. Lecture Series 1980-2, Heat exchange and solar energy.
- [28] Argiriou A., Lykoudis S., Kontoyiannidis S., Balaras C.A., Asimakopoulos D., Petrakis M., and Kassomenos P. Comparison of methodologies for tmy generation using 20 years data for Athens. *Solar Energy*, 66(1):33–45, 1999.
- [29] Zinoni F. I dati meteorologici per le applicazioni modellistiche. In *Progetto Climagri, Atti del workshop*, 7-8 Marzo 2002. Roma.
- [30] Mariani L. Reti di osservazione e banche dati meteorologiche in italia. In *Progetto Climagri, Atti del workshop*, 7-8 Marzo 2002. Roma.
- [31] Micale F. Lo stato dei servizi agrometeorologici regionali in italia. In *Atti del Convegno AIAM2000*, 24 Maggio 2000. Roma.
- [32] Piazza A. L'importanza del sensore: raddoppiare i sensori. In *Atti del Workshop Nazionale in agrometeorologia AIAM99*, 4 Marzo 1999. Bologna.
- [33] Rossi Pisa P. Validazione dei dati in campo fisico. In *Atti del Workshop Nazionale in agrometeorologia AIAM99*, 4 Marzo 1999. Bologna.
- [34] Petrakis M., Lykoudis P., and Kassomenos P. A software tool for the crration of a Typical Meteorological Year. *Environmental Software*, 11:221–227, 1996.
- [35] Petrakis M. Director Institute for Environmental Research and Sustainable Development National Observatory of Athens. 2006. Comunicazioni personali.
- [36] Thevenard D.J. and Brunger A.P. The development of typical weather years for international locations: Part I, algorithms. *ASHRAE Trans*, 108(2):376–383, 2002.
- [37] Environmental Protection Agency. Meteorological monitoring guidance for regulatory modelling applications. *Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, NC, Document EPA-454/R-99-005*, February 2000.
- [38] Department of Environmental and Conservation (NSW). Approved methods for the modelling of air pollutants in new south wales. *Document DEC 2005/361, ISBN 1 74137 488 X*, August 2005.
- [39] Duffie J.A. and Beckman W.A. *Solar Engineering of thermal processes*. John Wiley & Sons, Inc., N.Y., 2nd edition edition, 1991.

- 
- [40] Kyoo Dong Song. Optimization of building shape with respect to building orientation and local climatic conditions. Master's thesis, submitted to the graduate faculty in partial fulfillment of the requirement for the Master of Architecture, Norman, Oklahoma., 1989.
- [41] Drake P.R. Using the analytic hierarchy process in engineering education. *Journal of Engineering Education*, 14(3):191–196, 1998.
- [42] Russell L. *Practical Statistics Simply Explained*. Dover Publication, Inc., New York, 1971.
- [43] Lindley D.V. and Scott W.F. *New Cambridge Statistical Tables*. Cambridge University Press, 1995.
- [44] U.S. Environmental Protection Agency. *User Instructions*. In: *User's Guide for the Industrial Source Complex (ISC3) Dispersion Models, vol. I*, 1995.
- [45] U.S. Environmental Protection Agency. *Description of Model Algorithms* In: *User's Guide for the Industrial Source Complex (ISC3) Dispersion Models, vol. II*, 1995.
- [46] Xia Y., Fabian P., Stohl A., and Winterhalter M. Forest climatology: estimation of missing values for Bavaria, Germany. *Agricultural and Forest Meteorology*, 96:131–144, 1999.
- [47] Walsh P.J., Munro M.C., and Spencer J.W. *An Australian data bank for use in the estimation of building energy use*. CSIRO Division of Building Research, 1983.
- [48] Ridley B. and Boland J. Quality control of climate data sets. In *Proceedings of Solar 2004: Life, the Universe and Renewables, 42nd Annual Conference of the Australian and New Zealand Solar Energy Society*, 2004.
- [49] Boland J. Time-series analysis of climate variables. *Solar Energy*, 55(5):377–388, 1995.
- [50] Pollock D.S.G. *A handbook of time-series analysis. Signal Processing and Dynamics*. London, Academic Press, 1999.
- [51] Wong L. T. and Chow W. K. Solar radiation model. *Applied Energy*, (69):191–224, 2001.
- [52] Angström A. Solar and terrestrial radiation. *Quarterly journal of Royal Meteorological Society*, (50):121–126, 1924.
- [53] Rietveld M.R. A new method for estimating the regression coefficients in the formula relating solar radiation to sunshine. *Agricultural Meteorology*, (19):243–352, 1978.
- [54] Iqbal M. *An introduction to solar energy*. Academic Press, Toronto, 1983.
- [55] Bahel V., Srinivasan R., and Bakhsh H. Solar radiation for Dhahran, Saudi Arabia. *Energy*, 11(10):985–989, 1986.

## Bibliografia

---

- [56] K.K. Gopinathan. A general formula for computing the coefficients of the correction connecting global solar-radiation to sunshine duration. *Solar Energy*, 41(6):499–502, 1988.
- [57] Alnaser W.E. Empirical correlation for total and diffuse radiation in Bahrain. *Energy*, 14(7):409–414, 1989.
- [58] Louche A., Notton G., Poggi P., and Simonnot G. Correlations for direct normal and global horizontal irradiances on a French Mediterranean site. *Solar Energy*, 46(4):261–266, 1991.
- [59] Srivastava S.K., Singh O.P., and Pandey G.N. Estimation of global solar-radiation in Uttar Pradesh (India) and comparison of some existing correlations. *Solar Energy*, 51(1):27–29, 1993.
- [60] Hay J.E. Calculation of monthly mean solar-radiation for horizontal and inclined surfaces. *Solar Energy*, 23(4):301–307, 1979.
- [61] Akinoglu B.G. and Ecevit A. Construction of a quadratic model using modified Angström coefficients to estimate global solar radiation. *Solar Energy*, 45:85–92, 1990.
- [62] Ampratwum D.B. and Dorvlo A.S.S. Estimation of solar radiation from the number of sunshine hours. *Applied Energy*, (63):161–167, 1999.
- [63] Coppolino S. A new correlation between clearness index and relative sunshine. *Renewable Energy*, 1994.
- [64] Newland F.J. A study of solar radiation models for the coastal region of South China. *Solar Energy*, 1989.
- [65] ASHRAE, Atlanta (GA). *ASHRAE handbook: HVAC application*, 1999.
- [66] Zhang Q. et al. The application of WGEN to simulate daily climatic data for several canadian stations. *Canadian Water Resources Journal*, 29(1):59–72, 2004.
- [67] Richardson C.W. and Wright D.A. WGEN: A model for generating daily weather variables. Technical report, U.S. Dept. Agric., 1984.
- [68] Racsko P., Szeidl L., and Semenov M.A. A serial approach to local stochastic weather models. *Ecological Modelling*, 57:27–41, 1991.
- [69] Semenov M.A. and Barrow E.M. Use of a stochastic weather generator in the development of climate change scenarios. *Climatic Change*, 35:397–414, 1997.
- [70] Semenov M.A., Brooks R.J., Barrow E.M., and Richardson C.W. Comparison of the WGEN and LARS-WGEN stochastic weather generators for diverse climates. *Climatic Change*, 10:95–107, 1998.

- [71] Williams J.R, Nicks A.D., and Arnold J.G. Simulator for water resources in rural basins. *Journal of Hydraulic Engineering*, 111(6):970–986, 1985.
- [72] Wallis T.W.R. and Griffiths J.F. An assessment of the weather generator (WX-GEN) used in the erosion productivity impact calculator. *Agricultural and Forest Meteorology*, 73:115–133, 1995.
- [73] Nicks A.D. Stochastic generation of the occurrence, pattern, and location of maximum amount of daily rainfall. In *Proceedings of the Symposium on Statistical Hydrology, Tucson, AZ*, pages 154–171, 1974.
- [74] Nicks A.D. *Stochastic Generation of Hydrologic Model Inputs*. PhD thesis, University of Oklahoma, Norman, 1975.
- [75] Nicks A.P. and Harp J.F. Stochastic generation of temperature and solar radiation data. *J. Hydrol.*, 48:1–17, 1980.