



INSTITUTO
SUPERIOR DE
AGRONOMIA
Universidade de Lisboa

Departamento de Ciências e
Engenharia de Biosistemas

HIDROLOGIA

$$P = \text{ET} + Q + Dr + \Delta A$$

2. Evaporação, interceção, transpiração e evapotranspiração

2.1 Conceitos

2.2 Medição da evaporação, interceção, transpiração e evapotranspiração

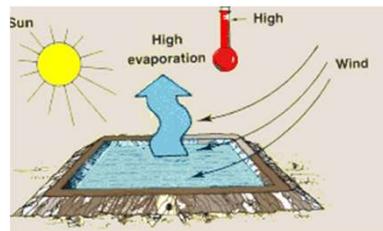
2.3 Cálculo da evaporação e evapotranspiração

2.4 Valores médios para Portugal continental

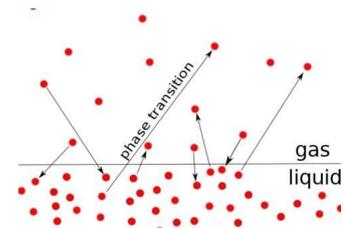
Área Disciplinar de Engenharia Rural

Evaporação (E)

- processo físico, em que a água passa do estado líquido para o estado gasoso, sendo removida da superfície evaporante;
- ocorre a partir de superfícies livres de água (lagos, rios) ou superfícies molhadas (solo, plantas);
- Taxa máxima de evaporação que ocorre no caso da superfície evaporante estar saturada (EP);
- É um processo puramente físico, pelo que depende apenas de fatores climáticos.



2.1 CONCEITOS



UC Hidrologia / 1º ciclo de Engs Agronômica, Ambiente e Florestal
Isabel Alves e M^{sc} Rosário Carneira / Área Disciplinar de Eng^o Rural

Para haver evaporação de água:

- Água
 - Plantas e solo molhados, superfície livre de massas de água (lagos, rios)
- Energia (calor latente de evaporação)
 - *Radiação solar (curto comprimento de onda)* Radiação líquida R_n
 - *Radiação terrestre (longo comprimento de onda)*

➔ A distribuição da radiação solar pelo planeta varia com

- Latitude
- Estação do ano

Evaporação elevada nas zonas tropicais relativamente às polares

- Remoção do vapor de água
 - ➔ gradiente de humidade: transporte por difusão ➢ e_s superfície' $(e_s - e_a)_{ar}$
 - ➔ Vento: transporte por convecção ➢ velocidade do vento

Temperatura do ar e da superfície evaporante

Evaporação mais elevada em

- zonas interiores do que próximo de massas de água;
- zonas abertas, sujeitas à ação do vento.

Área Disciplinar de Engenharia Rural

UC Hidrologia / 1º ciclo de Engs Agronômica, Ambiente e Florestal
Isabel Alves e M^{sc} Rosário Carneira / Área Disciplinar de Eng^o Rural

Transpiração (T)

Consiste:

- vaporização da água contida nos tecidos das plantas e
- remoção do vapor para o exterior através do estomas

É um processo com base

- física – depende dos fatores climáticos
- fisiológica - depende da abertura dos estomas →

- Tipo de cultura
- Fase do ciclo
- Disponibilidade de água no solo
- Práticas culturais

Área Disciplinar de Engenharia Rural

Evapotranspiração de um coberto vegetal (ET)

Os processos de evaporação e transpiração ocorrem em simultâneo

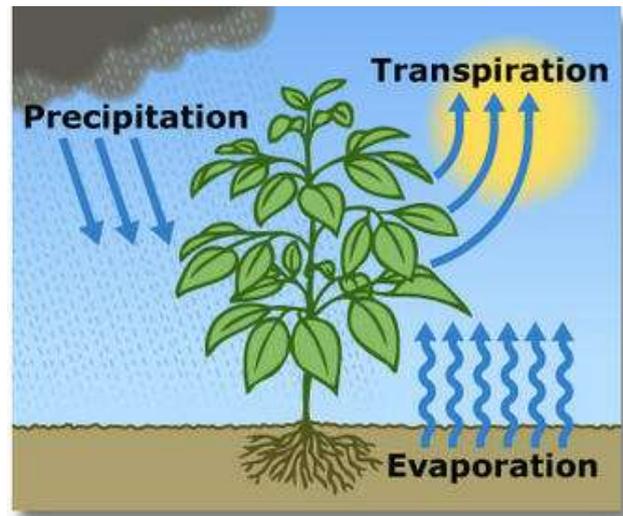
$$E + T = ET$$

Unidades mais usuais para ET:

- mm dia⁻¹
- m³ ha⁻¹ dia⁻¹

- MJ m⁻¹ dia⁻¹ λET

Calor latente de vaporização da água a 20 °C = 2.45 MJ kg⁻¹ ← Equivale a quantos mm de água?

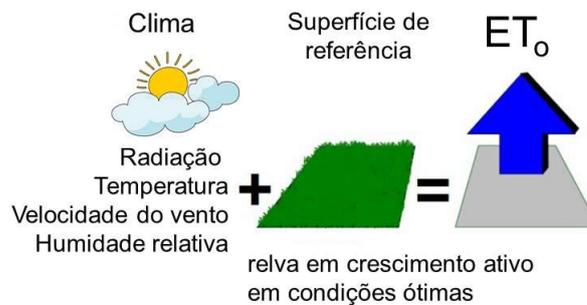


Área Disciplinar de Engenharia Rural

Evapotranspiração de referência (ET_o)

taxa de evapotranspiração de uma cultura de referência hipotética, para a qual se assume uma altura constante de 0.12 m, uma resistência de superfície constante de 70 s m⁻¹ e um albedo de 0.23, semelhante à evapotranspiração de um extenso coberto de relva verde de altura uniforme, em crescimento ativo, cobrindo totalmente o solo e bem abastecido de água.

Allen et al. (1998)
(FAO 56)



Área Disciplinar de Engenharia Rural

Evapotranspiração de referência (ET_o)

- conceito introduzido para estudar a demanda evaporativa da atmosfera independentemente do tipo de cultura , da fase do desenvolvimento a das práticas culturais.
- Apenas afetada por fatores climáticos
- É um fator climático, tal como a temperatura, a humidade relativa, etc.

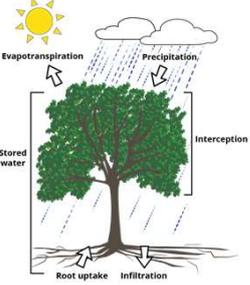
Área Disciplinar de Engenharia Rural

Valores típicos de ET_o consoante as regiões climáticas (mm dia⁻¹)

REGIÕES	TEMPERATURA MÉDIA DIÁRIA (°C)		
	10 °C	20 °C	> 30 °C
Tropicais e sub tropicais			
• húmidas e sub-húmidas	2 – 3	3 – 5	5 – 7
• áridas e semi-áridas	3 - 4	4 - 6	6 - 8
Temperadas			
• húmidas e sub-húmidas	1 – 2	2 – 4	4 – 7
• áridas e semi-áridas	1 - 3	4 - 7	6 - 9

Área Disciplinar de Engenharia Rural

UC Hidrologia / 1º ciclo de Engs Agronómica, Ambiente e Florestal
Isabel Alves e M.ª Rosário Carneira /Área Disciplinar de Eng.º Rural



INTERCEÇÃO

Fração de água de uma chuvada que é **retida pela vegetação** (ou outra superfície, como um telhado) e que se evapora





Pode representar uma fração importante **da precipitação total anual** em floresta:

- florestas de resinosas: 15 – 40%
- florestas de folhosas: 10 – 25%

A quantidade de água intercetada depende de:

- características da chuvada (intensidade, tamanho das gotas)
- da espécie, idade e densidade do coberto vegetal
- da velocidade do vento

UC Hidrologia / 1º ciclo de Engs Agronómica, Ambiente e Florestal
Isabel Alves e M.ª Rosário Carneira /Área Disciplinar de Eng.º Rural

❖ Importância do conhecimento da evaporação/evapotranspiração/interceção

São termos do **balanço hidrológico ao nível das bacias hidrográficas e ao nível das parcelas agrícolas/florestais**

Exemplos:

- A **E** é responsável por **perdas de água** importantes nos reservatórios (albufeiras, lagoas), pelo que deve ser considerada na fase de dimensionamento de barragens e outros reservatórios, assim como durante a sua gestão;
- A **ET** é essencial para a determinação das necessidades de rega das culturas (projeto e gestão de regadios coletivos ou individuais).




Área Disciplinar de Engenharia Rural

2.2 MEDIÇÃO DA EVAPORAÇÃO, INTERCEÇÃO, TRANSPIRAÇÃO E EVAPOTRANSPIRAÇÃO

❖ Medição da evaporação de superfícies livres de água

A. Medição direta

- Tinas evaporimétricas
- Balanço hidrológico

Não será abordada nesta UC



B. Medição indireta

- Método do balanço de energia
- Método aerodinâmico
- Método das flutuações instantâneas
- Método combinado

Área Disciplinar de Engenharia Rural

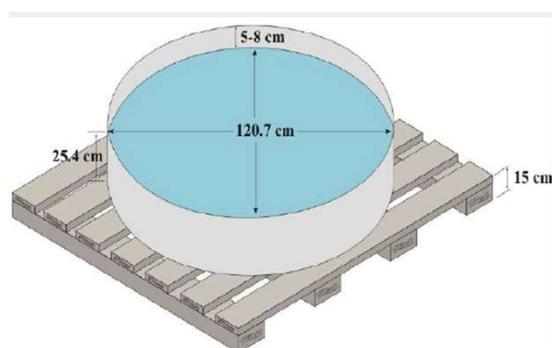
A. Medição direta

Tinas evaporimétricas



Tina Classe A

Área Disciplinar de Engenharia Rural

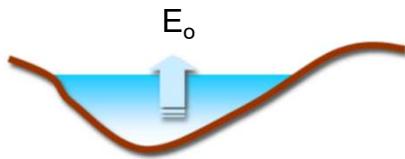


Estrado de madeira (ou superfície isolante): para minimizar as trocas de energia com o solo

A evaporação é determinada através da equação do balanço:

$$P + R - E = \Delta A$$

- E – evaporação
- P – precipitação
- R – água usada para repor o nível na tina
- ΔA – variação da água armazenada na tina



$$E_o = K_{tina} E_{tina}$$

E_o – evaporação do lago/albufeira
 K_{tina} – coeficiente da tina
 E_{tina} – evaporação medida na tina



Valores de K_{tina} em Portugal:

- Outubro e Novembro: 0.7
- Dezembro a Março: 0.6
- Abril e Maio: 0.7
- Junho a Setembro: 0.8

$K_{tina} < 1$ porque:

- Energia recebida pelos lados e fundo → maior temperatura da água → maior evaporação
- Efeito de oásis (transporte de energia por massas de ar provenientes das zonas circundantes)
- Efeito do bordo sobre a turbulência do ar (Lencastre e Franco, 1984)

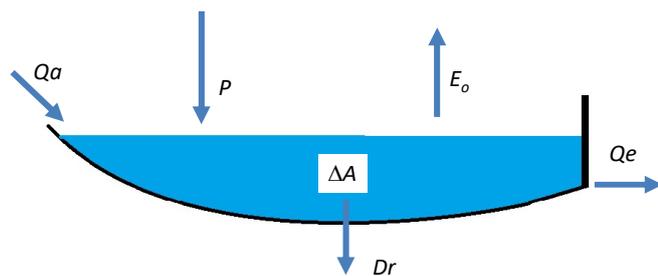
Área Disciplinar de Engenharia Rural

Balanço de massa

$$E_o = P + Q_a - (D_r + Q_s + \Delta A)$$

ΔA – variação do armazenamento de água
 P – precipitação
 Q_a – escoamento afluente
 Q_s – escoamento efluente
 D_e – escoamento infiltrado
 E_o – evaporação

Escala das grandes massas de água, como lagoas e lagos
(para valores anuais, de preferência)



De um modo geral,

- Os reservatórios (naturais ou artificiais) não têm instrumentação suficiente para estimar os componentes desta equação de balanço, nomeadamente os escoamentos afluentes (que podem ser múltiplos, e superficiais e subterrâneos) e as perdas por infiltração.
- Os reservatórios artificiais (albufeiras de barragens) têm medições dos volumes efluentes.

Área Disciplinar de Engenharia Rural

❖ Medição da evapotranspiração

A medição da evapotranspiração é mais complicada que a da água porque intervém adicionalmente o mecanismo de transpiração das plantas, mas podem usar-se aproximações semelhantes.

Assim, a evapotranspiração pode ser obtida a partir da equação para o **balanço de massa**, para um dado intervalo de tempo, aplicada a diferentes sistemas e escalas espaciais:

- a nível de uma **bacia hidrográfica**,
- num pequeno volume de solo cultivado – **lisímetros**.

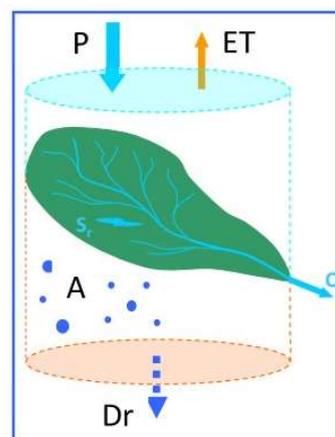
Área Disciplinar de Engenharia Rural

a) Bacia hidrográfica (para valores anuais, de preferência – ano hidrológico)

A equação do balanço de massa aplicada a uma bacia hidrográfica e resolvida em ordem à evapotranspiração conduz a:

$$ET = P - Q - Dr - \Delta A$$

em que P é a precipitação, Q o escoamento na secção de jusante do curso de água, Dr o escoamento subterrâneo perdido através das fronteiras da bacia e ΔA a variação do armazenamento no período considerado.



Área Disciplinar de Engenharia Rural

É possível medir com um erro aceitável a quantidade de **água precipitada** sobre a bacia e, caso exista uma estação hidrométrica, o volume de **escoamento saído** na secção de jusante da bacia (*assunto a desenvolver em aulas seguintes*).

Para intervalos de tempo inferiores ao ano a variação do armazenamento deixa de ser desprezável, pelo que a equação do balanço só será aplicável se houver **medições extra dos teores em água na bacia**, o que não é efectuado normalmente pela APA.



Estação hidrométrica para medição do escoamento

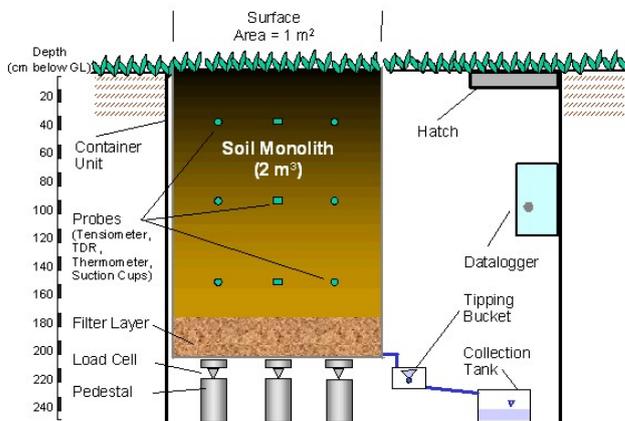
Área Disciplinar de Engenharia Rural

b) Ao nível de um campo cultivado

Lisímetros

- de pesagem
- de drenagem

$$ET = P - Dr - \Delta A$$



Área Disciplinar de Engenharia Rural



❖ Medição da transpiração

Pode utilizar-se o método do fluxo de seiva, Garnier:

- Inserem-se duas sondas termoeletricas no xilema do tronco separadas de 5 cm;
- A sonda superior tem no seu interior uma resistência elétrica (elemento aquecedor) e um termopar (elemento medidor da temperatura)
- A sonda inferior tem apenas um termopar
- É aplicado um pulso de calor à sonda superior;
- Quando não há fluxo de seiva, a diferença de temperatura entre as duas sondas é máxima
- com o aumento do fluxo de seiva, o calor é dissipado mais rapidamente da fonte de aquecimento e a diferença de temperatura diminui.
- a densidade de fluxo de seiva $\Leftrightarrow T$, é calculada através de uma relação empírica determinada por Granier (1985) que inclui a velocidade do fluxo de seiva e a área da secção do xilema.



❖ Medição da intercepção

Equação do balanço de massa

$$V_{\text{Int}} = P - V_{\text{solo}} - V_{\text{tronco}}$$

(b)



(a)



(c)



Medição da intercepção em pinhal, através da medição da: (a) precipitação sobre o pinhal, (b) precipitação que atinge o solo e (c) precipitação que escorre dos troncos (Fonte: David, 2018)

2.2 CÁLCULO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO

Evapotranspiração das culturas, ETc

A FAO recomenda o uso do **método dos coeficientes culturais**

$$ET_c = K_c \cdot ET_o$$

- ETc evapotranspiração cultural [mm d⁻¹],
 - Coeficiente cultural Kc [adimensional],
 - ET_o evapotranspiração de referência [mm d⁻¹].
- Tipo de cultura
 - Fase do ciclo
 - Disponibilidade de água no solo
 - Práticas culturais

Área Disciplinar de Engenharia Rural

Cálculo da ET_o

a) Equação com base física: Equação FAO - Penman-Monteith

$$ET_o = \frac{\Delta \cdot 0.408 (R_n - G) + \gamma \frac{900}{(T + 273)} (e_s - e_a) u_2}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)}$$

Δ - declive da curva de pressão de vapor, em kPa °C⁻¹;

γ - contante psicrométrica, em kPa °C⁻¹;

R_n - radiação líquida absorvida pelo coberto, em MJ m⁻² d⁻¹;

G - densidade de fluxo de calor para o solo, em MJ m⁻² d⁻¹

e_s - pressão de vapor de saturação, em KPa

e_a - pressão real de vapor, em Kpa

u_2 - velocidade média do vento a 2 m de altura, em m s⁻¹

T - temperatura média diária em °C

Formulação para o cálculo dos termos da FAO- PM
<https://www.fao.org/3/x0490e/x0490e00.htm>

Cálculo da ET_o

Dados necessários:

- Coordenadas do local
- Temperatura do ar
- Humidade relativa
- Radiação
- Velocidade do vento

Passo de tempo:

- diário
- semanal
- decenal
- mensal

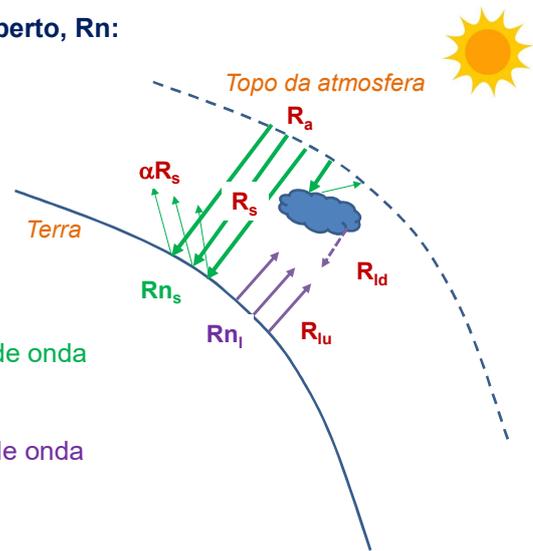
Determinação da radiação líquida absorvida pelo coberto, R_n :

$$R_n = R_{s \downarrow} - \alpha R_{s \uparrow} - R_{lu \uparrow} + R_{ld \downarrow}$$

R_{n_s}
 R_{n_l}

R_{n_s} - Fluxo líquido de radiação de curto comprimento de onda

R_{n_l} - Fluxo líquido de radiação de longo comprimento de onda



Área Disciplinar de Engenharia Rural

Fluxo de calor para o solo (G)

- É a energia utilizada no aquecimento do solo.
- É + quando o solo aquece
- É - quando o solo arrefece
- É muito reduzido comparativamente com R_n , por isso, por vezes é ignorado

Défice de pressão de vapor (VPD)

$$VPD = (e_s - e_a)$$

e_a → Quantidade de vapor de água que existe no ar
 e_s → Quantidade máxima de vapor de água que pode existir até à saturação

Área Disciplinar de Engenharia Rural

b) Equação empírica: Hargreaves – Samani (1985)

$$ET_o = 0.0135 k_{RS} (T_{max} - T_{min})^{0.5} (T_{méd} + 17.8) \frac{R_a}{\lambda}$$

ET_o – evapotranspiração de referência (mm/dia)

T – temperaturas do ar (°C)

R_a – radiação solar no topo da atmosfera ($MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$)

λ – calor latente de vaporização ($MJ\ kg^{-1}$)

k_{RS} – coeficiente de ajustamento da radiação

- A eq HS tem produzido resultados satisfatórios em diversas partes de mundo, apesar da sua aparente simplicidade;
- Método desenvolvido para períodos mensais,
- Na ausência de outros dados, tem sido igualmente aplicada a períodos diários
- necessita de calibração regional geralmente contra a eq FAO Penman-Monteith

Área Disciplinar de Engenharia Rural

- para locais no "interior", com domínio de massas terrestres (i.e., as massas de ar não são influenciadas por uma massa de água de grandes dimensões), $k_{RS} = 0.16$;
- para zonas "costeiras", situadas na ou perto da costa, $k_{RS} = 0.19$;
- em termos médios, utiliza-se $k_{RS} = 0.17$.

Estudos têm demonstrado que o vento é uma fonte importante da variabilidade no valor da ET_o e como a equação de Hargreaves-Samani não contabiliza o vento, diverge sensivelmente de cálculos realizados com a equação FAO Penman-Monteith, quando aplicada a zonas ventosas.

Área Disciplinar de Engenharia Rural

Outras equações simplificadas para cálculo da ET_0

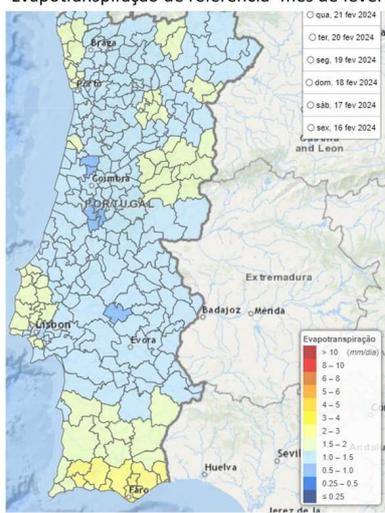
- Equação de Priestley-Taylor - com base na radiação líquida
- Fórmula de Turc – originalmente criada para estimar o escoamento

Erros de 10-15%

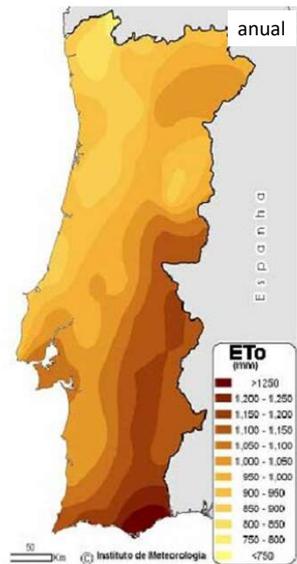
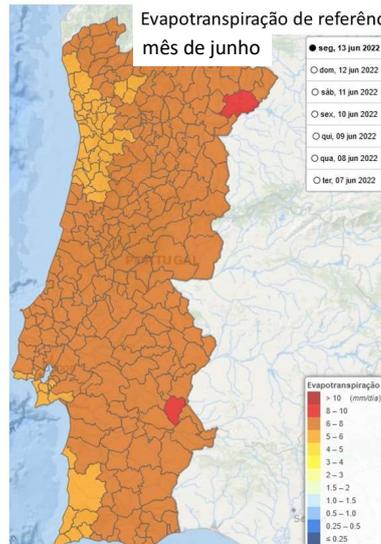
Área Disciplinar de Engenharia Rural

2.4 Valores médios de ET_0 para Portugal continental

Evapotranspiração de referência- mês de fevereiro



Área Disciplinar de Engenharia Rural

Evapotranspiração de referência
mês de junho

Trabalho prático da semana, TP3 : Determinação da ET_0 no Redondo, Alentejo

As equações a aplicar são:

- ❖ Equação com base física : FAO Penman-Monteith
- ❖ Equação empírica simplificada: Hargreaves-Samani

Estação Meteorológica da Vigia

Latitude:	38°31'41"
Longitude:	07°37'40"
Altitude (m):	236
Distância ao mar (km):	105
Altura de medição da v vento (m):	2

Data	Tmed (°C)	Tmax (°C)	Tmin (°C)	HRmed (%)	HRmax (%)	HRmin (%)	RSG (kJ/m2)	DV (graus)	VVmed (m/s)
01/01/2021 23:59	6.14	11.44	2.52	86.6	99	62.19	6750.1	314.44	1.35
02/01/2021 23:59	5.04	12.83	0.84	84.12	100	50.19	10087	329.48	1.08
03/01/2021 23:59	3.69	11.53	-2.69	86.25	100	50.46	10228	324.95	0.64
04/01/2021 23:59	4.59	13.48	-0.47	91.15	100	50.65	6390	281.45	0.45
05/01/2021 23:59	2.53	9.8	-2.16	93.38	100	62.82	9943.8	72.58	0.9
06/01/2021 23:59	3.59	7.32	-0.68	80.43	100	54.33	7164	64.57	1.8
07/01/2021 23:59	6.09	9.66	3.9	69.88	82.73	58.38	6475.8	59.74	1.67
08/01/2021 23:59	5.28	7.74	3.48	71.42	78.18	64.88	4251.6	35.9	2.25
09/01/2021 23:59	2.43	4.21	1.22	84.47	99.25	65.93	1954.7	328.84	1.23
10/01/2021 23:59	4.31	10.4	0.38	80.92	100	51.14	8021.5	22.4	0.98
11/01/2021 23:59	4.83	12.06	-1.04	65.9	91.1	35.16	10842	54.52	0.99
12/01/2021 23:59	3.48	12.7	-4.21	68.14	96.91	27.54	11375	66.01	0.59
13/01/2021 23:59	4.42	16.58	-3.99	73.88	100	31.93	11410	330.56	0.44
14/01/2021 23:59	6.15	13.93	0.46	86.22	100	52.6	10172	327.68	1.05
15/01/2021 23:59	5.09	16.27	-1.91	84.42	100	44.36	10377	348.31	0.44
16/01/2021 23:59	6.14	17.49	-2.73	76.57	100	32.64	10923	67.26	0.45
17/01/2021 23:59	7.09	19.08	-2.02	77.44	99.71	38.62	11112	74.48	0.49

